

ФИЗИКА

УДК 532.72:533.6.011

В. Л. Малышев, канд. физ.-мат. наук, доц.

ВЯЗКИЙ РЕЖИМ ИСПАРЕНИЯ ЖИДКОСТЕЙ ИЗ КАПИЛЛЯРОВ КОНФУЗОРНОГО ТИПА

Рассматривается влияние непостоянства поперечных размеров канала на характер массопереноса при фазовых переходах. Систематизированы возможные разновидности капилляров с изменяющимися радиусами в материалах пористой структуры. Впервые математически описаны основные виды капилляров конфузорного типа, что является шагом к практическому использованию известных общих решений задач парообразования в капиллярах переменного радиуса. В аналитическом виде получены выражения для длительности испарения жидкостей из капиллярных систем определенной структуры на последовательных его этапах.

Теория переноса жидкостей в пористых средах включает в себя наряду с чисто гидродинамическими задачами рассмотрение процессов физико-химического взаимодействия жидкостей с твердой и газовой фазами, изучение свойств жидкостей в граничных слоях под действием молекулярных сил, диффузию растворенных веществ, осмотические явления, капиллярные и термические эффекты. Состояние влаги в капиллярно-пористых телах влияет на такие важные процессы, как испарение, конденсация, промерзание, увлажнение, миграция жидкостей в поверхностных слоях.

Ранее были предприняты попытки описания процесса массопереноса при фазовых переходах первого рода в капиллярах изменяющейся формы в общем виде, что явилось необходимым шагом в изучении массообмена в реальных пористых системах. Однако общая постановка задачи содержит в себе существенный недостаток, т. к. для численного интегрирования полученных выражений требуется знание конкретной функциональной связи радиуса канала и положения мениска испаряющейся жидкости, зависящей от формы капилляров и характера структурных видоизменений материала.

До настоящего времени влияние

структурных разновидностей твердого каркаса капиллярно-пористых сред на интенсивность массопереноса в системе «жидкость – пар» ввиду их исключительного многообразия остается наименее исследованным.

Рассматривается капиллярно-пористое тело, полости которого на поверхности материала обладают меньшим поперечным размером, чем в объеме. Быстрота изменения радиуса капилляра вдоль оси x определяется таким параметром, как конусность [1]

$b = \frac{dr}{dx}$. Расширяющиеся вглубь мате-

риала каналы (рис. 1), очевидно, обладают положительной конусностью ($b > 0$), причем для модели I $b = const$. Отличие между различными видами конфузорных капилляров связано с неодинаковой кривизной стенок $\left(k = \frac{db}{dx}\right)$.

При наличии жесткого каркаса отличительной особенностью процесса удаления влаги из объектов с таким строением является постоянство расхода пара, обусловленное фиксированным радиусом r_0 устья ($x = 0$). Поскольку расход пара определяется произведением плотности молярного потока M и

площади испаряющей поверхности радиуса r ($x=l$), то по мере заглубления межфазной границы плотность потока

молекул жидкости убывает пропорционально росту площади сечения.

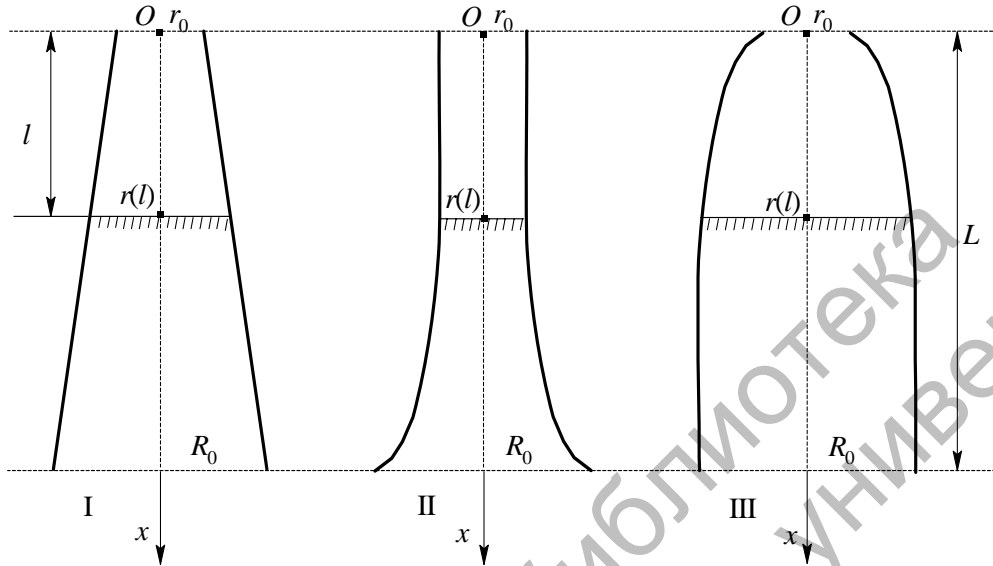


Рис.1. Каналы конфузорного типа ($a = \frac{R_0}{r_0} > 1$); кривизна стенок: тип I – отсутствует ($k = 0$); тип II – возрастает ($k > 0$); тип III – убывает ($k < 0$); R_0 – конечный радиус канала; L – длина канала

Если расход пара $Q = const$, где $Q = M\pi r^2$, то

$$M_y \pi r_0^2 = M\pi r^2. \quad (1)$$

Следовательно,

$$M = M_y \left(\frac{r_0}{r} \right)^2, \quad (2)$$

где M_y – плотность молярного потока пара на устье.

При перегреве жидкости в микрокапиллярах сверх точки кипения ($T > T_{кин}$) реализуется вязкий режим течения пара [2]:

$$M_y = \frac{r_0^2 (P_s^2 - P_0^2)}{16\eta RTl}, \quad (3)$$

где P_s – давление насыщенного пара испаряемой жидкости; P_0 – давление газовой среды; η – коэффициент динамической вязкости парогазовой смеси; R – универсальная газовая постоянная; T – температура жидкости и среды.

Выражение, определяющее скорость испарения, следует из закона сохранения массы:

$$\frac{dl}{dt} = M \frac{\mu}{\rho}, \quad (4)$$

где μ – молярная масса пара; ρ – плотность жидкости.

Подстановка (2) и (3) в (4) приводит к следующему выражению:

$$\frac{dl}{dt} = \frac{r_0^2 (P_s^2 - P_0^2)}{16\eta RTl} \cdot \frac{r_0^2}{r^2} \cdot \frac{\mu}{\rho}. \quad (5)$$

Вместо координаты мениска l удобно использовать относительную координату $z = \frac{l}{L}$, тогда (5) преобразуется в выражение

$$\frac{dz}{dt} = \frac{r_0^2(P_s^2 - P_0^2)\mu}{16\eta RTzL^2\rho} \cdot \frac{r_0^2}{r^2}. \quad (6)$$

Законы изменения радиуса поверхности испарения для капилляров типа I–III (см. рис. 1) могут быть заданы линейной, показательной или параболической функциями соответственно:

$$r(z) = r_0[1 + (a - 1)z]; \quad (7)$$

$$r(z) = r_0 a^z; \quad (8)$$

$$r(z) = r_0 \sqrt{1 + (a^2 - 1)z}. \quad (9)$$

По мере приближения параметра a к единице форма канала стремится к цилиндрической, что соответствует отсутствию конусности b и нулевой кривизне стенок k . Возрастание перепада между конечным R_0 и начальным r_0 радиусами ($a > 1$) ведет к росту b во всех типах капилляров. В то же время в каналах типа I (7) кривизна отсутствует ($k = 0$) на любом участке (линейный характер увеличения радиуса), типа II (8) – она возрастает сначала медленно, а затем быстрее ($k > 0$), типа III (9) – убывает ($k < 0$), причем только в конце капилляра ($z \rightarrow 1$) форма его стенок приближается к цилиндрической (рис. 2).

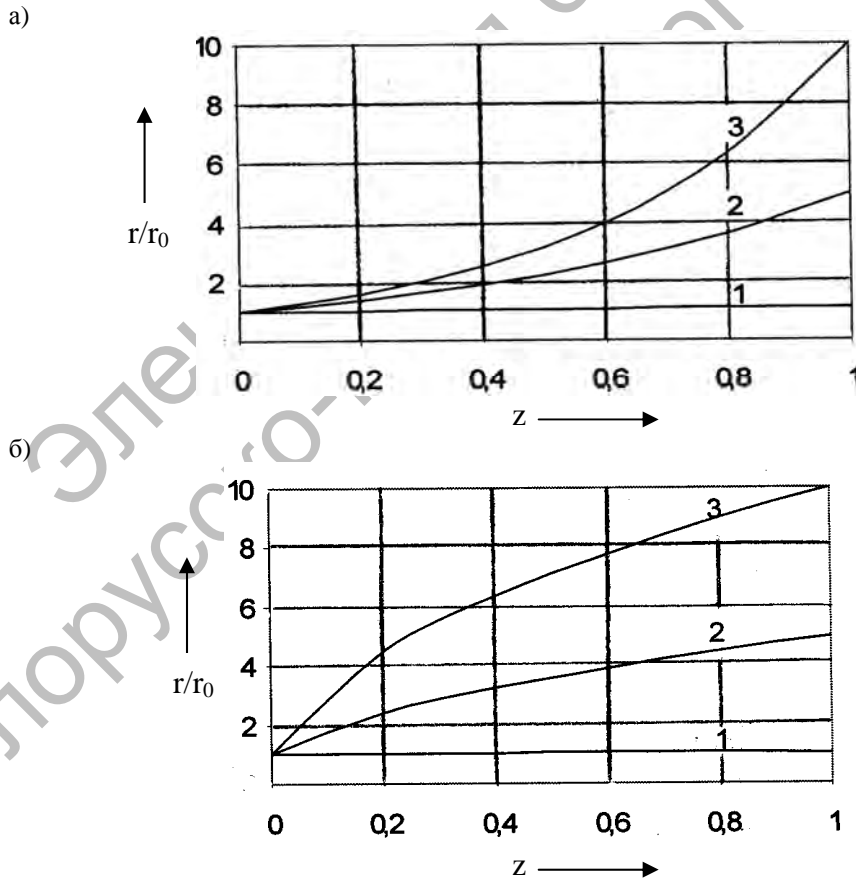


Рис. 2. Влияние отношения предельных радиусов a на форму каналов типа II (а) и III (б): $a = 1,1$ – кривая 1; $a = 5$ – кривая 2; $a = 10$ – кривая 3

С учетом (7)...(9) после разделения переменных получается соответственно:

– для типа I

$$\left[1 + (a - 1)z\right]^2 z dz = \frac{C}{L^2} dt; \quad (10)$$

– для типа II

$$a^{2z} z dz = \frac{C}{L^2} dt; \quad (11)$$

– для типа III

$$\left[1 + (a^2 - 1)z\right] z dz = \frac{C}{L^2} dt, \quad (12)$$

где

$$C = \frac{r_0^2 (P_s^2 - P_0^2) \mu}{16RT\eta\rho}. \quad (13)$$

Обозначенный в (13) через C коэффициент пропорциональности имеет физический смысл и размерность коэффициента переноса, называемого коэффициентом испарения. В изотермических условиях он соответствует величине, известной как постоянная испарения [3–5].

Скорость смещения мениска в процессе испарения для каждого типа капилляров определяется интегрированием (10)...(12):

– для типа I

$$\left[\frac{z^2}{2} + 2(a - 1)\frac{z^3}{3} + (a - 1)^2 \frac{z^4}{4}\right]_{z_1}^{z_2} = \frac{C}{L^2} \Delta t; \quad (14)$$

– для типа II

$$\frac{a^{2z}}{4 \ln a} \left(2z - \frac{1}{\ln a}\right) \Big|_{z_1}^{z_2} = \frac{C}{L^2} \Delta t; \quad (15)$$

– для типа III

$$\left[\frac{z^2}{2} + (a^2 - 1)\frac{z^3}{3}\right]_{z_1}^{z_2} = \frac{C}{L^2} \Delta t. \quad (16)$$

Для сравнения решение задачи об испарении из капилляра с постоянным радиусом r_0 имеет вид:

$$\frac{z^2}{2} \Big|_{z_1}^{z_2} = \frac{C}{L^2} \Delta t. \quad (17)$$

Время полного испарения ($0 \leq z \leq 1$) из каналов конфузорного типа (I–III) определяется следующими выражениями:

– для типа I

$$\left[\frac{(a - 1)^2}{4} + \frac{2(a - 1)}{3} + \frac{1}{2}\right] = \frac{C}{L^2} t; \quad (18)$$

– для типа II

$$\frac{1}{4 \ln a} \left[a^2 \left(2 - \frac{1}{\ln a}\right) + \frac{1}{\ln a} \right] = \frac{C}{L^2} t; \quad (19)$$

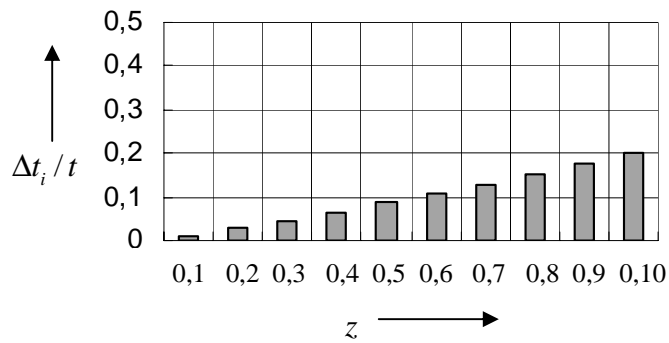
– для типа III

$$\left[\frac{(a^2 - 1)}{3} + \frac{1}{2}\right] = \frac{C}{L^2} t. \quad (20)$$

Сравнение длительности испарения на различных участках канала содержит в себе важную практическую информацию. Вклад каждого этапа парообразования определяется отношениями (14) и (18) – для типа I, (15) и (19) – для типа II, (16) и (20) – для типа III. Как оказалось, распределение относительного времени испарения по длине канала (рис. 3) наиболее существенно зависит от параметра a в капиллярах типа II. При малом отличии конечного и начального радиусов ($a = 1,1$) и форме канала, мало отличающейся от цилиндрической, длительность испарения возрастает с глубиной практически равномерно. В то же время значительный перепад между конечным и начальными радиусами в канале того же типа ($a = 10$) приводит к ускоренному массопереносу на первом этапе (около $0,4L$) и замедлению выноса пара на придонном участке до $0,45$ от времени полного осушения капилляра.

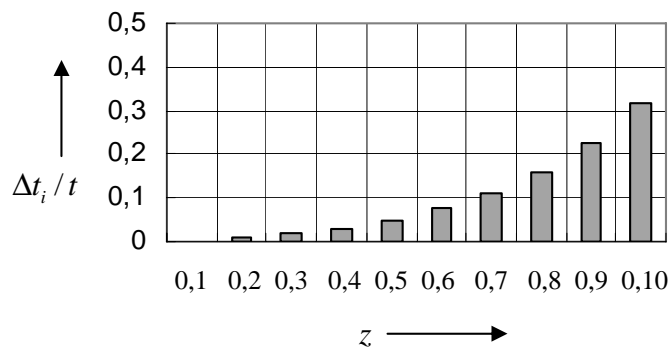
а)

$a = 1,1$



б)

$a = 3$



в)

$a = 10$

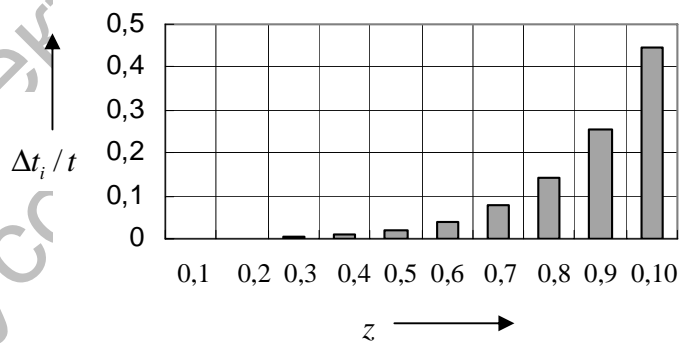


Рис. 3. Распределение относительного времени испарения по длине конфузормого капилляра типа II при различных a : Δt_i – интервалы времени смещения мениска в глубину на участках канала Δz_i ; t – полное время осушения канала данного типа

Возможность рассчитывать интенсивность массообмена в различных фазах процесса позволяет регулировать тепловую нагрузку на объект для достижения требуемого технологического эффекта при минимуме энергозатрат. Проведем далее сравнительный анализ времени испарения жидкостей из материалов с постоянными поперечными размерами пор (конфузорного типа) относительно времени испарения из цилиндрического капилляра радиуса r_0 , совпадающего с радиусом устья конического канала. Практическая значимость этих оценок для капилляров переменного сечения обусловлена возможностью относительно простого измерения радиуса устья r_0 , располагающегося на поверхности пористой структуры. Методика расчета скорости удаления влаги из цилиндрических систем отработана в достаточной степени [6–13]. Переход к расширяющейся вглубь капиллярно-пористого тела модели осуществляется с помощью формул (21)...(23) в зависимости от типа конусности (I–III):

– для типа I

$$\frac{\Delta t_1}{\Delta t_0} = \left[1 + \frac{4}{3}(a-1) + (a-1)^2 \frac{1}{2} \right]; \quad (21)$$

– для типа II

$$\frac{\Delta t_2}{\Delta t_0} = \frac{1}{2 \ln a} \left[2a^2 + \frac{1}{\ln a} (1 - a^2) \right]; \quad (22)$$

– для типа III

$$\frac{\Delta t_3}{\Delta t_0} = \left[1 + (a^2 - 1) \frac{2}{3} \right], \quad (23)$$

где $\Delta t_0, \Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3$ – полное время испарения из цилиндрического и конфузорных каналов типов I–III соответственно.

Как следует из табл. 1, наибольшее отличие по времени испарения от цилиндрических капилляров у каналов параболической формы (III). Различия в форме каналов для скорости испарения оказываются существенными при перепадах конечного и начального радиусов более чем в 2 раза ($a > 2$).

Табл. 1. Полное время испарения ($0 \leq z \leq 1$) жидкостей из жестких капилляров конфузорного типа относительно времени испарения из цилиндрического канала r_0 ($a = 1$)

Тип канала	a				
	1,01	1,1	1,5	2,0	5,0
I	1,013	1,138	1,792	2,833	14,333
II	1,013	1,137	1,748	2,649	10,901
III	1,013	1,140	1,833	3,000	17,000

Из трех возможных разновидностей конфузорных каналов наиболее зависимым от относительного радиуса a является процесс испарения из капилляров с положительной кривизной стенок $k > 0$ (рис. 4).

Таким образом, представленный подход позволяет решать практические задачи интенсивного массообмена во всех существующих капиллярно-пористых материалах с каналами конфузорного типа.

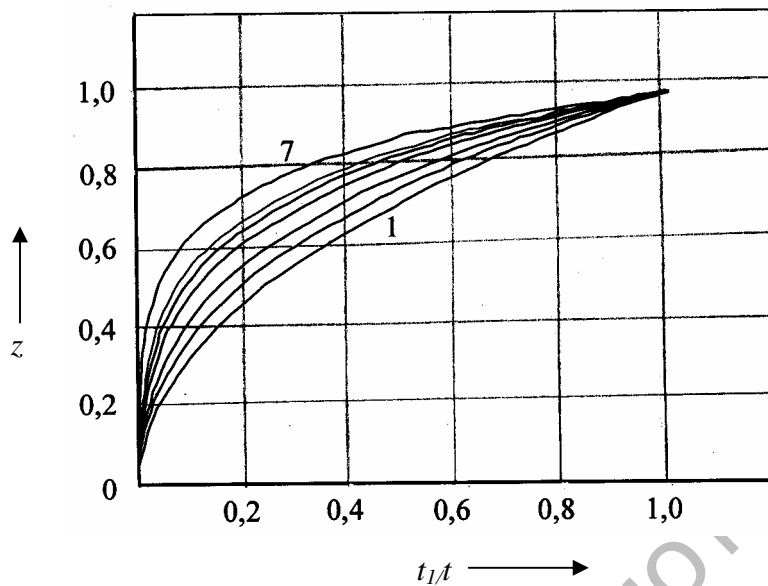


Рис. 4. Относительная скорость испарения из конфузорного канала типа II ($k > 0$) в зависимости от относительного радиуса a : 1 – $a = 1,1$; 2 – $a = 1,5$; 3 – $a = 2$; 4 – $a = 3$; 5 – $a = 4$; 6 – $a = 5$; 7 – $a = 10$ (снизу вверх); t_1 – время смещения мениска на глубину z ; t – полное время испарения из конфузорного канала типа II согласно (19)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Испарение жидкостей из капилляров переменного сечения / Н. И. Гамаюнов [и др.] // ИФЖ. – 1984. – Т. 47, № 4. – С. 647–651.
2. Ландау, Л. Механика сплошных сред / Л. Ландау, Е. Лифшиц. – М.: Гостехиздат, 1954. – 765 с.
3. Экспериментальное исследование высокотемпературного испарения жидкостей из капилляров / С. Н. Зотов [и др.] // ИФЖ. – 1978. – Т. 34, № 6. – С. 1035–1039.
4. Исследование процессов теплопереноса при сушке дисперсных материалов / Н. И. Гамаюнов [и др.] // Теплообмен–VI: материалы VI Всесоюзной конф. – Минск: ИТМО АН БССР, 1980. – Т. VII. – С. 11–7.
5. Уварова, Л. А. Математическая теория высокотемпературного парообразования неоднородных жидкостей в капиллярах: монография / Л. А. Уварова, В. Л. Малышев. – Могилев: МГТИ, 2002. – 128 с.
6. Малышев, В. Л. Теория испарения растворов при произвольных температурах. Квазистационарные условия / В. Л. Малышев, Л. А. Уварова // ЖФХ. – 1999. – Т. 73, № 1. – С. 53–57.
7. Теоретический расчет газовых потоков в процессе изотермического парообразования многокомпонентных жидкостей в узких каналах различных сечений / В. Л. Малышев [и др.] // ТВТ. – 1985. – Т. 23, № 2. – С. 331–335.
8. Малышев, В. Л. Квазистационарное испарение нереагирующих смесей с произвольным числом летучих компонентов из цилиндрических капилляров / В. Л. Малышев, Л. А. Уварова // Вестн. АН БССР. – 1985. – № 1. – С. 90–93.
9. Малышев, В. Л. Испарение бинарных жидкостей из узких каналов вблизи точки кипения / В. Л. Малышев // ЖФХ. – 1997. – Т. 71, № 11. – С. 2082–2084.
10. Диффузия пара при испарении жидкостей из капилляров в неизотермических условиях / Н. И. Гамаюнов [и др.] // ИФЖ. – 1984. – Т. 74, № 5. – С. 765–770.
11. Особенности переноса пара при испарении жидкостей из капилляров в неоднородном поле температур / Н. И. Гамаюнов [и др.] // Изв. вузов. Физика. – 1984. – Т. 27, № 5. – С. 65–70.
12. Испарение бинарных азеотропных смесей из капилляров в режиме вязкого течения / Н. И. Гамаюнов [и др.] // ТОХТ. – 1984. – Т. 18, № 1. – С. 114–116.
13. Определение концентрации компонентов на поверхности при испарении бинарных жидких смесей / Н. И. Гамаюнов [и др.] // ТОХТ. – 1990. – Т. 24, № 3. – С. 397–399.

Могилевский государственный университет продовольствия
Материал поступил 20.12.2007

V. L. Malyshev
Viscous regime of liquid evaporation
from confuser capillaries

Influence of inconstancy of capillary transverse dimensions on mass transfer character at phase transitions is examined in the article. Possible kinds of capillaries with changing radius in porous materials are systematized. The main kinds of confuser capillaries of variable section have been formulated for the first time. It will give the opportunity to use common solution of problems on liquid evaporation from capillaries of variable section. Mass transfer intensity expression on successive stages of liquid evaporation from capillary systems of the given structure has been received in analytical form.