

УДК 533.15; 536.25

### **Щелевой диффузионный канал**

#### **Slot diffusion channel**

Поярков И.В., Мукамеденкызы В., Актolkын Ш.

*Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы (E-mail: p-igor@inbox.ru)*

Диффузиялық және конвективтік араласу процестері диффузиялық арнада жүреді. Қуыс арнадағы араласу режимінің ауысуы Рэлей критикалық санының кіші мәндерінде өтеді. Мақалада қарастырылып отырған қуыс каналды, жарықтық құрылғыны пайдалана отырып, екіқолбалық әдісте қолдануға болады. Диффузиялық каналдың кіші қабырғасын тең екіге бөлу арқылы оны жанартуға мүмкіндік бар. Сонымен қатар құрылғының геометриялық тұрақтысын анықтау және қателігін бағалау тәсілі ұсынылды.

The process of diffusive and convective mixing can take place in the diffusion channel. The change of a mixing regime in a slot's channel occurs at small values of the critical Rayleigh numbers. The slot channel considered in this paper can be used in the two-flask method jointly with a «shadow» device. Diffusion channel can be redesigned by splitting it in half on the smallest side. The methods of the device's geometrical constant determination and the error estimation procedure have been proposed.

Исследования многокомпонентной диффузии в некоторых смесях показали, что при определенных термодинамических параметрах системы и геометрических характеристиках диффузионного канала возникают конвективные потоки, которые в несколько раз превосходят диффузионный [1]. Проявление неустойчивости в диффузионном процессе также наблюдалось Миллером и Мейсоном при исследовании термоэффекта в трехкомпонентных газовых смесях. Они дали объяснение наблюдаемому явлению и назвали такое поведение газов при диффузии диффузионной неустойчивостью (неустойчивостью, «instabilities diffusion») [2]. Ранее аналогичное явление, получившее название «конвекция с двойной диффузией» («double diffusive convection»), или «двойная диффузия», было обнаружено и физически описано авторами [3] при океанографических исследованиях в середине 50-х годов так называемых «солевых фонтанов».

Дальнейшие исследования показали, что явление диффузионной неустойчивости связано с появлением пространственной неоднородности плотности. Стратифицированные области, обусловленные концентрационными полями, в поле силы тяжести вызывают свободно конвективное движение, которое искажает диффузионный перенос. Теоретическое описание смены диффузии на конвективный массоперенос возможно через парциальные числа Рэля, которые представляют собой комплекс, состоящий из термодинамических параметров газовой системы и геометрических характеристик диффузионного канала. Как показали теоретические исследования, смена режима «диффузия — конвекция» происходит при определенном критическом числе Рэля и зависит от формы диффузионного канала. Для щелевого канала это число составляет значение, равное 31,29, а для цилиндрического — в два раза больше — 67,95 [4]. Следовательно, в каналах щелевой формы смена режима смешения происходит при меньших термодинамических параметрах, чем в цилиндрических. Например, в двухколбовом методе достаточно легко изменять давление и температуру в системе.

Исходя из этого мы создали щелевой диффузионный канал (рис. 1), представляющий собой плоскопараллельную щель 2 высотой  $h = 6,25$  мм и длиной  $L = 169,75$  мм, выполненный из латуни. В нижней части канал имеет плоскопараллельные стеклянные стенки 3 для визуального наблюдения протекания процесса смешения при помощи теневого прибора. Диффузионный канал крепится к диффузионному аппарату при помощи болтов через крепежные отверстия 6. Между вставкой и аппаратом находятся фторопластовые прокладки 7 для предотвращения течи газов через стыковочные соединения. Для исследования характеристик конвективного течения в диффузионном канале нами была предусмотрена возможность деления его на две равные части пластиной 5. Разделяющая пластина была изготовлена из медной фольги (толщина 0,1 мм) и закреплена в канале эпоксидной смолой. Таким образом, мы получили два связанных одинаковых канала, каждый шириной 3 мм. Суммарная площадь двух каналов в пределах погрешности исследований равна площади одного канала.

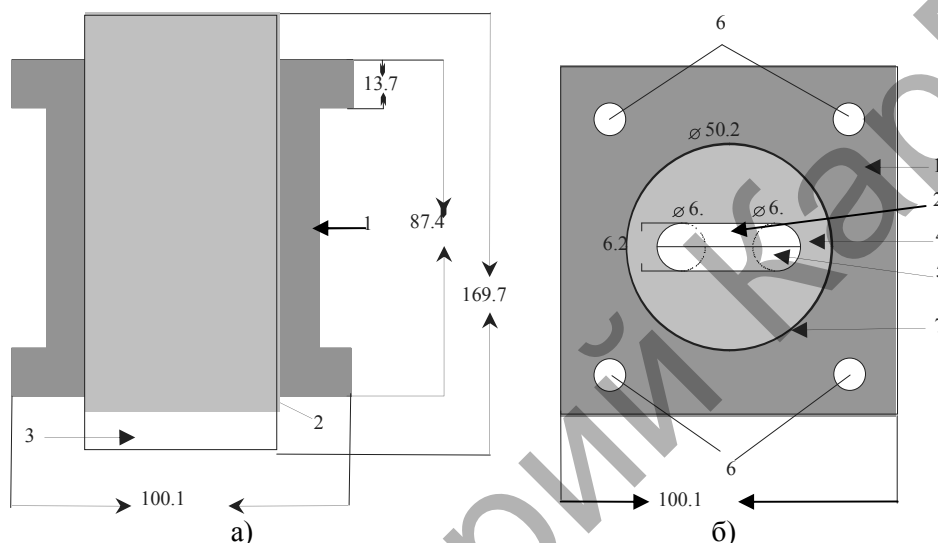


Рис. 1. Диффузионный канал — а) вид спереди; б) вид сверху: 1 — корпус; 2 — диффузионный канал; 3 — плоскопараллельные стекла для визуального наблюдения протекания эксперимента; 4 — область совмещения с колбами; 5 — разделяющая пластина; 6 — отверстия для крепления блока с диффузионным каналом к колбам; 7 — фторопластовая прокладка

При исследовании процессов массопереноса в газовых смесях используются различные методы: например, двухколбовый, расчетная формула для определения коэффициента диффузии содержит геометрические параметры: площадь поперечного сечения  $S$  и длину  $L$ , объемы нижней  $V_I$  и верхней  $V_{II}$  колб [5]:

$$D = \frac{L}{S\tau} \frac{1}{\left(\frac{1}{V_I} + \frac{1}{V_{II}}\right)} \ln \frac{\Delta c_0}{\Delta c_\tau}, \quad (1)$$

где  $\Delta c_0, \Delta c_\tau$  — разности концентраций (в мольных долях) между колбами аппарата в начальный и конечный моменты времени;  $\tau$  — время диффузии.

Выражение (1) было получено с применением следующих допущений: квазистационарное состояние в диффузионном канале наступает быстро, концентрации газов в колбах прибора выравниваются мгновенно, объем канала значительно меньше объема колб, коэффициент диффузии не зависит от концентрации. Помимо допущений, описанных выше, при выполнении экспериментов не всегда представляется возможным достаточно точно и полно учесть геометрические параметры прибора, поэтому в формулу (1) вводят поправки. Так, в работе [6], вследствие влияния диффузионного сопротивления, вместо геометрической длины диффузионного канала было использовано ее эффективное значение:

$$L_{эф} = L + kd, \quad (2)$$

где  $d$  — диаметр капилляра;  $k = (0,745 \pm 0,012)$  — поправочный коэффициент.

Если проанализировать формулу (1), то для определенного диффузионного прибора при исследованиях геометрические параметры остаются неизменными, поэтому их можно заменить одной величиной, называемой постоянной прибора —  $\beta$ . Параметр  $\beta$  может быть найден несколькими методами: геометрическим (абсолютный) или эмпирическим (относительный).

Если геометрические размеры аппаратов измеряются непосредственно, то такой способ определения постоянной прибора является абсолютным. Абсолютный способ, конечно, выглядит предпочтительнее перед относительным, так как при соответствующей измерительной технике погрешность постоянной прибора может быть сведена к минимуму. Кроме того, погрешность относительного способа, при всех прочих равных условиях, будет несколько больше, чем абсолютного из-за небольшой, но все же существующей погрешности эталонного коэффициента диффузии. В этом случае постоянная прибора находится из выражения

$$B = \frac{L_{эфф} V_I \cdot V_{II}}{S V_I + V_{II}}. \quad (3)$$

Погрешность в ее определении будет равна

$$\delta\theta(B) = \sqrt{\left(\frac{\delta(L_{эфф})}{L_{эфф}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(S)}{S}\right)^2 + \left(\frac{\delta(V_I)}{V_I}\right)^2 + \left(\frac{\delta(V_{II})}{V_{II}}\right)^2 + \frac{\delta^2(V_I) + \delta^2(V_{II})}{(V_I + V_{II})^2}}. \quad (4)$$

Необходимо отметить, что в некоторых случаях абсолютный способ просто неприменим, как, например, в аппарате для визуализации диффузионного процесса. Это связано со сложностью учета объема колб аппарата и невозможностью анализа влияния сложной геометрии соединительного капилляра на эффективную длину диффузионного канала.

Эмпирический метод — определение постоянной прибора по известным коэффициентам диффузии. Погрешность в определении  $\beta$  в основном связана с приборной погрешностью в определении концентрации и коэффициентов диффузии газов. Концентрацию можно измерить интерферометрическим методом с точностью до 0,2%. Коэффициенты диффузии — это табличные значения. В этом случае постоянная прибора вычисляется из формулы

$$\beta = \frac{D\tau}{\ln \frac{\Delta c_0}{\Delta c_\tau}}, \quad (5)$$

где  $D$  — коэффициент диффузии, определяемый по формуле

$$D = D_0 \frac{p_0}{p}. \quad (6)$$

Здесь  $D_0$  — коэффициент диффузии при нормальных условиях; давление  $p$  определяется с учетом атмосферного давления ( $p_{атм}$ ) и давления в системе ( $p_{колб}$ ) по правилу аддитивности:

$$p = p_{атм} + p_{колб}.$$

При интерферометрическом методе разность концентраций определяется согласно выражению

$$\Delta c_\tau = \frac{\Delta \tilde{\beta}}{\tilde{\beta}_1 - \tilde{\beta}_2} \frac{1}{k_p k_T}, \quad (7)$$

где  $\tilde{\beta}_1$  и  $\tilde{\beta}_2$  — преломляющие усилия первого и второго газов;  $\Delta \tilde{\beta}$  — разность преломляющих усилий ( $\Delta \tilde{\beta} = a(N - N_0) + b$ , где  $N_0$  — нулевой отсчет;  $N$  — показание шкалы компенсатора;  $a$  и  $b$  — константы градуировки);  $k_p k_T$  — поправка на температуру и давление.

При вычислении постоянной прибора относительным методом погрешность определяется по формуле

$$\delta\theta(B) = \sqrt{\left(\frac{\delta(D_{12})}{D_{12}}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\tau)}{\tau}\right)^2 + \frac{1}{\left(\ln \frac{\delta c_0}{c_\tau}\right)^2} \left[ \left(\frac{\delta(\Delta c_0)}{\Delta c_0}\right)^2 + \left(\frac{\delta(\Delta c_\tau)}{c_\tau}\right)^2 \right]}, \quad (8)$$

$$[\delta(\Delta c_0)]^2 = (\partial c_0')^2 + (\delta c_0'')^2, \quad [\delta(\Delta c_\tau)]^2 = (\partial c_\tau')^2 + (\delta c_\tau'')^2,$$

где  $\delta c_0^I$ ,  $\delta c_0^{II}$ ,  $\delta c_c^I$ ,  $\delta c_c^{II}$  — погрешности в определении состава исходных смесей и смесей газов после диффузии в верхней (I) и нижней (II) колбах прибора соответственно.

В заключение можно сказать, что рассмотренный диффузионный канал и его модификация могут использоваться для изучения смены режимов смешения в зависимости от термодинамических параметров газовой системы, а также для исследования сложного массопереноса в одном канале и в двух связанных каналах, что значительно расширяет возможности для правильного понимания процесса смешения, происходящего при диффузионной неустойчивости.

#### References

1. Zhavrin Yu.I., Kosov V.N. and Krasikov S.A. Some features of convective heat and mass transfer in multicomponent gaseous mixtures // Journal Engineering Physics and Thermophysics. — 1996. — Vol. 69. — № 6. — P. 977–981.
2. Miller L., Mason E.A. Oscillating instabilities in multicomponent diffusion // Phys. Fluids. — 1966. — Vol. 9. — № 4. — P. 711–721.
3. Stommel H., Arons A.B., Blanchard D. An oceanographical curiosity: the perpetual salt fountain // Deep-Sea Res. — 1956. — Vol. 3. — P. 152–153.
4. Hershune H.Z., Zhukhovitsky Z.M. Convective instability of incompressible liquid. — M.: Nauka, 1972. — 392 p.
5. Ney E.P., Armisted F.C. The self-diffusion coefficient of uranium hexafluoride // Phys. Rev. — 1947. — № 1. — P. 14–19.
6. Kalinin B.A., Loyko A.E., Suetin P.E. Effective length of capillary in the measurement of interdiffusion of gases by the two volumes method // Diffusion in gases and liquids. — Alma-Ata, 1972. — P. 79–85.