

## МЕТОДИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ВЫБОРУ РАБОЧЕГО ТЕЛА И РАСЧЕТУ МАССЫ ЗАПРАВКИ ДВУХФАЗНОГО ТЕРМОСИФОНА

к.т.н. Н.П. Попов, А.А. Свидло, к.т.н. Г.Б. Черепенников  
(представил д.т.н., проф. И.М. Приходько)

*Показан характер изменения параметров рабочих тел в двухфазном термосифоне при изменении температуры внешней среды. Приведены рекомендации по выбору рабочего тела и массы его заправки применительно к длинномерному двухфазному термосифону, функционирующему в нестационарном режиме теплопереноса.*

**Постановка проблемы.** Двухфазный термосифон (ДТС) относится к классу тепловых труб и представляет собой удлиненный полый герметично закрытый цилиндр (рис. 1), частично заполненный легкокипящей жидкостью – рабочим телом термосифона [1].

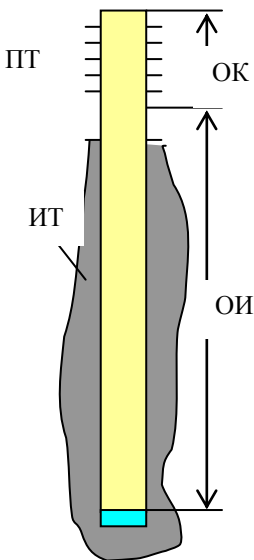


Рис. 1. Схема двухфазного термосифона:  
ИТ – источник теплоты (грунт);  
ПТ – приемник теплоты (воздух);  
ОК – область конденсации;  
ОИ – область испарения

частично заполненный легкокипящей жидкостью – рабочим телом термосифона [1]. Передача теплоты в таком устройстве осуществляется посредством переноса пара во внутренней полости трубы из области испарения (от источника теплоты) в область конденсации (к приемнику теплоты). Образующаяся при конденсации пара жидкость за счет силы тяжести стекает по внутренней поверхности в испарительную часть термосифона. Области применения ДТС весьма разнообразны [2, 3]. В частности, они используются для захлаживания грунтов вплоть до их замораживания, для отвода теплоты из заглубленных в грунт сооружений,

для накопления теплоты в специально создаваемых аккумуляторах и ее последующего использования и др.

В качестве рабочих тел в ДТС используются вещества, агрегатное состояние которых изменяется при заданном уровне температуры источника и приемника теплоты. Выбор рабочего тела определяется многими факторами. Основными из них являются значения давления и температуры, при которой термосифон функционирует, смачиваемость внутренней поверхности термосифона, малая коррозионная активность, невысокая токсичность, малая проницаемость через стенки сосуда и др.

**Анализ литературы.** К настоящему времени проведены достаточно широкие исследования характеристик ДТС различного назначения и конструктивного исполнения [1 – 3]. Анализ этих исследований показывает, что термосифоны, как правило, проектируются на некоторый расчетный стационарный режим теплопередачи. Вопросы, связанные с изменением параметров рабочего тела и характеристик ДТС при их работе в нестационарном режиме, изучены недостаточно. Однако в реальных условиях работы температура источника и приемника теплоты меняются. Следовательно, изменяются параметры рабочего тела и характеристики теплопереноса во внутреннем канале термосифона, поскольку они являются функциями температуры.

**Цель статьи** – оценить характер и уровень изменения параметров некоторых рабочих тел термосифонов при изменении температуры внешней среды и разработать рекомендации по выбору рабочего тела и расчету массы заправки ДТС.

**Материалы исследований.** Методические особенности разработанного подхода к выбору рабочего тела рассмотрим на примере термосифона, используемого для захлаживания грунтового массива. Примем в качестве исходных данных следующие параметры: тепловая нагрузка термосифона  $Q = 1$  кВт; длина заглубленной в грунт испарительной части  $L_u = 27$  м; длина конденсаторной части, расположенной над поверхностью земли,  $L_k = 3$  м; внутренний диаметр трубы  $D_u = D_k = 0,1$  м; начальная температура воздуха  $10$  °С. При использовании термосифона для захлаживания грунта температурный диапазон, в котором работает термосифон, определяется переменными во времени температурой грунта и температурой наружного воздуха. Для условий Украины принимаем, что температура насыщения  $T_s$  рабочего тела в ходе функционирования термосифона изменяется в пределах  $+10 \dots - 30$  °С. В качестве рабочих тел выбираем фреоны R11, R12, R22 и аммиак  $NH_3$ . Следует отме-

тить, что указанные фреоны в настоящее время не производятся, но, поскольку они хорошо изучены, обращение к ним методически оправдано.

Тепловой поток  $Q$  Вт, передаваемый термосифоном, равен

$$Q = r \cdot \dot{m}_п = r \cdot \rho_п \cdot S \cdot W_п, \quad (1)$$

где  $r$ , Дж/кг – удельная теплота парообразования;  $\dot{m}_п$ , кг/с – массовый расход пара в паровом канале;  $S$ , м<sup>2</sup> – площадь поперечного сечения канала;  $W_п$ , м/с – скорость пара в канале;  $\rho_п$ , кг/м<sup>3</sup> – плотность пара.

На рис. 2 приведены зависимости произведения  $r \cdot \rho_п = f(T)$  и скорости  $W_п = f(T)$  от температуры в заданном диапазоне ее изменения, построенные с использованием справочных данных [4]. Из графиков следует, что при понижении температуры существенно уменьшается величина плотности пара и произведение  $r \cdot \rho_п$ . При  $Q = \text{const}$  это приводит к росту скорости пара. Наибольшую скорость пара при заданных условиях имеет фреон R11. Высокая скорость пара во внутреннем канале нежелательна, поскольку может привести не только к неоправданно большим потерям трения о стекающую жидкостную пленку, но и главным образом к возникновению неустойчивого режима течения пленки вплоть до так называемого режима «захлебывания» [5].

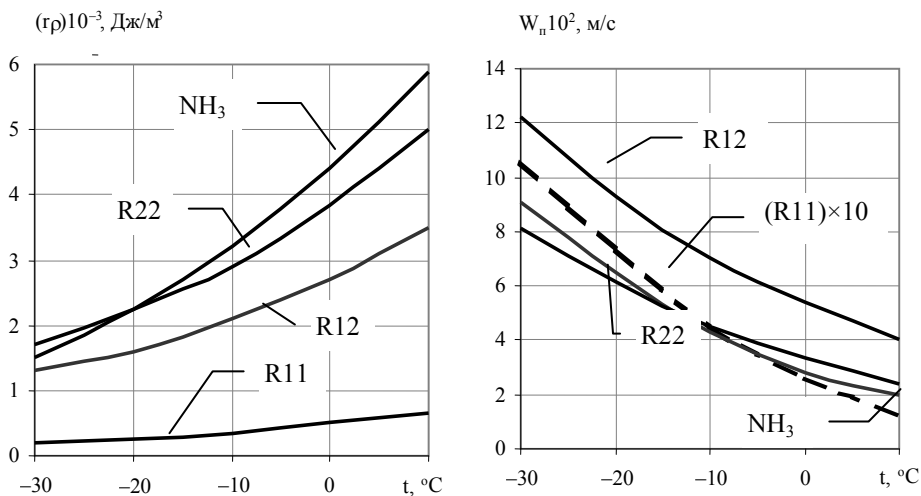


Рис. 2. Зависимость произведения  $r \cdot \rho$  (а) и скорости пара (б) от температуры рабочего тела

Минимальную массу заправки определим из условия наличия жидкостной пленки на всей поверхности термосифона. С этой целью воспользуемся соотношением Нуссельта для пленочной конденсации на вертикальной пластине [6].

В результате преобразований этого соотношения применительно к условиям течения пленки в ДТС получена формула для расчета массы рабочего тела, находящегося в жидкой фазе:

$$m_{ж} = \frac{4}{5} \pi \cdot (D_k \cdot L_k + D_{и} \cdot L_{и}) \sqrt{\frac{4 \cdot \lambda_{ж} \cdot \mu_{ж} \cdot \rho_{ж}^2 \cdot (T_{с.и} - T_{с.к}) \cdot L_{и} \cdot L_{к}}{g \cdot r \cdot (L_{и} + L_{к})}}, \quad (2)$$

где  $\lambda_{ж}$ ,  $\mu_{ж}$ ,  $\rho_{ж}$  – соответственно теплопроводность (Вт/(м·К)), динамическая вязкость (Па·с), плотность (кг/м<sup>3</sup>) жидкой фазы рабочего тела.

Параметры пара для условий работы термосифона находятся на р-і – диаграмме в области влажного пара. Из анализа диаграммы следует, что при снижении температуры рабочего тела при условии  $V = \text{const}$  происходит снижение его степени сухости  $x$ , по определению равной

$$x = m_{п} / (m_{п} + m_{ж}). \quad (3)$$

Следовательно, при изменении температуры рабочего тела будет изменяться соотношение между массой пара  $m_{п}$  и массой жидкости  $m_{ж}$ . Снижение температуры приводит к увеличению доли жидкой фазы и уменьшению доли пара. При этом часть жидкости оказывается избыточной и скапливается у дна термосифона. В результате площадь поверхности пленки, а, следовательно, и массовый расход пара  $\dot{m}_{п}$  уменьшается. Уменьшается и тепловой поток в сторону конденсатора.

Для принятого случая, используя данные [4], был проведен расчет изменения массы пара и жидкости в заданном диапазоне температур. За начальную принята температура, равная 10 °С. Результаты расчета массы заправки и соотношения масс жидкой и паровой фаз приведены на рис. 3.

Линии 1 отображают суммарную массу заправки ( $m_3 = m_{ж} + m_0$ ), линии 2 – массу жидкости в пленке на поверхности термосифона, линии 3 характеризуют соотношение фаз. Область между линиями 1 и 3 соответствует паровой фазе, а область ниже линии 3 – жидкой фазе. Из рисунка следует, что масса жидкости в пленке невелика, а ее изменение при изменении температуры незначительно. Наименьшую массу жидкости в пленке имеет термосифон, заправленный аммиаком. Доля жидкой фазы при  $T_s = -30$  °С составляет примерно 78 – 80 % для фреонов

R12, R22 и аммиака и 93 % – для фреона R11.

Величина массы пара определяется его плотностью при данной температуре и объемом парового пространства. Рекомендуется принимать ее равной массе насыщенного пара при начальной температуре.

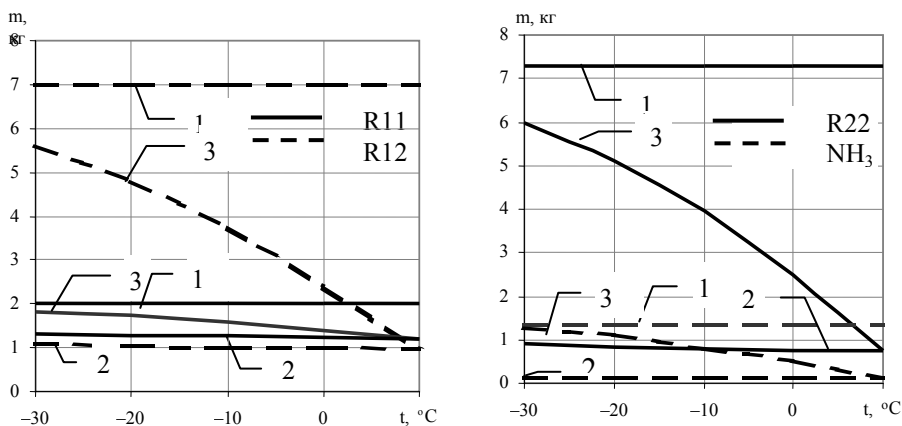


Рис. 3. Зависимость массы заправки термосифона от температуры:

- 1 – суммарная масса заправки;
- 2 – масса жидкостной пленки на внутренней поверхности термосифона;
- 3 – соотношение фаз

В длинномерном ДТС, заправленном по разработанной рекомендации, объем жидкой фазы рабочего тела, скапливающейся у дна, составляет 1...2 % от внутреннего объема испарителя и, следовательно, заметного влияния на характеристики термосифона не оказывает.

**Выводы.** Предложен подход к определению массы заправки рабочим телом двухфазного термосифона, функционирующего в нестационарном режиме теплопереноса, согласно которому:

- масса рабочего тела термосифона должна быть равна сумме массы насыщенного пара во внутренней полости термосифона при начальной температуре и массы жидкостной пленки, полностью покрывающей внутреннюю поверхность термосифона;
- начальная температура должна выбираться исходя из целевого назначения термосифона. Так, если термосифон предназначен для охлаждения грунтового массива, то в качестве начальной целесообразно принимать температуру, равную температуре невозмущенного грунта на

уровне основания термосифона или на 2 – 3 °С выше;

– изменение массы жидкости в донной части длинномерного термосифона, обусловленное изменением температуры внешней среды, не оказывает существенного влияния на характеристики термосифона;

– при заданном диаметре термосифона в качестве рабочего тела следует выбирать вещество, обеспечивающее невысокую скорость пара в канале. При отсутствии альтернативы по выбору рабочего тела целесообразна корректировка диаметра в сторону его увеличения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пресняков В.Ф., Неврузов Ю.В., Гонтарев Ю.К. *Рабочие режимы тепловых труб. (Обзор).* – Днепропетровск: АН УССР, 1987. – 146 с.
2. Васильев Л.А., Гранович Л.П., Хрусталева Д.К. *Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии.* – Минск: Наука и техника, 1988. – 159 с.
3. Васильев Л.А. *Тепловые трубы для нагрева и охлаждения грунта.* – Минск: ИТМО АН БССР. Препринт. – № 16. – 1985. – 47 с.
4. Богданов С.Н., Иванов О.П., Куприянов А.В. *Холодильная техника. Свойства веществ: Справочник. Изд. 2-е, доп. и перераб.* – Л., 1976. – 168 с.
5. Свидло А.А. *Гидродинамическое взаимодействие пара и жидкостной пленки в двухфазном термосифоне* // *Зб. наук. пр.* – Х.: ХВУ. – 1998. – С. 188 – 194.
6. Дан П.Д., Рей Д.А. *Тепловые трубы: Пер. с англ.* – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
7. Грехнев В.Н., Свидло А.А., Черепенников Г.Б. *Характеристики длинномерного двухфазного термосифона со змеевиковым испарителем* // *Механика технологического оборудования: Методическое пособие / Под ред. В.А. Проконова. Ч.1.* – Х.: МО СССР, 1982. – С. 23 –30.

Поступила 30.04.2003

**ПОПОВ Николай Прокопьевич**, канд. техн. наук, доцент, ведущий научный сотрудник научного центра при ХВУ. В 1963 году окончил Харьковское ВВКИУ. Область научных интересов – тепло- и массообмен в ракетно-космической технике и окружающей природной среде.

**СВИДЛО Алексей Александрович**, начальник отдела Харьковского военного университета. В 1971 году окончил Харьковское ВВКИУРВ. Область научных интересов – тепло- и массообмен в тепловых трубах и фортификационных сооружениях.

**ЧЕРЕПЕННИКОВ Геннадий Борисович**, канд. техн. наук, старший научный сотрудник, старший научный сотрудник научного центра при ХВУ. Окончил Харьковский авиационный институт в 1964 г. Область научных интересов – тепло- и массообмен в ракетно-космической технике; теплоэнергетика.