УДК624.139.64

МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХФАЗНОГО ТЕРМОСИФОНА

В. В. Ананьев

ООО НПП«Медгаз»

Российская Федерация, 121471, Москва, Можайское шоссе, 29. E-mail: vvanord@yandex.ru

Разработана модель замкнутого трубчатого испарительного термосифона. Составлена система дифференциальных уравнений для определения толщины пленки и скорости её движения по длине трубы. Разработан численный алгоритм решения задачи. Выполнено тестирование этого алгоритма применительно к термостабилизации мерзлых грунтов. Результаты расчетов показывают возможность решения задачи о взаимодействия термосифона с окружающейвнешней средой при дополнении алгоритмами вычисления плотности тепловых потоков к испарителю.

Ключевые слова: двухфазный термосифон, модель, система дифференциальных уравнений, численный алгоритм, термостабилизация, пластично-мерзлый грунт, толщина пленки, скорость пленки, тепловой поток.

MODELING TWO-PHASE THERMOSIPHON

V. V. Ananiev

LLC SPE "Medgas"

29, Mozhaiskoye shosse str., Moscow, 121471, Russian Federation. E-mail: vvanord@yandex.ru

The article presents a model of a closed tube two-phase thermosiphon. The author demonstrates structured system of differential equations to determine film thickness and speed of its motion along the length of the pipe. The numerical algorithm is developed to solve the problem. Testing the algorithm applied to heat frozen ground is performed. The results show the possibility to solve the problem of thermosiphon interaction with the surrounding environment; in addition, algorithms calculate the density of heat flow to the evaporator.

Keywords:two-phase thermo-siphon, model, system of differential equations, numerical algorithm, heat setting, plastic-frozen ground, film thickness, film speed, heat flow.

Двухфазные термосифоны представляют собой автономные свободно-конвективные теплопередающие системы, работающие по замкнутому непрерывному конденсационно-испарительному циклу передачи теплоты без совершения внешней работы.

Относительная простота и надежность этих устройств определяет спектр их применения в аппаратах и системах охлаждения и теплоотвода наземного типа: криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов [1]; хранение в заводских условиях и транспортировка с завода-изготовителя космических аппаратов и бортовых ядерных энергетических установок [2; 3]; термостабилизация грунтов сезонными охлаждающими устройствами (СОУ, термостабилизатор) при строительстве зданий и сооружений в районах вечной мерзлоты [4]; обеспечение теплотехнологий и утилизации теплоты отходящих газов металлургических, газовых и химических производств [5] и т. д. Применение испарительных термосифонов в системах охлаждения является эффективным способом повышения надежности их работы, а также улучшения весовых и габаритных характеристик.

Рассматривается сезонное охлаждающее устройство (СОУ) парожидкостного типа, которое состоит из вертикальной трубы постоянного диаметра с конденсатором на верхнем конце (рис. 1). Для такого устройства в работе [6] построена математическая модель конденсатора парожидкостного вертикального СОУ и получены аналитические зависимости, в основу этих зависимостей положена теория Нуссельта–Стокса [7; 8].



Рис. 1. Схема парожидкостного СОУ

Цель работы – построить модель, описывающую движение пленки на всем протяжении трубы от верхнего конца до нижнего с учетом теплообмена на каждом из участков.

При ламинарном движении пленки скорость по толщине изменяется по параболическому закону [8; 9]. Силы вязкого сопротивления распределены по сечению линейно.

Уравнения движения составляются как уравнения равновесия всех внешних сил с учетом сил инерции, выраженных через перемещения и ускорения точек системы [10], и дополняются уравнением приращения толщины пленки dh на участке трубы длиной dz за счет внешнего теплового потока q_e . Система дифференциальных уравнений для скорости и толщины пленки:

$$\begin{cases} \frac{dW}{dz} = \frac{g}{W} - \frac{J}{h^2};\\ \frac{dh}{dz} = \frac{\tilde{q}}{W}, \end{cases}$$
(1)

где $J = \frac{3\mu}{\rho}; \ \overline{\omega}_s = \omega_s \rho; \ q = \frac{q_e}{\overline{\omega}_s}.$

Система (1) дает решение задачи для участка трубы. Тепловые потоки на участках 1–5 различны. Значения w и h на конце предыдущего участка будут начальными условиями для последующего участка. Для решения задачи в целом необходимо решение задачи Коши для системы (1). Эта нелинейная система сингулярна при нулевых начальных условиях. Система аналитических вычислений *Maple-6* [11] позволяет получить численное решение задачи Коши на участке ограниченной длины [0, L]. Система (1) позволяет оценить процессы, происходящие при движении пленки. Так, пленка будет двигаться с постоянной скоростью w^* , если правая часть первого уравнения равна нулю. Из этого условия получаем:

$$w^* = \frac{gh^2}{J} = \frac{g\rho h^2}{3\mu}.$$
 (2)

Численное решение (1) связано с преодолением вычислительной неустойчивости.

На участке пленки длиной dz трубы диаметром D с площадью наружной поверхности S и площадью сечения A действует внешний тепловой поток dQ_{ext} . На участке трубы, расположенном выше данного сечения, внешний тепловой поток равен сумме этих потоков. В каждом сечении внутренний тепловой поток при переносе энергии движущейся пленкой Q_{int} равен произведению объемного расхода на теплосодержание в единице объёма:

$$Q_{int} = Q_{ext} \,. \tag{3}$$

Для выполнения этого условия должно выполняться следующее соотношение:

$$hw = \frac{Q_{ext}}{\pi D\overline{\omega}_{e}},\tag{4}$$

где $\overline{\omega}_s = \omega_s \rho$ – теплосодержание в единице объема.

При численном решении задачи будем предполагать, что вся ось z разбита на равные малые участки длиной dz и существует алгоритм, позволяющий по значениям скорости и толщины пленки в некоторой точке k определить значения скорости и толщины пленки в последующей точке k + 1. Предположим также, что эти зависимости линейны.

Система (3) сингулярна в начале координат при нулевых начальных условиях, необходимо найти решение задачи на первом шаге. Из системы (3) скорость w и толщина пленки h при z = dz:

$$w = \sqrt[3]{\frac{\tilde{q}^2 \left(dz\right)^2 g}{J}}, \quad h = \frac{\tilde{q}}{w} dz .$$
 (5)

При ускоренном движении пленки:

$$w_k \le w_{k+1} \le w_k^{\tau} . \tag{6}$$

Примем

$$w_{k+1} = 0, 5\left(w_k + w_k^*\right).$$
(7)

Толщина пленки из (6):

$$h_{k+1} = \frac{Q_{est}}{\pi D\overline{\omega}_s w_{k+1}} \,. \tag{8}$$

Для оценки качества полученного выше алгоритма выполнен расчет ряда вариантов работы СОУ при исходных данных, принятых в работе [6]: труба 57×3,5 мм; полная длина трубы 10 м; длина первого участка 1,1 м; эффективность ребра 0,75; коэффициент теплоотдачи 25,0 Вт/(м² К); длина второго участка 1,4 м; температура воздуха -20,0 °C; температура конденсации -5,0 °С. По этим данным рассмотрены два варианта, когда плотность внешнего теплового потока на участках 1 и 2 300 Вт/м² и 500 Вт/м². В первом случае пленка доходит до конца трубы, а во втором полностью испаряется раньше. Свойства хладагента R22 принимались по [12] и затем определялись параметры, входящие в формулы численного алгоритма: $\omega_s = 279,0 \ 10^{-6}$ Дж/м³, $q^{-6} = 1,075 \ 10^{-6}$ м/с и $J = 6,456 \ 10^{-7} \ \text{м}^2/\text{c}$. При выполнении численных расчетов принимался шаг dz = 0,1 м. Отличие результатов расчетов, полученных по новой методике, от результатов [6] на участках 1 и 2 в отдельных точках составляют 20-30 %. Результаты расчета по новой методике представлены на рис. 2.

Заключение

Разработана модель термостабилизатора пластично-мерзлых грунтов. Составлена система дифференциальных уравнений для определения толщины пленки и скорости её движения в любой точке в пределах всей трубы. Разработан численный алгоритм решения задачи.

Выполнено тестирование этого алгоритма. Результаты расчетов показывают возможность решения задачи взаимодействия термостабилизатора с окружающим его массивом грунта при дополнении алгоритмами [13] вычисления плотности тепловых потоков от грунта.



Рис. 2. Хладагент R22:

 $a - q_e = -300 \text{ Вт/(м}^2 \text{ K}); \delta - q_e = -500 \text{ Вт/(м}^2 \text{ K}).$ Толщина пленки **h** – левая красная сплошная линия, скорость **w** – правая синяя пунктирная линия. Толщина пленки **h**, мм; скорость пленки **w**, м/с; толщина пленки **h**, мм; скорость пленки **w**, м/с; а – $q_e = -300 \text{ Вт/(m}^2 \text{ K}); \delta - q_e = -500 \text{ Вт/(m}^2 \text{ K})$

Библиографический список

1. Архаров А. М., Кунис И. Д. Криогенные заправочные системы стартовых ракетно-космических комплексов. М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006. 256 с.

2. Романов А. В. Теория комплексной оптимизации проектирования космических аппаратов с ядерными термоэмиссионными энергетическими установками. СПб. : НПО «Профессионал», 2010. 474 с.

3. Крушенко Г. Г., Голованова В. В. Безопасность транспортировки ядерной энергетической установки транспортного средства // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. 2014. № 6. С. 63–67.

4. Фундаментстройаркос : материалы Междунар. научно-практ. конф. по инженерному мерзлотоведению, посвященной ХХ-летию создания ООО НПО. Тюмень : Сити-Пресс, 2011. 456 с.

5. Безродный М. К., Волков С. С., Мокляк В. Ф. Двухфазные термосифоны в промышленной теплотехнике. Киев : Выща шк., 1991. 75 с.

6. Ананьев В. В. Располагаемая теплопередающая способность сезонных охлаждающих устройств. Конденсатор // Решетневские чтения : материалы XVI Междунар. науч. конф., посвящ. памяти ген. конструктора ракет.-косм. систем акад. М. Ф. Решетнева (7–9 ноябр. 2012, г. Красноярск) : в 2 ч. / под общ. ред. Ю. Ю. Логинова ; Сиб. гос. аэрокосмич. ун-т. Красноярск, 2012. Ч. 1. С. 45–46.

7. Кутателадзе С. С. Основы теории теплообмена. Новосибирск : Наука. Сиб. отделение, 1970. 659 с.

 8. Теоретические основы хладотехники. Ч. II. Тепломассообмен / С. Н. Богданов, Н. А. Бучко,
Э. И. Гуйго и др.; под ред. Э. И. Гуйго. М. : Колос, 1994. 367 с.

9. Идельчик И. Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям / под ред. М. О. Штейнберга. 3-е изд., перераб. и доп. М. : Машиностроение, 1992. 672 с.

10. Лойцянский Л. Г., Лурье А. И. Курс теоретической механики. В 2 т. Т II. Динамика. М. : Наука, 1983. 640 с.

11. Матросов А. В. Марle 6. Решение задач высшей математики и механики. СПб. : БХВ-Петербург, 2001.

12. Богданов С. Н., Бурцев С. И., Иванов О. П., Куприянова А. В. Холодильная техника. Кондиционирование воздуха. Свойства веществ : справ. / под ред. С. Н. Богданова. 4-е изд., перераб. и доп. СПб. : СПбГАХПТ, 1999. 320 с.

13. Улитин В. В. Метод элементарных объемов при моделировании замораживания и оттаивания грунтов // Актуальные проблемы ... : материалы IX научнотехнич. конф. СПб. : СПбГУНТиПТ, 2003. С. 4–9.

Refrences

1. Archarov A. M., Kunis I. D. Cryogenic fueling system launching rocket-space systems. Moscow, BMSTU Publ., BMSTU, 2006. 256 p.

2. Romanov A. V. Theory integrated design optimization of spacecraft with nuclear power plants termoèmissionnymi. Spb., OOO NPO "Professional", 2010. 474 p. (InRuss.)

3. Krushenko G. G., Golovanova V.V. [The safety of transportion the nuclear energy installition of a vehicle]. Safetyandemergencies. 2014. no 6, p. 63-67. (InRuss.)

4. Materials of the international scientificallypractical Conference on permafrost engineering devoted to the 20TH anniversary of the NPO «Fundamentstrojarkos», Tyumen,City Press Publ., 2011. 456 p. (InRuss.)

5. Bezrodny M. K., Volkov S. S., Moklyak V. F. Two-phase thermosyphon in industrial engineering. Kiev, VyschaSch. Publ., 1991. 75 p. (InRuss.)

6. Ananiev V. V. [Available heat exchanging capacity of seasonal cooling devices. Condenser.]. *Materialy XVI Mezhdunar. nauch. konf.* "*Reshetnevskiechteniya*" [Materials XVI Intern. Scientific. Conf. "Reshetnev reading"]. Krasnoyarsk, 2012, p. 45–46. (In Russ.)

7. Kutateladze S. S. [Foundations of the theory of heat transfer]. Novosibirsk, Nauka Publ., Siberian Branch., 1970, 659 p.(In Russ.)

8. Bogdanov N. A., Buchko E. I. Gujgo etc. [Theoretical basis of Refrigeration. Part II. Heat and mass transfer.], S. N. Ed. E. I. Gujgo. Moscow, KolosPubl, 1994. 367 p. (In Russ.)

9. Idel'čik I. E. [Handbook of the hydraulic resistances. Ed. M. O. Štejnberg. 3 ed., revised. and extras.], Moscow, Mashinostroenie Publ., 1992, 672 p. (In Russ.)

10. Lojcânskij I. G., Lurie A.I. [Course of theoretical mechanics: in two volumes. T II, Dynamics], Moscow, NaukaPubl, 1983, 640 p. (In Russ.)

11. Matrosov A. V. [Maple 6. Solution of problems of higher mathematics and mechanics.], Spb., BHV Publ., Peterburg, 2001. (In Russ.)

12. Bogdanov S. N., Burtsev S. I., Ivanov O. P., KupriyanovaA.V. [Refrigeration. Air conditioning. Properties. Handbook.] Ed. S.N.Bogdanov., 4 ed., revised. andextras., St. Petersburg, St. Petersburg GAHPT Publ., 1999. 320 p. (InRuss.)

13. Ulitin V. V. [Method of elementary volumes when modeling the freezing and thawing soils.] Actual problems ...: proceedings of the 9TH scientific-technical conference., St. Petersburg, SPbGUNTiPT Publ., 2003. p. 4–9. (InRuss.)

© Ананьев В. В., 2015

УДК 629.78

ТРАНСФОРМИРУЕМАЯ ШТАНГА КРУПНОГАБАРИТНОГО РЕФЛЕКТОРА

Е. О. Андреева, А. Ф. Блинов, В. Г. Гиммельман, Я. Ю. Федоров^{*}, С. С. Щесняк

ОАО «Научный центр прикладной электродинамики»

Российская Федерация, 190103, г. Санкт-Петербург, Рижский просп., 26

*E-mail: yan.fedorov@scaegroup.com

Представлена трансформируемая штанга, которая способна переместить крупногабаритный рефлектор в заданное положение относительно космического annapama.

Ключевые слова: трансформируемая штанга, рефлектор, трансформируемая структура.

DEPLOYABLE MAST FOR OVERSIZED REFLECTOR

E. O. Andreeva, A. F. Blinov, V. G. Gimmelman, Y. Y. Fedorov^{*}, S. S. Shchesniak

JSC "Scientific center of applied electrodynamics" 26, Rizhskiy Av., Saint-Petersburg, 190103, Russian Federation *E-mail: yan.fedorov@scaegroup.com

The research deals with deployable mast which can remove large reflector to requested point regarding to the spacecraft.

Keywords: transformable mast, reflector, deployable structure.

С развитием космической техники все чаще возникает потребность при развертывании систем в космосе обеспечить перемещение аппаратуры на значительное расстояние от космического аппарата (КА). В частности, при создании развертываемой в космосе антенной системы с рефлектором диаметром 48 м требуется обеспечить его удаление на 31 метр от космического аппарата, на котором располагается облучатель.

Эта задача должна решаться с помощью штанги, имеющей в сложенном состоянии габариты, позволяющие разместить ее на КА под обтекателем, а в развернутом – обеспечить необходимое отстояние от КА закрепленного на ее конце рефлектора (рис. 1). Штанга состоит из трансформируемого каркаса, представляющего собой стержневую конструкцию, образующую в развернутом положении 32 секции, каждая в виде параллелепипеда с диагональными стержнями на боковых сторонах, привода развертывания трансформируемого каркаса, концевого и корневого механизмов, обеспечивающих необходимое угловое положение рефлектора относительно космического аппарата в процессе развертывания антенной системы и корпуса, объединяющего остальные элементы штанги.

Продольные стержни каждой секции имеют возможность складываться (рис. 2).