

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕЧЕНИЯ
РАЗРЕЖЕННЫХ ГАЗОВ В КАПИЛЛЯРНОМ СИТЕ
ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ

*В. Д. Акиншин, С. Ф. Борисов, Б. Т. Породнов,
П. Е. Суетин*

(Свердловск)

Проведено экспериментальное исследование течения газов He, Ne, Ar, Kr, Xe, H₂, D₂, N₂, CO₂ и CH₄ в диапазоне чисел Кнудсена $10^4 \div 10^{-1}$ при комнатной температуре на капиллярном сите. Проведено также исследование течения ряда инертных и двухатомных газов при температуре 77.2 и 194.7° К на отверстии и в капиллярном сите.

В свободномолекулярном режиме течения определены значения относительных расходов. Вычислены коэффициенты аккомодации тангенциального импульса для исследуемых газов при различных температурах.

Практически не проводилось экспериментальных исследований по изучению течения разреженных газов в широком интервале температур. В [1] было изучено течение разреженных газов в стеклянных капиллярах при $\sim 195^\circ$ К. Аналогичные исследования были проведены [2] в диапазоне температур (0 \div 50) °С. Ввиду малой точности полученных результатов и небольшого диапазона исследованных температур какие-либо выводы о температурной зависимости проводимости каналов сделать трудно. Поэтому проведение систематических исследований свободномолекулярного и близкого к нему режимов течения широкого ряда газов при различных температурах представляет несомненный интерес. Такое изучение позволяет получить дополнительную информацию о природе и характеристиках взаимодействия газ — твердое тело.

В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования течения инертных, а также некоторых многоатомных газов через отверстие и капиллярное сито при температурах 293, 194.7 и 77.2 °К в диапазоне чисел Кнудсена $10^4 \div 10^{-1}$.

Исследование течения газов через отверстие и капиллярное сито проводилось на экспериментальной установке, принципиальная схема которой и методика измерений подробно описаны в [3]. В качестве метода измерения использовался метод нестационарного потока, предложенный Кнудсеном [4]. Метод основан на определении времени релаксации малого перепада давлений между объемами, соединенными исследуемым каналом при постоянном среднем давлении в системе.

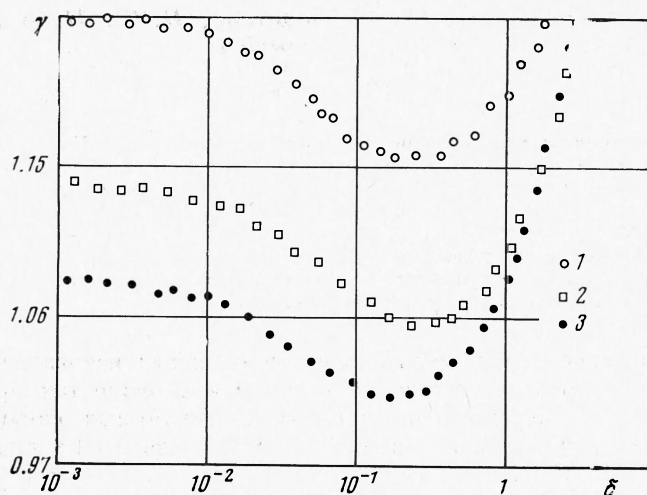
В экспериментах использовалось почти идеальное отверстие, технология изготовления и параметры которого приведены в [5].

Капиллярное сито было изготовлено из набора тонкостенных капилляров одинакового диаметра, помещенных в стеклянную трубу, с дальнейшим спеканием их и вытягиванием. Параметры сита следующие: средний диаметр капилляров $(1.35 \pm 0.01) \cdot 10^{-2}$ см, длина 5.0 см, прозрачность $\sim 90\%$, число капилляров ~ 640 .

Чистота исследуемых инертных газов 99.96 \div 99.98%, многоатомных газов 99.7%. Перед напуском в экспериментальную установку все газы

пропускались через ловушку, охлаждаемую жидким азотом. Измерения проводились при 77.2 °К на отверстии и капиллярном сите с газами He, Ne, Ar, H₂, D₂ и N₂ и на капиллярном сите при температуре 194.7° К. При температуре 293° К кроме указанных газов использовались также Kr, Xe, CO₂ и CH₄. Воспроизводимость экспериментальных результатов двух независимых серий измерений оказалась в пределах 0.2 ÷ 1%.

В [5] описана методика эксперимента и проведен анализ экспериментальных данных, полученных на отверстии при температуре 293° К. Поэтому здесь только кратко опишем необходимость проведения и основные результаты эксперимента на отверстии при температуре 77.2 °К.



Фиг. 1

Можно показать, что расчетная формула для вычисления наблюдаемого расхода газа при нестационарном методе измерения включает в себя поправку, обусловленную адсорбцией газа на поверхности рабочих объемов. С уменьшением температуры эта поправка должна возрастать. Вычисление ее величины затруднено как из-за невозможности определения с достаточной точностью поверхности рабочих объемов, так и из-за неопределенности в значении среднего времени жизни молекул в адсорбированном состоянии.

Для оценки влияния адсорбции газа на величину измеряемого расхода были проведены измерения на отверстии в свободномолекулярном и близком к нему режимах течения при температуре 77.2 °К. Анализ полученных результатов показывает, что для всех исследованных газов наблюдаемые расходы совпадают с теоретическими в пределах погрешности эксперимента 1 ÷ 1.5%. Заметим, что при вычислении теоретического расхода (свободномолекулярный предел) учитывалась поправка, обусловленная неидеальностью отверстия, по формулам [6]. Совпадение результатов свидетельствует об отсутствии заметной систематической ошибки, возникающей из-за адсорбции газа на поверхности рабочих объемов системы.

Экспериментальная зависимость относительного расхода γ от параметра δ для He, D₂, Ar (точки 1, 2, 3) при температуре 194.7 °К для капиллярного сита представлена на фиг. 1. Относительный расход γ вычислялся по формуле

$$(1) \quad \gamma = M_+ / M_-$$

Здесь M_+ — объемный расход газа при единичной разности давлений на концах канала, M_- — объемный расход ксенона при температуре 293° К в свободномолекулярном режиме течения. Параметр δ определяется выражением

$$(2) \quad \delta = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{R}{\lambda} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{\text{Кн}}$$

где R — радиус капилляра, λ — средняя длина свободного пробега молекул газа, соответствующая среднему давлению в системе. Расчет λ проводился по формуле для коэффициента вязкости газа из твердых сферических молекул в высших приближениях теории Чепмена — Энскога.

Как видно из фиг. 1, наблюдается существенное отличие относительных расходов γ для различных газов в свободномолекулярном и близком к нему режимах течения.

При расчете свободномолекулярного значения относительного расхода γ_0 использовалась следующая эмпирическая формула:

$$(3) \quad \gamma = \gamma_0 (1 + 0.7\delta \lg \delta)$$

где γ_0 — относительный расход газа в свободномолекулярном режиме течения. Функциональная зависимость расхода γ (δ) согласно (3) аналогична теоретической зависимости для режима течения, близкого к свободномолекулярному ($\delta \ll 10^{-2}$). Расчеты показали, что вычисленные по (3) значения γ совпадают с теоретическими [7] в пределах 0.2% в области $\delta < 5 \cdot 10^{-2}$.

Обработка всех экспериментальных данных в этой области чисел δ проводилась по методу наименьших квадратов с использованием (3). Вычисленные значения γ_0 для исследованных газов при различных температурах с соответствующими стандартными отклонениями приведены в таблице.

Численные значения $\gamma_0 + \Delta\gamma_0 \cdot 10^3$

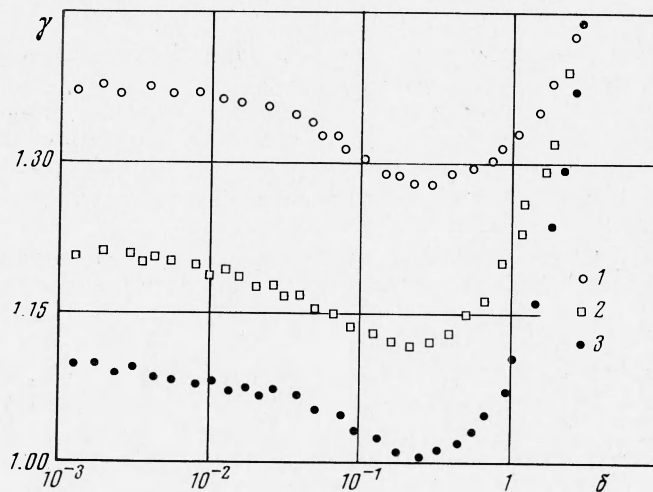
| Газы | | He | Ne | Ar | Kr | Xe | H ₂ | D ₂ | N ₂ | CO ₂ | CH ₄ |
|---------------------------------|----------|-------|-------|-------|-------|-------|----------------|----------------|----------------|-----------------|-----------------|
| γ_0 | 293 °К | 1.119 | 1.141 | 1.037 | 1.018 | 1.000 | 1.050 | 1.064 | 1.048 | 1.005 | 1.016 |
| | | 5 | 5 | 10 | 8 | 12 | 11 | 4 | 12 | 9 | 9 |
| | 194.7 °К | 1.247 | 1.223 | 1.092 | — | — | 1.137 | 1.152 | 1.096 | — | — |
| $\pm \Delta\gamma_0 \cdot 10^3$ | | 4 | 14 | 6 | — | — | 5 | 7 | 7 | — | — |
| | 77.2 °К | 1.389 | 1.233 | 1.144 | — | — | 1.211 | 1.209 | 1.142 | — | — |
| | | 8 | 12 | 10 | — | — | 12 | 9 | 15 | — | — |

Из таблицы видно, что относительный расход γ_0 существенно зависит не только от рода газа, но и от температуры, при которой проводились измерения. Наибольшее различие γ_0 , достигающее ~24%, наблюдается для гелия при температурах 293 и 77.2° К. Зависимость относительного расхода γ от параметра δ для гелия при температурах 77.2, 194.7 и 293° К (точки 1, 2, 3) показана на фиг. 2.

Результаты, полученные на одиночных капиллярах с плавленными стенками при температуре 293° К [3], показывают, что для ксенона как в вязком со скольжением, так и в почти свободномолекулярном режимах течения экспериментальные данные совпадают с теоретическими в пределах погрешности эксперимента, если в теоретическом рассмотрении предположить, что все молекулы рассеиваются стенкой диффузно. Так как в эксперименте использовалось капиллярное сито с плавленными стеклян-

ными стенками, то можно предполагать, что и в данном случае молекулы ксенона рассеиваются стенкой капилляра диффузно.

Отличие в γ_0 для исследованных газов при различных температурах можно объяснить неполной аккомодацией тангенциального импульса молекул, падающих на стенку. Коэффициент аккомодации тангенциального

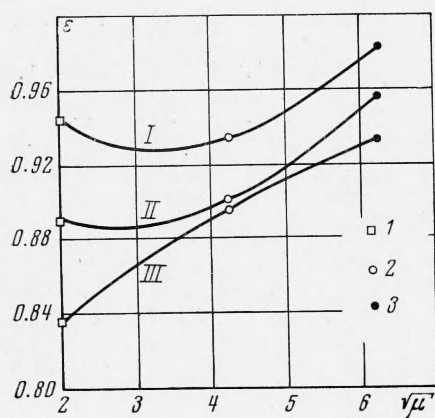


Фиг. 2

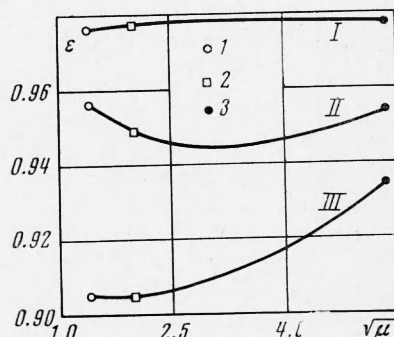
импульса ϵ может быть вычислен из экспериментальных значений γ_0 с помощью соотношения [7]

$$(4) \quad \gamma_0(\epsilon) = \gamma_0(\epsilon = 1) (2 - \epsilon)/\epsilon$$

Согласно сделанным предположениям $\gamma_0(\epsilon = 1)$ в (4) есть относительный расход ксенона при температуре 293° К. На фиг. 3 и 4 показана зави-



Фиг. 3



Фиг. 4

симость ϵ от молекулярного веса μ для некоторых инертных и двухатомных газов при различных температурах. Точки 1, 2, 3 на фиг. 3 относятся к He, Ne и Ar, линии I, II, III — к $T = 293, 194.7$ и 77.2° К. Точки 1, 2, 3 на фиг. 4 относятся к H_2, D_2 и N_2 , линии I, II, III — $T = 293,$

194,7, 77,2° К. Из этих фигур видно, что с увеличением температуры коэффициент аккомодации тангенциального импульса ϵ систематически увеличивается для всех газов.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что с уменьшением температуры для всех исследованных газов наблюдается существенное увеличение относительных расходов как в свободномолекулярном, так и в близком к нему режимах течения. Использование максвелловской схемы граничных условий, учитывающей диффузно-зеркальное рассеяние молекул стенкой, позволило определить температурную зависимость коэффициентов аккомодации тангенциального импульса молекул. Для всех газов с уменьшением температуры коэффициенты аккомодации уменьшаются. Заметим, что вычисленные при комнатной температуре коэффициенты аккомодации для гелия, неона и аргона совпадают с полученными на одиночных капиллярах [7] в пределах $< 0.5\%$.

Такое поведение расходов и коэффициентов аккомодации с изменением температуры является результатом влияния различных эффектов, происходящих на поверхности раздела газ — твердое тело. Такими эффектами могут быть поверхностная диффузия молекул и адсорбция. Качественное рассмотрение влияния поверхностной диффузии молекул газа при различных температурах на поток газа в каналах не позволяет объяснить увеличение наблюдаемых относительных расходов и уменьшение коэффициентов аккомодации тангенциального импульса с уменьшением температуры.

Другой причиной может быть наличие слоя адсорбированных молекул легкоконденсируемых примесей. Известно, что с уменьшением температуры увеличивается среднее время жизни молекул в адсорбированном состоянии на стенке и плотность покрытия стенок адсорбированными молекулами. В этом случае падающие на стенку молекулы взаимодействуют не со стенкой, а с поверхностной пленкой адсорбированных молекул. При таком взаимодействии вероятность зеркального отражения молекул увеличивается.

Количественная интерпретация полученных результатов затруднена из-за отсутствия теоретического описания влияния указанных поверхностных эффектов на течение разреженных газов в каналах.

Отметим, что приводимые в данной работе результаты являются практически единственными. Поэтому проведение подобных экспериментов каким-либо другим независимым методом (например, методом стационарного потока) в условиях более чистой поверхности и высокого вакуума может представить дополнительную информацию о температурной зависимости коэффициента аккомодации.

Поступила 18 VII 1973

ЛИТЕРАТУРА

1. *Barrer R. M., Nicholson D.* Flow in capillary systems. II. Low pressure transition flow of gases in short capillaries, rectangular slits, beds of spheres and parallel capillary bundles. *Brit. J. Appl. Phys.*, 1966, vol. 17, No. 8.
2. *Lund L. M., Berman A. S.* Flow of noble gases at low pressures through porous media and capillaries. *J. Chem. Phys.*, 1958, vol. 28, No. 2.
3. *Борисов С. Ф., Породнов Б. Т., Суетин П. Е.* Экспериментальное исследование течения газов в капиллярах. *Ж. техн. физ.*, 1972, т. 42, вып. 6.
4. *Knudsen M.* Die Gesetze der Molekularströmung und der inneren Reibungsströmung der Gase durch Röhren. *Ann. Phys.*, 1909, Bd 28, H 4, S. 75—130.
5. *Борисов С. Ф., Неудачин И. Г., Породнов Б. Т., Суетин П. Е.* Течение разреженных газов через отверстие при малых перепадах давления. *Ж. техн. физ.*, 1973, т. 43, вып. 8.
6. *Berman A. S.* Free molecule transmission probabilities. *J. Appl. Phys.*, 1965, vol. 36, No. 10.
7. *Suetin P. E., Porodnov B. T., Chernjak V. G., Borisov S. F.* Poiseuille flow at arbitrary Knudsen numbers and tangential momentum accommodation. *J. Fluid. Mech.*, 1973, vol. 60, pt 3.