

УДК 536.248.2:629

В.А. ТАРАСОВА

Институт проблем машиностроения им. А.Н. Подгорного НАН Украины, Украина

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТЕЧЕНИЯ ДВУХФАЗНОГО ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ ЧЕРЕЗ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТУЮ СТРУКТУРУ ИСПАРИТЕЛЯ КОНТУРНОЙ ТЕПЛОВОЙ ТРУБЫ

Предложена математическая модель процесса тепломассообмена в капиллярно-пористой структуре (КС) испарителя контурной тепловой трубы (КТТ), позволяющая определять: необходимое время для установления стационарного режима работы объекта; наиболее эффективные структурные, теплофизические, геометрические характеристики КС; предельно-допустимые условия работы КТТ. Она позволяет более просто решить ряд некоторых важных задач, таких как: одномерные течения с фазовым переходом, совместные одно- и двухфазные течения в одной области. Значительным преимуществом предложенной модели является то, что ее использование позволяет выделить влияние отдельных фаз, не смотря на то, что дифференциальные уравнения рассматриваемой модели предполагают только общее поведение смеси двух фаз и твердого каркаса. Путем задания начальных и граничных условий, в соответствии с поставленной задачей исследования, возможно расширять диапазон применения представленной модели для описания процессов происходящих при сушке строительных материалов, пищевых продуктов.

Ключевые слова: капиллярно-пористая структура, двухфазный теплоноситель, контурная тепловая труба, объемная энтальпия, капиллярное давление.

Введение

В ряде случаев для контурных тепловых труб характерна работа в режиме частичного насыщения КС жидкой фазой, особенно при функционировании в условиях воздействия массовых сил. При этом коэффициент проницаемости и площадь проницаемого сечения становятся функциями степени насыщения КС. Однако данное явление практически не учитывается в существующих гидродинамических моделях, имеются лишь отдельные рекомендации по определению площади проницаемого сечения.

Целью данной работы является создание методики решения задач тепломассопереноса при движении двухфазного теплоносителя в капиллярно-пористых структурах и решение задач тепломассопереноса в различных устройствах промышленного назначения и при реализации сложных технологических процессов на основе математического моделирования.

1. Математическая модель процесса тепломассообмена в капиллярно- пористой структуре

Предложенная математическая модель процесса теплообмена в капиллярно-пористой структуре контурной тепловой трубы (КТТ) в двухмерной по-

становке учитывает как испарительный режим работы КТТ, при котором температура рабочего тела не превышает температуру начала кипения $T_{нк}$ [1], так и режим работы, при котором рабочая жидкость нагревается до температуры, превышающей температуру $T_{нк}$. За основу взята модель смешанного течения [2], которая получена путем алгебраических преобразований из традиционной модели независимого движения фаз (НДФ), дополнена и адаптирована к условиям работы КТТ, а именно:

1) при отсутствии внешних массовых источников выполняется условие

$$m_{ж} + m_{п} = 0,$$

где $m_{ж}$, $m_{п}$ — объемные источники масс жидкости и пара, которые возникают вследствие фазового перехода, и определяются из дифференциальных уравнений, описывающих принцип сохранения массы, для двух фаз:

$$\rho_{ж} \left[\Pi \frac{\partial s}{\partial \tau} + \nabla \cdot u_{ж} \right] = m_{ж};$$

$$\rho_{п} \left[\Pi \frac{\partial (1-s)}{\partial \tau} + \nabla \cdot u_{п} \right] = m_{п},$$

где s — степень насыщения КС жидкой фазой; $\rho_{ж}$, $\rho_{п}$ — плотности жидкости и пара; $u_{ж}$, $u_{п}$ — векторная скорость Дарси жидкой и паровой фазы;

2) в связи с тем, что коэффициент теплоотдачи от капиллярной структуры к жидкости, находящейся внутри нее, является малой величиной ($\alpha < 1$) [3] принято равенство температур КС и двухфазной жидкости ($T_{ж.} = T_{п.} = T_c$). Следовательно, в однофазной среде теплота будет передаваться от КС к жидкости с помощью механизма теплопроводности (при этом используется эффективный коэффициент теплопроводности $\lambda_{эф}$), и с помощью капиллярной диффузии, вызванной силой поверхностного натяжения. Это допущение упрощает метод решения, т.к. позволяет обойти математические сложности, связанные с неопределенностью структуры двухфазного потока.

3) для составления математической модели двухфазного течения в капиллярно-пористой среде приняты некоторых соотношений для осредненных свойств парожидкостной среды, представляющей смесь жидкости и пара. Так плотность и скорость двухфазного потока определяются как:

$$\rho = \rho_{ж}s + \rho_{п}(1-s);$$

$$u = \frac{\rho_{ж}u_{ж} + \rho_{п}u_{п}}{\rho}.$$

Математическая модель процессов процесса теплообмена в капиллярно-пористой структуре представлена в нестационарной постановке, что позволяет определять необходимое время для установления стационарного режима работы объекта с капиллярно-пористой структурой, позволяет определять наиболее эффективные геометрические характеристики КС и пароотводящих каналов, определять предельно-допустимые условия работы КТТ.

Математическая модель процесса теплообмена в капиллярно-пористой структуре КТТ с фазовым переходом представлена следующими дифференциальными уравнениями:

1. Уравнение сохранения энергии:

$$\Omega \frac{\partial H}{\partial \tau} + \nabla(\gamma_h u H) = \nabla(\Gamma_h \nabla H) + \nabla \left(f(s) \frac{K \Delta \rho c}{v_{п}} g \right), \quad (1)$$

где H – объемная энтальпия, которая определяется следующим образом:

$$H = \rho(i - i_{пнас}),$$

где Π – пористость КС, K – абсолютная проницаемость КС, $i_{пнас}$ – энтальпия пара на линии насыщения.

Первый член уравнения сохранения энергии учитывает нестационарность процесса (коэффициент Ω является функцией пористости Π).

Второй – перенос теплового потока конвекцией (коэффициент $\gamma_h = f(s)$).

Третий член уравнения (1) учитывает перенос теплоты капиллярной диффузией и теплопроводностью через капиллярную структуру, в которой коэффициент Γ_h равен:

$$\Gamma_h = D + \lambda_{эф} \frac{dT}{dH},$$

где $\lambda_{эф}$ – эффективный коэффициент теплопроводности системы, D – коэффициент капиллярной диффузии, $\frac{dT}{dH}$ – производная температуры по H .

Четвертый член уравнения учитывает влияние сил гравитации на течение среды в КС.

Дифференциальное уравнение (1) будет преобразовываться в уравнения для однофазной (жидкость или пар) и двухфазной среды в зависимости от значения температуры и насыщенности. В этом случае зависимость температуры от энтальпии принимает вид:

$$- \text{при } H \leq -\rho_{ж}g$$

$$T = \frac{H + \rho_{ж}i_{пнас}}{\rho_{ж}c_{ж}};$$

$$- \text{при } -\rho_{ж}g < H \leq 0$$

$$T = T_{нас} 4$$

$$- \text{при } 0 < H$$

$$T = T_{нас} + \frac{H}{\rho_{п}c_{п}},$$

а зависимость s от H выражается так:

$$- \text{при } H \leq -\rho_{ж}g$$

$$s = 1;$$

$$- \text{при } -\rho_{ж}g < H \leq 0,$$

$$s = \frac{H}{-\rho_{ж}g};$$

$$- \text{при } 0 < H$$

$$s = 0,$$

где g – скрытая теплота парообразования.

2. Уравнение движения.

Для нахождения поля осредненного давления рабочей среды уравнение движения имеет вид, близкий к уравнению Пуассона:

$$\nabla^2 p = \frac{v(s)}{K} \left[\Pi \frac{\partial p}{\partial \tau} - \nabla p \cdot \nabla \left(\frac{K}{v(s)} \right) + \left(\frac{K}{v(s)} \rho_k g \right) \right], \quad (2)$$

где $v(s)$ – средняя кинематическая вязкость двухфазной среды.

Для решения системы уравнений (1, 2) и крайних условий, применен метод конечных элементов в сочетании с методом Галеркина.

2. Исследования влияния структурных характеристик пористой среды на процессы в КС КТТ

Для исследования влияния структурных характеристик пористой среды на процесс тепломассопереноса в КС был выбран элемент испарителя контурной тепловой трубы со следующими размерами: $a=2$ мм, $b=4$ мм, $h=5$ мм (рис. 1). Область исследования разбивалась на треугольные симплекс-элементы, с учетом необходимости выбора правильного шага сеточного разбиения и соответствующего ему шагу по времени.

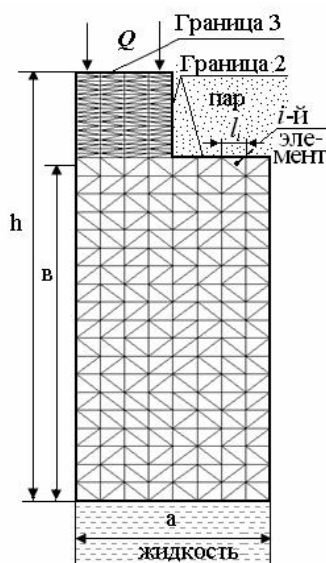


Рис. 1. Элемент испарителя КТТ.

Для исследования влияния на работоспособность испарителя КТТ структурных характеристик пористого материала были проведены численные эксперименты с применением характеристик металлов, полученных Л. Грином, Р. Дувецом, Ю.П. Кукотой, В.М. Слепцовым [4].

Временной шаг, количество шагов при расчете, а также начальные условия были заданы следующим образом: при $t_0=0$ $T_0=29^\circ\text{C}$, $P_0=1,1675$ МПа, $\Delta t=0,6$ сек, кол-во шагов по времени $N = 1000$.

Теплоноситель-аммиак с температурой насыщения $T_s=30,28^\circ\text{C}$, и давлением насыщения $P_s=1,17$ МПа.

Граничные условия заданы так:

на границе 1: $P = P_{ж} = 1,1675$ МПа, $T = T_{ж} = 20^\circ\text{C}$;

на границе 2: $p_i = f(Q, s)$;

на границе 3: $Q = 100 \div 800$ Вт.

При задании граничных условий на границе 3 для каждого образца подбирался максимальный тепловой поток, при котором на выходе из КС (граница 2) насыщенность $s = 0$, т.е. капиллярное давление

для данного образца достигало максимального значения.

В табл. 1 приведены результаты расчетов, проведенных с разными пористыми металлами, такие как: тепловой поток Q , при котором создается максимальное капиллярное давление, величина максимального капиллярного давления P_c , потери давления в пористой структуре ΔP , максимальная скорость пара $u_{\max}$ на выходе из КС.

Таблица 1

Результаты исследований процесса тепловлагопереноса в испарителе КТТ, выполненного из разных пористых металлов

№	Q, Вт	Материал КС, П	K, м ²	P _c , кПа	ΔP, кПа	u _{max} , м/с
1	680	Коррозионностойкая сталь, П=0,256	$6 \cdot 10^{-14}$	22	13	0,13
2	670	Железо, П=0,327	$2 \cdot 10^{-13}$	15	4,25	0,1
3	370	Сталь 20Х23Р18, П=0,624	$5 \cdot 10^{-12}$	4	0,78	0,03

Анализ результатов показывает, что капиллярные структуры с меньшей проницаемостью могут создавать больший капиллярный напор, но и имеют более высокие потери давления по сравнению с металлами с большим коэффициентом проницаемости.

Для определения пределов работоспособности тепловой трубы были рассчитаны потери давления по всему контуру КТТ в зависимости от теплового потока на границе 3 при использовании в качестве материала КС образцов № 1, 2, 3, (табл. 1), которые состоят из: сопротивления пароотводящих каналов, паропровода, конденсатора, конденсатопровода. Видно, что предельный максимальный тепловой поток $Q \approx 670 \div 680$ Вт, при котором возможна работа КТТ, реализуется при использовании капиллярных структур, изготовленных из пористых металлов №1 и №2. Однако КС, изготовленная из пористого металла №2 предпочтительнее, несмотря на то, что она при большей проницаемости и пористости создает меньший капиллярный напор P_c , чем пористая структура №1, так как суммарные потери в контуре КТТ меньше.

Заключение

Была предложена математическая модель нестационарного течения двухфазного теплоносителя через капиллярно-пористую среду для исследования процессов тепломассообмена, происходящих в ис-

парителе КТТ, для решения которой применен метод конечных элементов в сочетании с методом Галеркина. Проведено исследование влияния структурных характеристик капиллярной структуры на работоспособность испарителя КТТ и контурной тепловой трубы в целом.

Литература

1. Ковалев С.А. Испарение и конденсация в тепловых трубах / С.А. Ковалев, С.Л. Соловьев. – М.: Наука, 1989. – 111 с.

2. Wang C.Y. A two- phase mixture model of liquid- gas flow and heat transfer in capillary porous media-1. Formulation / C.Y. Wang, C. Beckermann // *Int. J. Heat Mass Transfer.* – 1993. – 36, № 11. – P. 2747-2758.

3. Тарасова В.А. Моделирование тепломассообмена в испарителе двухфазного контура с капиллярным насосом / В.А. Тарасова // *Проблемы машиностроения.* – 2000. – Т. 3, № 1-2. – С. 123-128.

4. Белов С.В. Пористые металлы в машиностроении. 2-е изд. перераб. и доп. / С.В. Белов. – М.: Машиностроение, 1981. – 247 с.

Поступила в редакцию 1.04.2008

Рецензент: д-р техн. наук, проф. зав. каф. А.Ю. Соколов, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПЛІНИ ДВОФАЗНОГО ТЕПЛОНОСІЯ ЧЕРЕЗ КАПІЛЯРНО-ПОРИСТУ СТРУКТУРУ ВИПАРНИКА КОНТУРНОЇ ТЕПЛОВОЇ ТРУБИ

В.О. Тарасова

Запропоновано математичну модель процесу тепломасообміну в капілярно-пористій структурі (КС) випарника контурної теплової труби (КТТ), що дозволяє визначати: необхідний час для встановлення стаціонарного режиму роботи об'єкта; найбільш ефективні структурні, теплофізичні, геометричні характеристики КС; гранично-припустимі умови роботи КТТ. Вона дозволяє більш просто вирішити ряд деяких важливих завдань, таких як: одномірні плинні з фазовим переходом, спільні одне- і двофазні плинні в одній області. Значною перевагою запропонованої моделі є те, що її використання дозволяє виділити вплив окремих фаз, незважаючи на те, що диференціальні рівняння розглянутої моделі припускають тільки загальне поведіння суміші двох фаз і твердого каркаса. Шляхом завдання початкових і граничних умов, відповідно до поставленого завдання дослідження, можливо розширювати діапазон застосування представленої моделі для опису процесів будівельних матеріалів, харчових продуктів, що відбуваються при сушінні.

Ключові слова: капілярно-пориста структура, двофазний теплоносій, контурна тепла труба, об'ємна ентальпія, капілярний тиск.

THE MATHEMATICAL MODEL OF FLUXION OF TWO-PHASE HEAT-TRANSFER AGENT THROUGH A CAPILLARY- POROUS STRUCTURE OF THE EVAPORATOR OF CAPILLARY PUMP LOOP

V.A. Tarasova

The mathematical model of heat- mass transfer processes in capillary- porous structure of the evaporator of the capillary pump loop (CPL) is offered, allowing defining: necessary time for an establishment of a steady-state condition of operation of object; the most effective structural, geometrical properties of capillary- porous structure; maximum-permissible operating conditions of CPL. It allows to solve easier a series of some important problems, such as: the one-dimensional fluxions with phase change, joint one and two-phase fluxions in one area. The considerable advantage of the suggested model is that its use allows to allocate agency of separate phases, not looking that differential equations of a viewed model guess only general behavior of a blend of two phases and a solid framework. By the task initial and boundary conditions, according to a problem in view of probe, it is possible to dilate a range of application of the presented model for the description of processes of building materials occurring at drying, foodstuff.

Key words: a capillary- porous structure, two-phase heat-transfer agent, a capillary pump loop, a volumetric enthalpy, a capillary pressure.

Тарасова Вікторія Александровна – ведучий інженер, Інститут проблем машиностроєння ім. А.Н. Подгорного НАН України, Харків, e-mail: Paramonova@ipmach.kharkov.ua.