

ИСПАРЕНИЕ ПЕРЕГРЕТЫХ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ ОСЕСИММЕТРИЧНЫХ КАНАЛОВ С УБЫВАЮЩИМ РАДИУСОМ

Рассмотрены принципиально возможные формы каналов диффузорного типа, что является необходимым этапом в практическом применении полученных ранее в общем виде решений задач об испарении жидкостей из капилляров переменного радиуса. Найдены аналитические выражения, позволяющие оценивать интенсивность массообмена в различных фазах испарения жидкостей из капиллярных систем известной структуры. Предложен подход к расчету скорости удаления влаги из реальных капиллярно-пористых тел, основанный на применении модели элементарного цилиндрического капилляра с последующим введением поправок на структурные особенности соответствующих материалов.

Важнейшим средством интенсификации массообменных процессов в дисперсных и пористых средах является повышение их температуры, что актуально для многих областей научно-производственной деятельности человека, таких, как энергетика, химическая промышленность, теплотехника, пищевая промышленность, сушильное производство. Существенную роль в этих процессах играет исключительно сложная геометрия порового пространства во всем ее многообразии.

Моделирование структуры капиллярно-пористых тел в виде одиночного цилиндрического капилляра было предложено в свое время академиком А.В. Лыковым [1]. Подход оказался на редкость эффективным и плодотворным, так как допускал непосредственное сопоставление результатов теории и эксперимента. Очевидно, что при всех достоинствах этой модели все многообразие структурных особенностей реальных объектов она не охватывает.

В работах Н.И. Гамаюнова, Л.А. Уваровой, В.Л. Малышева, А.А. Ланкова, А.С. Фельдблума [2; 3] были впервые предприняты попытки описания процесса массопереноса при фазовых переходах I рода в капиллярах видоизменяющейся формы в общем виде, что явилось необходимым шагом в изучении массообмена в реальных пористых системах. Однако общая постановка задачи содержит в себе важный недостаток, связанный с тем, что для численного интегрирования полученных выражений требуется знание конкретной функциональной связи между радиусом канала и положением мениска испаряющейся жидкости, зависящей от формы капилляров и характера структурных видоизменений материала.

Актуальность работы заключается, прежде всего, в обращении к наименее исследованной как в стране, так и за рубежом стороне массообменных процессов, относящейся к изучению существующих структурных разновидностей твердого каркаса капиллярно-пористых тел в плане их влияния на интенсивность удаления влаги.

Как известно, при перегреве жидкостей сверх точки кипения в микрообъемах капилляров (при должной очистке от примесей и дегазировании) вскипания не происходит [4], а течение паров соответствует вязкому режиму [5]:

$$M = \frac{r^2(P_S^2 - P_0^2)}{16\eta RTl}, \quad (1)$$

где M – молярная плотность потока пара, r – радиус канала, P_S – давление насыщенного пара при температуре термостатирования T , P_0 – давление окружающей среды, η – коэффициент динамической вязкости, R – универсальная газовая постоянная, l – расстояние от устья канала ($x = 0$) до мениска, поверхность которого полагается практически плоской [6].

Эксперименты показывают, что даже в этих условиях характерное время испарения жидкости значительно больше времени диффузионной релаксации [7; 8], что позволяет воспользоваться квазистационарным подходом, полагая, что любое положение мениска можно считать установившимся [9].

Согласно закону сохранения массы скорость движения мениска зависит от количества испарившейся жидкости:

$$\frac{dl}{dt} = M \frac{\mu}{\rho}, \quad (2)$$

где μ – молярная масса молекул пара, ρ – плотность испаряющейся жидкости.

Рассмотрим влияние на интенсивность парообразования наличия сужения канала от поверхности вглубь материала (рис. 1). Для характеристики измененный радиуса капилляра вводится безразмерный параметр $b = \frac{dr}{dx}$, называемый конусностью [3]. Отличия между разновидностями капилляров определяются неодинаковой кривизной стенок $k = \frac{db}{dx}$ вдоль оси x (рис. 1).

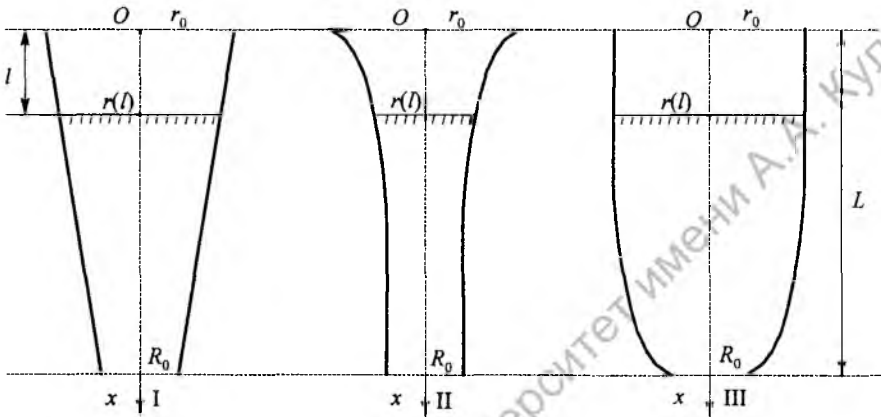


Рис. 1. Особенности строения каналов диффузорного типа ($b < 0$)
 Кривизна стенок: I – отсутствует ($k = 0$); II – убывает ($k < 0$); III – возрастает ($k > 0$).
 L – длина канала, r_0 – начальный и R_0 – конечный радиусы, $r(x)$ – переменный радиус
 испаряющей поверхности, x – продольная координата

Законы изменения радиусов каналов I-III задаются выражениями (3) – (5), соответственно:

$$r(z) = r_0 [1 + (a - 1)z], \tag{3}$$

$$r(z) = r_0 a^z, \tag{4}$$

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + (a^2 - 1)z}. \tag{5}$$

С целью обобщения выводов теории на капилляры произвольной длины зависимости радиусов каналов от положения межфазной поверхности выражаются через относительную координату мениска $z = l/L$.

Безразмерный параметр a определяет отношения предельных радиусов R_0/r_0 , поэтому для сужающихся каналов – $a < 1$.

Подстановка (3) – (5) последовательно в (1), а затем и в (2) позволяет определять время испарения из любых сужающихся осесимметричных каналов.

Разделение переменных приводит (2) к виду:

$$I: \quad \frac{zdz}{[1 + (a - 1)z]^2} = \frac{C}{L^2} dt, \tag{6}$$

$$\text{II:} \quad \frac{zdz}{a^{2z}} = \frac{C}{L^2} dt, \quad (7)$$

$$\text{III:} \quad \frac{zdz}{[1+(a^2-1)z]} = \frac{C}{L^2} dt, \quad (8)$$

$$\text{где} \quad C = \frac{r_0^2 (P_s^2 - P_0) \mu}{16\eta RT\rho}. \quad (9)$$

Эта величина в условиях термостатирования называется постоянной испарения и имеет физический смысл и размерность коэффициента переноса.

Для сравнения, в цилиндрическом канале радиуса r_0 выражение скорости испарения после разделения переменных может быть представлено в виде

$$zdz = \frac{C}{L^2} dt. \quad (10)$$

Решение (10), как известно, имеет вид

$$\int_{z_1}^{z_2} z dz = \frac{z^2}{2} \Big|_{z_1}^{z_2}. \quad (11)$$

Интегрирование левой части уравнений (6) – (8) дает (11) – (13), соответственно:

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{zdz}{[1+(a-1)z]^2} = \frac{\ln|1+(a-1)z| \cdot [1+(a-1)z] + 1}{(a-1)^2 [1+(a-1)z]} \Big|_{z_1}^{z_2}, \quad (12)$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{zdz}{a^{2z}} = \frac{(-1)(2z \ln a + 1)}{4a^{2z} \ln^2 a} \Big|_{z_1}^{z_2}, \quad (13)$$

$$\int_{z_1}^{z_2} \frac{zdz}{[1+(a^2-1)z]} = \frac{[(a^2-1)z - \ln|1+(a^2-1)z| + 1]}{(a^2-1)^2} \Big|_{z_1}^{z_2}. \quad (14)$$

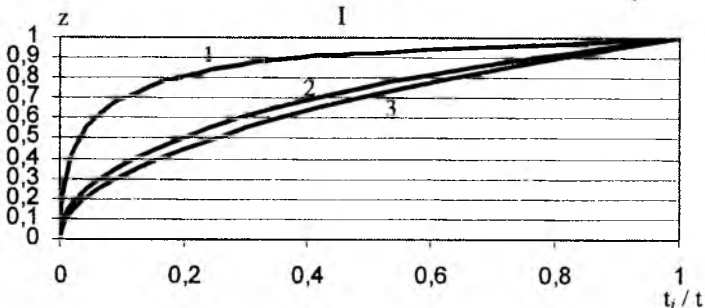


Рис. 2. Положение координаты мениска в зависимости от относительного времени испарения жидкости из канала I
1 – $a = 0,1$, 2 – $a = 0,7$, 3 – $a = 0,99$

Полученные выражения (12) – (14) позволяют вычислять скорость движения межфазной поверхности в процессе парообразования (см. рис. 2).

Время испарения жидкостей на отдельных участках капилляра удобно рассматривать по отношению к полному времени осушения канала, которое соответствует перемещению мениска в пределах от $z_1 = 0$ (устье) до $z_2 = 1$ (дно).

Полное время испарения определяется для капилляров типа I – III соотношениями:

$$\text{I:} \quad \frac{(\ln a + a^{-1} - 1)}{(a - 1)^2} = \frac{Ct}{L^2}, \quad (15)$$

$$\text{II:} \quad \frac{[1 - a^{-2}(2 \ln a + 1)]}{4 \ln^2 a} = \frac{Ct}{L^2}, \quad (16)$$

$$\text{III:} \quad \frac{(a^2 - \ln a^2 - 1)}{(a^2 - 1)^2} = \frac{Ct}{L^2}. \quad (17)$$

Важную информацию о характере удаления влаги при испарении из капиллярно-пористых материалов содержит распределение времени выноса пара по длине канала. Построенная в настоящей работе теория позволяет анализировать ход массопереноса на различных этапах процесса.

Относительное время испарения $\Delta t_i/t$ на каждом участке капилляра Δz_i вычисляется делением выражений (12) на (15) (I), (13) на (16) (II), (14) на (17) (III) (рис. 3).

Полученные результаты позволяют также оценить время испарения из сужающихся капилляров любого типа (Δt_1 , Δt_2 , Δt_3) относительно времени испарения Δt_0 из цилиндрического капилляра соответствующего сечения на устье:

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = \frac{2(\ln a + a^{-1} - 1)}{(a - 1)^2}, \quad (18)$$

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_0} = \frac{[1 - a^{-2}(2 \ln a + 1)]}{2 \ln^2 a}, \quad (19)$$

$$\frac{\Delta t_3}{\Delta t_0} = \frac{2(a^2 - \ln a^2 - 1)}{(a^2 - 1)^2}. \quad (20)$$

Как показывают проведенные расчеты (табл.), выполненные на основе (18) – (20), время испарения из каналов диффузорного типа ($a < 1$) оказывается больше, чем из капилляра с постоянным радиусом r_0 , причем отличия уменьшаются с ростом параметра a , так как при $a \rightarrow 1$ форма конического канала приближается к цилиндрической (рис. 4), и отличия в характере испарения исчезают.

Наиболее медленно парообразование происходит в капиллярах, форма которых определяется моделью II, в то время как канал параболического типа (III) ближе всего соответствует по форме, а значит и по времени испарения цилиндрическим системам (см. табл.).

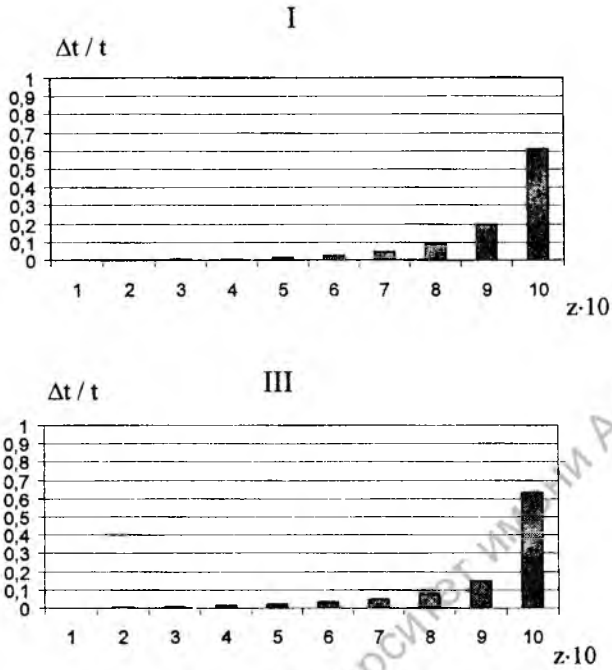


Рис. 3. Распределение относительного времени испарения по длине капилляра в сужающихся каналах I, III

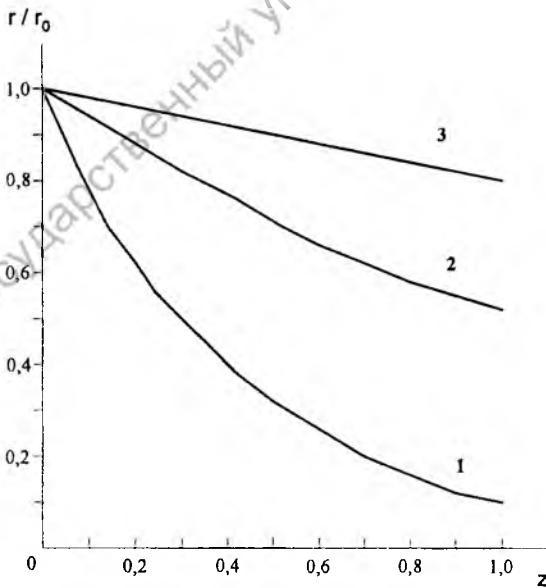


Рис. 4. Влияние параметра a на форму канала II: 1 - $a = 0,1$; 2 - $a = 0,5$; 3 - $a = 0,9$

Как следует из полученных аналитических выражений (18) – (20), наиболее существенно влияние формы каналов на интенсивность массообменных процессов должно проявляться при относительных радиусах $a < 0,5$.

**Полное время испарения из капилляров
с убывающим радиусом ($0 < a < 1$) по отношению ко времени испарения
из цилиндрического канала ($a = 1$)**

Тип канала	a									
	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	0,99
I	16,54	7,47	4,61	3,20	2,45	1,95	1,59	1,34	1,15	1,00
II	34,09	10,90	5,74	3,69	2,63	2,03	1,63	1,35	1,15	1,02
III	7,38	4,90	3,62	2,81	2,26	1,86	1,56	1,33	1,15	1,00

Выводы

1. Проведена систематизация различных типов каналов по признакам, определяемым совокупностью предложенных параметров (a, b, k).
2. Рассмотрены принципиально возможные формы каналов диффузорного типа, что является необходимым этапом в практическом применении полученных ранее в общем виде решений задач об испарении жидкостей из капилляров переменного радиуса (3) – (5).
3. Полученные теоретические выражения могут быть использованы в качестве основы для расчета скорости испарения жидкостей из капилляров заданной формы (12) – (14).
4. Найдены аналитические выражения, позволяющие оценивать интенсивность массообмена в различных фазах испарения жидкостей из капиллярных систем известной структуры (6) – (8), (15) – (17).
5. Предложен метод расчета скорости удаления влаги из реальных капиллярно-пористых тел, основанный на применении модели элементарного цилиндрического капилляра с последующим введением поправок на структурные особенности соответствующих материалов (18) – (20).

ЛИТЕРАТУРА

1. **Лыков, А.В.** Теория сушки / А.В. Лыков. – М.: Энергия, 1968. – 471 с.
2. **Гамаюнов, Н.И.** Испарение жидкостей из капилляров переменного сечения / Н.И. Гамаюнов [и др.] // ИФЖ. – 1984. – Т. 47. – № 4. – С. 647-651.
3. **Гамаюнов, Н.И.** Испарение жидкостей из капилляров переменного сечения в неоднородном температурном поле / Н.И. Гамаюнов, А.А. Ланков // ТВТ. – 1985. – Т. 23. – № 4. – С. 184-186.
4. К теории испарения жидкостей из капилляров при температуре, превышающей температуру кипения / М.Н. Гайдуков [и др.] // ЖТФ. – 1976. – Т. 46. – № 10. – С. 2142-2147.
5. **Ландау, Л.** Механика сплошных сред / Л. Ландау, Е. Лифшиц. – М.: Гостехиздат, 1954. – 765 с.
6. Температурная зависимость толщины полимолекулярных адсорбционных пленок воды на поверхности кварца / Г.Ф. Ершова [и др.] // Колл. журнал. – 1975. – Т. 37. – № 1. – С. 208-210.
7. **Малышев, В.Л.** Испарение перегретых жидкостей из тонких капилляров / В.Л. Малышев, Н.И. Гамаюнов // ТВТ. – 1984. – Т. 22. – № 1. – С. 184-186.
8. Охлаждение мениска в процессе высокотемпературного испарения жидкостей из капилляров / Н.И. Гамаюнов [и др.] // Пром. теплотехника. – 1986. – Т. 8. – № 2. – С. 49-53.
9. **Малышев, В.Л.** Неизотермические эффекты парообразования при перегреве жидкостей в капиллярах сверх точки кипения / В.Л. Малышев // ТВТ. – 1998. – Т. 36. – № 6. – С. 939-943.
10. Экспериментальное исследование высокотемпературного испарения жидкостей из капилляров / С.Н. Зотов [и др.] // ИФЖ. – 1978. – Т. 34. – № 6. – С. 1035-1039.