

## ОСОБЕННОСТИ ТЕЧЕНИЯ ПАРА И ЖИДКОСТНОЙ ПЛЕНКИ В ДЛИННОМЕРНОМ ДВУХФАЗНОМ ТЕРМОСИФОНЕ С ОБЪЕМНЫМ ИСПАРЕНИЕМ РАБОЧЕГО ТЕЛА

Н.П. Попов, А.А. Свидло  
(Объединенный научно-исследовательский институт  
Вооруженных Сил, Харьков)

*Излагается методический подход к расчету и приводятся результаты расчета параметров встречного движения пара и жидкостной пленки в двухфазном термосифоне, дается оценка устойчивости режима работы.*

*длинномерный двухфазный термосифон, объемное испарение, рабочее тело*

**Постановка проблемы.** Во многих практически важных случаях возникает задача передачи теплоты некоторому объекту с низкой теплопроводностью (например, грунту) с целью либо его нагревания (например, при создании аккумулятора теплоты), либо с целью отвода теплоты из подземного сооружения для поддержания в последнем температурно-влажностного режима. Весьма перспективным теплопередающим устройством для этих и других подобных целей является длинномерный (10...30 м и более) двухфазный термосифон (ДДТС) с объемным испарением рабочего тела. Нагревание и испарение жидкости в ДДТС может осуществляться с помощью, например, теплообменного аппарата змеевикового типа с промежуточным теплоносителем. Теплота от испарителя к конденсатору переносится движущимся паром. Термосифон может устанавливаться как вертикально, так и с достаточно малым углом к горизонту.

При разработке подобных устройств важны знания закономерностей движения пара и жидкости во внутренней полости термосифона, что необходимо для выбора оптимальной длины и диаметра термосифона, прогнозирования возможного нарушения устойчивости процесса передачи теплоты. В этой связи исследования закономерностей процессов течения пара и жидкости во внутреннем канале термосифона являются актуальными.

**Анализ литературы.** Возможности создания, схемы и характеристики ДДТС изучались в работах [2, 5]. Показано, что для уменьшения длины испарительной части термосифона и увеличения конденсаторной

его части целесообразно применение испарителя с объемным испарением рабочего тела. Нагревание и испарение жидкости в ДДТС может осуществляться с помощью, например, теплообменного аппарата змеевикового типа с промежуточным теплоносителем. Теплота от испарителя к конденсатору переносится движущимся паром. Термосифон может устанавливаться как вертикально, так и с достаточно малым углом к горизонту. Возможность создания подобного ДДТС с изотермической поверхностью конденсатора изучалась в работе [5]. Авторами этой работы разработана схема ДДТС, проведены детальные экспериментальные исследования его интегральных энергетических параметров.

Анализ результатов известных исследований показывает, что характеристики двухфазных термосифонов с объемным испарением рабочего тела изучены недостаточно. Малоизученными являются процессы теплопереноса во внутреннем канале термосифонов, что затрудняет, в частности, оценку пределов устойчивой работы ДДТС. Методический подход к решению подобной задачи для термосифона с поверхностным испарением рабочего тела приведен в работах [6, 7]. В работах предложен метод расчета параметров движения пара и жидкостной пленки в ДТС, который может быть использован и для расчетов ДТС других типов.

**Цель работы.** Целью работы является разработка метода расчета параметров движения пара и жидкостной пленки во внутреннем канале длиномерного термосифона с объемным испарением рабочего тела.

**Материалы исследований.** Двухфазный термосифон представляет собой закрытую с обоих концов трубу с испарителем И у донной ее части и протяженным конденсатором К (рис. 1). Испаритель термосифона залит жидкостью – рабочим телом термосифона. Внутри испарителя располагается теплообменник Зм в форме змеевика.

Движение пара в канале ДТС происходит в условиях замкнутого пространства. При функционировании термосифона движение пара обеспечивается поступающей из испарителя массой пара с последующим стоком конденсата в конденсаторе. При движении пара от испарителя к конденсатору кинетический напор уравнивается напором, обусловленным силой вязкостного трения. Кон-

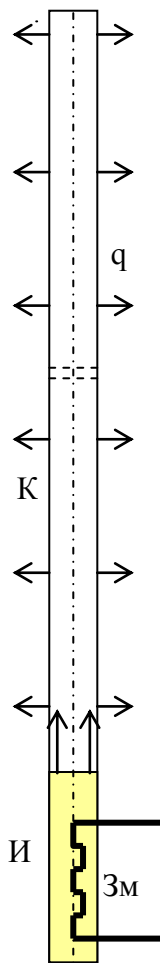


Рис. 1. Схема термосифона

денсат стекает вниз под действием силы тяжести. Из-за большой протяженности канала толщина пленки будет переменной и максимальной вблизи испарителя. Именно это сечение выбираем в качестве расчетного.

Массовый расход пара  $\dot{m}_п$  и расход жидкости в пленке  $\dot{m}_ж$  определяются из соотношения  $\dot{m}_п = \dot{m}_ж = Q/r_{\phi}$ , где  $r_{\phi}$  – теплота испарения рабочего тела.

Отличительной особенностью функционирования ДДТС является то, что передаваемый тепловой поток ограничивается теплофизическими свойствами приемника теплоты, геометрическими размерами конденсатора (длиной  $L$ , диаметром канала  $d_0$ ), температурой пара  $T_n$ , параметрами рабочего тела.

На рис. 2 приведена схема течения пара вблизи границы раздела фаз (масштаб толщины пленки  $\delta$  не сохранен). На рисунке обозначены:  $r_0$  – радиус канала;  $\delta$  – толщина пленки;  $W_n$  – скорость пара;  $W_ж$  – скорость жидкости. На рисунке пунктирной линией обозначена эпюра скорости пара при отсутствии взаимодействия фаз, сплошной линией – эпюра скорости пара при наличии их взаимодействия.

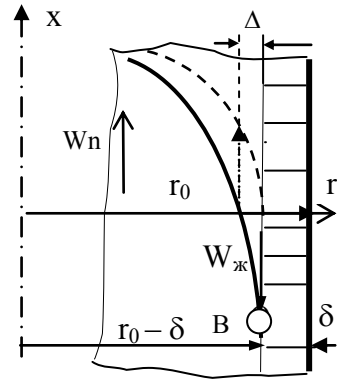


Рис. 2. Схема течения пара в приграничной области

Подводимый к рабочему телу тепловой поток  $Q$  (тепловая нагрузка ДДТС) определялся разностью температур  $T_{T.вх} - T_{T.вых}$  теплоносителя на

входе в змеевик и на выходе из него и расходом  $\dot{m}_T$  теплоносителя и рассчитывается по формуле

$$Q = c_p \cdot \dot{m}_T \cdot (T_{T.вх} - T_{T.вых}), \quad (1)$$

где  $c_p$  – теплоемкость теплоносителя.

На установившемся тепловом режиме подводимый к рабочему телу тепловой поток равен отводимому тепловому потоку от наружной поверхности конденсатора.

При функционировании ДТС происходит раздельное и встречное движение пара и жидкостной пленки. При малых скоростях пара и жидкости силовое взаимодействия между ними отсутствует. В этом случае скорость пара в канале термосифона определяется по уравнению

$$W_{\text{пл}}(y) = \frac{1}{2} \cdot \beta \cdot ((r_0 - \delta)^2 - y^2), \quad (2)$$

где  $\beta$  и  $\delta$  – соответственно постоянный множитель и толщина пленки, равные

$$\beta = \frac{1}{2\mu_{\text{п}}} \cdot \left( \frac{\partial p_{\text{пот}}}{\partial x} \right); \quad \delta = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot \dot{m}_{\text{ж}} \cdot \mu_{\text{ж}}}{\pi \cdot g \cdot d \cdot \rho_{\text{ж}} \cdot (\rho_{\text{ж}} - \rho_{\text{п}})}}, \quad (3)$$

где  $\frac{\partial p_{\text{пот}}}{\partial x}$  – потери напора на трение;  $g$ ,  $\rho_{\text{ж}}(T_{\text{п}})$ ,  $\mu_{\text{ж}}(T_{\text{п}})$ ,  $\rho_{\text{п}}(T_{\text{п}})$ ,  $\mu_{\text{п}}(T_{\text{п}})$  – соответственно ускорение свободного падения, плотность, динамическая вязкость жидкости и пара, температура пара;  $r_0$  – радиус канала;  $d = 2 \cdot r_0$ .

При тех же условиях уравнение движения жидкости в промежутке между радиусами  $(r_0 - \delta)$  и  $r_0$  в вертикальном канале термосифона при действии только силы тяжести и внутреннего трения описывается уравнением

$$\mu_{\text{ж}} \cdot \frac{\partial W_{\text{ж1}}}{\partial y} = \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot (y - (r_0 - \delta)). \quad (4)$$

После интегрирования (4), с учетом принятого обозначения  $\alpha = \rho_{\text{ж}} \cdot g / \mu_{\text{ж}}$ , формула для расчета скорости жидкости записывается в виде

$$W_{\text{ж1}} = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot (r_0^2 - y^2) + \alpha \cdot (r_0 - \delta) \cdot (r_0 - y). \quad (5)$$

Из (5) следует, что скорость жидкости на границах пленки равна

$$y = r_0 - \delta \rightarrow W_{\text{ж1B}} = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \delta^2; \quad y = r_0 \rightarrow W_{\text{ж}}(r_0) = 0. \quad (6)$$

При встречном движении пара в канале и жидкости в пленке вследствие трения между жидкостью и паром происходит их взаимное торможение. При этом характер течения фаз существенно меняется. На рис. 2 приведен характер изменения скорости пара в приграничной области канала при наличии трения между жидкостью и паром. Видно, что в приграничной области  $\Delta$  пар движется в противоположном основному потоку направлении, при этом его скорость меняется от  $W_{\text{п}\Delta}$  до  $W_{\text{пB}} = W_{\text{жB}}$ .

Напряжение трения  $\tau_{\text{п}}$  на границе «пар – жидкость», обусловленное влиянием движущейся жидкости, можно оценить исходя из предположения, что напряжение трения в приграничной слое пара  $\Delta$  пропорционально изменению кинетической энергии пара в этом слое. В нашем случае параметры движения априори неизвестны. По этой причине минимальное значение  $\tau_{\text{п}}$  оценим исходя из характера течения пара в этой области

$$\tau_{\text{п.мин}} \cong \rho_{\text{п}} \cdot (W_{\text{н}\Delta} / 2)^2 / 2 + \rho_{\text{п}} \cdot (W_{\text{жВ}} / 2)^2 / 2.$$

Полагая, что  $W_{\text{н}\Delta} = W_{\text{жВ}}$ , получим

$$\tau_{\text{п.мин}} \cong \rho_{\text{п}} \cdot (W_{\text{жВ}})^2 / 4 = 0,25 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot (W_{\text{жВ}})^2.$$

В общем случае

$$\tau_{\text{п}} = k_1 \cdot \rho_{\text{п}} \cdot W_{\text{жВ}}^2, \quad (7)$$

где  $k_1$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий долю кинетической энергии, затрачиваемой на торможение жидкостной пленки.

Оценки показывают, что с учетом торможения всего потока пара коэффициент может меняться в пределах  $k_1 = 0,2 \dots 0,5$ .

Напряжение трения в поверхностном слое пленки определяется из условия  $\tau_{\text{ж}} = -\tau_{\text{п}}$ . При скольжении поверхностных слоев жидкости относительно внутренних напряжение трения уравнивается силами вязкости

$$\tau_{\text{ж}} = -\mu_{\text{ж}} \cdot \frac{\partial W_{\text{ж}}}{\partial y}. \quad (8)$$

Сдвиговое напряжение по толщине пленки постоянно. В этом случае уравнение движения (4) преобразуется к виду

$$\mu_{\text{ж}} \cdot \frac{\partial W_{\text{ж}}}{\partial y} = \rho_{\text{ж}} \cdot g \cdot (y - (r_0 - \delta)) - \tau_{\text{ж}}. \quad (9)$$

Решение уравнения (9) имеет вид

$$W_{\text{ж}} = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot (r_0^2 - y^2) + \alpha \cdot (r_0 - \delta) \cdot (r_0 - y) + \frac{\tau_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}} (r_0 - y). \quad (10)$$

Значения скорости на границах пленки равны

$$y = r_0 - \delta \rightarrow W_{\text{жВ}0} = -\frac{1}{2} \cdot \alpha \cdot \delta^2 + \frac{\tau_{\text{ж}}}{\mu_{\text{ж}}} \cdot \delta; \quad y = r_0 \rightarrow W_{\text{ж}} = 0. \quad (11)$$

С учетом сдвигового напряжения уравнение движения пара и его решение имеют вид

$$\frac{\partial W_{\text{п}}}{\partial y} = -\beta \cdot y - \theta \cdot y; \quad W_{\text{п}}(y) = \frac{1}{2} \cdot (\beta + \theta) \cdot ((r_0 - \delta)^2 - y^2) + W_{\text{жВ}}; \quad \theta = \tau_{\text{п}} / \mu_{\text{п}}.$$

Приведенная система уравнений позволяет производить расчет изменения скорости пара и жидкости по радиусу канала. Метод расчета параметров пара состоит в следующем.

Исходными данными для проведения расчетов являются геометрия термосифона (диаметр  $d$ , длина  $L$ ), тепловая нагрузка  $Q$ , тип рабочего тела, температура теплоносителя на входе в теплообменник  $T_{\text{Т.ВХ}}$ , расход теплоносителя  $\dot{m}_{\text{Т}}$  в теплообменнике.

Температура теплоносителя на выходе из испарителя  $T_{T, \text{ВЫХ}}$  для расчетного случая определяется из уравнения (1). Температура пара назначается исходя из практики проектирования подобных теплообменников равной  $T_{\text{П}} = T_{T, \text{ВЫХ}} - (3 \dots 5) \text{ } ^\circ\text{C}$ .

Значения плотности пара и жидкости, динамической вязкости фаз (ацетон) рассчитывались по формулам:

$$\rho_{\text{П}} = 0,26 + 1,43 \cdot 10^{-2} T_{\text{П}} + 0,525 \cdot 10^{-3} T_{\text{П}}^2; \quad \mu_{\text{П}} = 0,78 \cdot 10^{-5} + 0,002 \cdot 10^{-5} T_{\text{П}};$$

$$\rho_{\text{Ж}} = 812 - 1,22 \cdot T_{\text{П}}; \quad \mu_{\text{Ж}} = 0,395 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(-8,4 \cdot 10^{-3} \cdot T_{\text{П}}).$$

Приведенные уравнения использованы при разработке программы расчета на ЭВМ. Результаты расчетов приведены на рис. 3 и рис. 4.

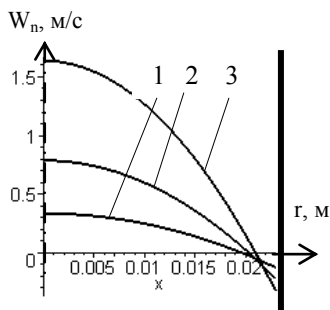


Рис. 3. Изменение скорости пара по радиусу термосифона

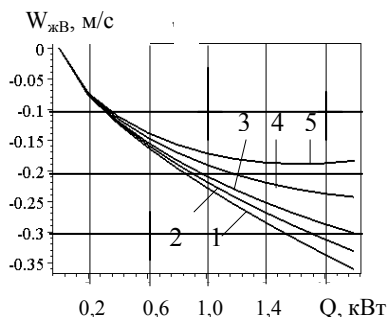


Рис. 4. Зависимость скорости жидкости от тепловой нагрузки

На рис. 3 приведена зависимость скорости пара по радиусу канала термосифона для трех значений тепловой нагрузки  $Q = 400 \text{ Вт}$  – кривая 1,  $Q = 1000 \text{ Вт}$  – кривая 2 и  $Q = 2000 \text{ Вт}$  – кривая 3.

На рис. 4 представлены графики изменения скорости жидкости на ее границе с паром от тепловой нагрузки термосифона. Параметром кривых является значение коэффициента  $k1$ , определяющего величину сдвигового напряжения. На рисунке обозначены: 1 –  $k1 = 0$  (взаимодействие отсутствует); 2 –  $k1 = 0,1$ ; 3 –  $k1 = 0,2$ ; 4 –  $k1 = 0,4$ ; 5 –  $k1 = 0,6$ .

Расчеты показывают, что вследствие торможения скорость жидкости в пленке снижается. При  $k1 = 0,6$  при тепловой нагрузке  $Q > 1,4 \text{ кВт}$  может даже происходить обратное течение жидкости.

Анализ результатов расчета, представленных на рис. 4, свидетельствует о том, что при  $k1 > 0,2$  увеличение тепловой нагрузки свыше  $0,6 \text{ кВт}$  влечет к значительному торможению жидкостной пленки. Это говорит о предкритическом состоянии процесса теплопередачи. Между тем

расчеты, проведенные в [10], свидетельствуют о том, что при таких условиях термосифон работает с достаточным запасом устойчивости. Таким образом, можно сделать вывод о том, что при расчете параметров движения фаз в термосифоне коэффициент  $k_1$  следует принимать не более 0,25.

**Выводы.** Разработана методика расчета параметров движения пара и жидкостной пленки во внутреннем канале длинномерного термосифона с объемным испарением рабочего тела. Получены характеристики движения фаз по радиусу канала и в области их непосредственного взаимодействия. Показано, что при встречном движении пара и пленки жидкости происходит торможение жидкости и изменение на обратное течение пара. При определенных условиях указанный характер движения приводит к возникновению неустойчивого режима работы термосифона.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Дан П., Рей Д. *Тепловые трубы* : Пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 272 с.
2. Васильев Л.Л., Гракович Л.П., Хрусталева Д.К. *Тепловые трубы в системах с возобновляемыми источниками энергии*. – Минск: Наука и техника, 1988. – 159 с.
3. Безродный М.К. и др. *Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике*. – К.: Вища школа, 1991. – 74 с.
4. Присяжков В.Ф., Неврузов Ю.В., Гонтарев Ю.К. *Рабочие режимы тепловых труб (Обзор)*. – Днепропетровск: АН УССР, 1987. – 146 с.
5. Грехнев В.Н., Свидло А.А., Черепенников Г.Б. *Характеристики длинномерного двухфазного термосифона со змеевиковым испарителем // Механика технологического оборудования. Ч.1. Методическое пособие / Под ред. В.А. Прокопова*. – Х.: МО СССР, 1982. – С. 23 – 30.
6. Свидло А.А. *Гидродинамическое взаимодействие пара и жидкостной пленки в двухфазном термосифоне // Збірник наукових праць*. – Х.: ХВУ, 1998. – Вип. 21. – С. 188 – 194.
7. Попов Н.П., Свидло А.А. *Характеристики встречного течения пара и жидкостной пленки в двухфазном термосифоне. // Моделювання та інформаційні технології*. – К.: НАНУ, 2005. – Вип. 33. – С. 150 – 155.
8. Некоряков В.Е., Покусаев Б.Г., Алексеенко С.В. *Стационарные двумерные катящиеся волны на вертикальной пленке жидкости // Инж.- физ. журнал*, 1976. – Т.30. – № 5. – С. 780 – 785.
9. Уоллис Г. *Одномерные двухфазные течения: Пер. с англ. / Под ред. проф. И.Т. Аладьева*. – М.: Мир, 1972. – 440 с.
10. Попов Н.П., Свидло А.А. *Выбор критерия устойчивости рабочего процесса в двухфазном термосифоне. // Збірник наукових праць*. – Х.: ХУ ПС. – 2005. – Вип. 5(5). – С. 110 – 111.

Поступила 17.08.2005

**Рецензент:** доктор технических наук, профессор Э.Е. Прохач,  
ХФ Государственного предприятия МОУ «Военконверс».

---