

и различных размерах частиц (10^{-6} м): ρ_{pm}/ρ_{pz} (1 — $\delta = 45$; 2 — $\delta = 67$); u_{gm}/u_{gz} (3 — однофазная струя; 4 — $\delta = 67$; 5 — $\delta = 45$); u_{pm}/u_{pz} (6 — $\delta = 45$; 7 — $\delta = 67$). Увеличение размера частиц усиливает неравномерность течения по скоростям из-за уменьшения межфазной поверхности. Это вызывает уменьшение D_p и увеличение ρ_{pm}/ρ_{pz} . На фиг. 5 показано изменение ординат y_p , y_u , в которых концентрация дисперсной фазы и скорость газа соответственно достигают половины осевых значений при $\delta = 45 \cdot 10^{-6}$ м и различных κ_z : y_p (1 — $\kappa_z = 1$; 2 — $\kappa_z = 0,5$); y_u (3 — $\kappa_z = 1$; 4 — $\kappa_z = 0,5$; 5 — $\kappa_z = 0$). При увеличении загрузки струя становится уже и дальнобойнее, что согласуется с выводами [1].

Заметим, что в рассматриваемых экспериментах [6] частицы в результате взаимодействия со стенками, видимо, приобретали значительную начальную поперечную скорость и соотношение $v_g = v_p$ не выполнялось. По всей вероятности, в данной работе завышена турбулентная диффузия массы дисперсной фазы поперек струи; необходимо дальнейшее уточнение значения эмпирической константы k_6 , от которой зависит величина $\langle \rho_p' v_p' \rangle$.

Хорошее согласие результатов расчетов с экспериментальными данными позволяет использовать предложенную модель для численного исследования двухфазных турбулентных струй.

Поступила 3 III 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Абрамович Г. Н., Гиршович Т. А. Турбулентные струи, несущие твердые или капельно-жидкие примеси.— В кн.: Парожидкостные потоки. Минск: ИТМО АН БССР, 1977.
2. Каргушинский А., Фришман Ф. Численный расчет двухфазной турбулентной затопленной струи.— Изв. АН ЭССР. Физика. Математика, 1980, т. 29, № 4.
3. Зуев Ю. В., Лепешинский И. А. Математическая модель двухфазной турбулентной струи.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 6.
4. Danon H., Wolfshtein M., Hetsroni G. Numerical calculations of two-phase turbulent round jet.— Int. J. Multiphase Flow, 1977, vol. 3, N 3.
5. Hetsroni G., Sokolov M. Distribution of mass, velocity, and intensity of turbulence in a two-phase turbulent jet.— J. Appl. Mech., 1971, vol. 93.
6. Гиршович Т. А., Каргушинский А. И. и др. Экспериментальное исследование турбулентной струи, несущей тяжелые примеси.— Изв. АН СССР. МЖГ, 1981, № 5.
7. Нигматулин Р. И. Основы механики гетерогенных сред. М.: Наука, 1978.
8. Коловандин Б. А. Моделирование теплопереноса при неоднородной турбулентности. Минск: Наука и техника, 1980.
9. Турбулентность. Принципы и применения/Под ред. У. Фроста, Т. Моулдена. М.: Мир, 1980.
10. Ивандаев А. И., Кутушев А. Г., Нигматулин Р. И. Газовая динамика многофазных сред. Ударные и детонационные волны в газовзвесах.— В кн.: Итоги науки и техники. Механика жидкости и газа. Т. 16. М.: ВИНТИ, 1981.
11. Соу С. Гидродинамика многофазных систем. М.: Мир, 1971.
12. Буройд Р. Течение газа со взвешенными частицами. М.: Мир, 1975.
13. Шрайбер А. А., Милютин В. Н., Яценко В. П. Гидромеханика двухкомпонентных потоков с твердым полидисперсным веществом. Киев: Наукова думка, 1980.
14. Pismen L. M., Nir A. On the motion of suspended particles in stationary homogeneous turbulence.— J. Fluid Mech., 1978, vol. 84, pt 1.
15. Дорфман А. Л., Маев В. А. Численное моделирование струйных течений вязкой жидкости.— ИФЖ, 1976, т. 31, № 4.

УДК 539.217.082.3

ИССЛЕДОВАНИЕ ГАЗОДИНАМИЧЕСКОЙ ПРОНИЦАЕМОСТИ СЕТЧАТОГО ФИЛЬТРА НА He, Ar, Xe

В. Д. Акинъшин, Б. Т. Породнов, В. Д. Селезнев, В. В. Сургучев

(Свердловск)

Целый ряд проблем в науке, технике и технологии удастся разрешить с помощью мелкопористых мембран. В последнее время все более широкое применение находят мембраны, называемые сетчатыми фильтрами. Они получают путем бомбардировки тонких полимерных пленок ионами высоких энергий [1]. Отличительные особенности таких мембран: высокая плотность и неперекрываемость пор, почти цилиндрическая

форма каналов, малая дисперсия пор по радиусам. Все эти свойства делают сетчатые фильтры незаменимыми в ряде случаев, так как качество фильтрации у них выше, чем у других типов мембран.

Имеется достаточное количество работ, посвященных исследованию течения газов при произвольных числах Кнудсена через капилляры и капиллярные сита контролируемой геометрии. В них показано, что газодинамическая проводимость различных газов чувствительна к геометрии, материалу, температуре и шероховатости поверхности каналов [2—4]. Аналогичных исследований по сетчатым фильтрам вышеуказанного типа практически нет, а они представляют несомненный интерес, так как позволяют выявить как особенности структуры пор самих сетчатых фильтров, так и физическую картину взаимодействия молекул различных газов друг с другом и с поверхностью каналов.

В данной работе приводятся результаты измерения потоков гелия, аргона и ксенона через образец сетчатого фильтра в широком диапазоне чисел Кнудсена ($0,5 < Kn < 500$) при температуре $T = 293$ К.

Методика измерений и принципиальная схема установки, на которой проводились исследования, подробно описаны в [4]. Использовался метод стационарного потока, основанный на определении скорости изменения объема системы при поддержании в ней постоянного давления p . Истечение газа через сетчатый фильтр производилось в вакуум. Исследуемый образец фильтра был изготовлен из полиэтилентерефталатной пленки толщиной $L = (1,00 \pm 0,05) \cdot 10^{-3}$ см. Плотность пор фильтра $N = (4,0 \pm 0,1) \cdot 10^7$ см $^{-2}$, средний радиус входных сечений пор $\langle R_0 \rangle = (1,25 \pm 0,30) \cdot 10^{-5}$ см, средний радиус выходных отверстий $\langle R_L \rangle = (2,6 \pm 0,3) \cdot 10^{-5}$ см. Оценка величин N , $\langle R_0 \rangle$, $\langle R_L \rangle$ проведена по фотографиям фильтра, полученным с помощью электронного микроскопа.

Сравнение экспериментальных результатов для различных газов осуществлялось в терминах относительного расхода ω как функции параметра разреженности δ , связанного с числом Кнудсена соотношением

$$(1) \quad \delta = \frac{\sqrt{\pi} \langle R \rangle}{2 \lambda} = \frac{\sqrt{\pi}}{2} \frac{1}{Kn},$$

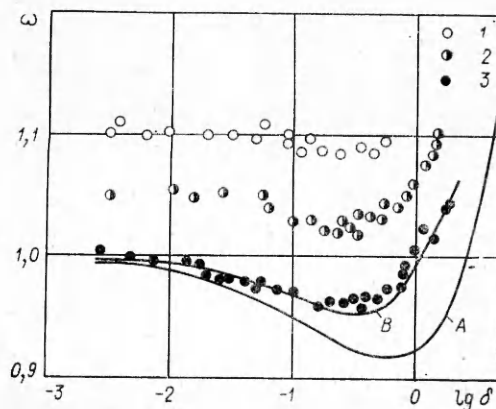
где $\langle R \rangle$ — средний радиус каналов сетчатого фильтра; λ — средняя длина свободного пробега молекул газа.

Относительный расход газа ω_i вычислялся по формуле

$$\omega_i = \frac{Q_i}{Q_{Xe}^0} \left(\frac{\mu_i}{\mu_{Xe}} \right)^{1/2},$$

где Q_i — объемный расход исследуемого газа; Q_{Xe}^0 — объемный расход ксенона в свободномолекулярном режиме течения; μ_i и μ_{Xe} — молекулярные веса исследуемого газа и ксенона соответственно.

На фигуре представлены экспериментальные значения относительных расходов He, Ar, Xe (точки 1—3) и нанесена теоретическая зависимость ω (δ) для длинных цилиндрических каналов (A), полученная в предположении полностью диффузного отражения молекул газа от стенок [5]. Радиус в формуле (1) при расчете экспериментальных зависимостей ω_i (δ_i) подбирался из условия наилучшего согласия опытных значений относительного расхода ксенона



(как наиболее «диффузного» газа) с кривой A. Как видно из фигуры, глубина кнудсеновского минимума для ксенона в ~ 2 раза меньше, чем у теоретической кривой A. Такое отличие экспериментальных данных от теории не удается объяснить ни существующей дисперсией входных размеров пор, ни их конусностью. Проверено, что зависимость $\omega(p \langle R \rangle)$ для двух каналов, отличающихся по диаметру в 2 раза ($\langle R \rangle$ —

средний радиус каналов, p — давление на входе в канал), существенно не отличается от кривой $\omega(p \langle R \rangle)$ для одиночного капилляра с радиусом $R = \langle R \rangle$. Форма кривой $\omega(\delta)$ при промежуточных числах Кнудсена также мало чувствительна к конусности расширяющегося канала. В конусном канале при постепенном повышении давления режим со столкновениями молекул газа друг с другом возникает сначала в самом узком месте из-за приблизительно линейного уменьшения давления вдоль поры. Поэтому отклонение зависимости $\omega(\delta)$ от постоянного свободномолекулярного значения при увеличении давления в расширяющемся канале определяется размерами его входного участка и слабо зависит от диаметра выхода.

Только учет конечной длины канала ($L/\langle R \rangle \sim 80$) позволил вплотную сблизить опытную и теоретическую (B , см. фигуру) зависимости относительных расходов от параметра разреженности δ . Кривая B была получена на основе полуэмпирической формулы Лунда и Бермана [6], позволяющей произвести расчет потока газа через короткие каналы. Величина среднего радиуса пор, подобранная из условия наилучшего согласия теории (B) и эксперимента, составила $\langle R \rangle = (1,35 \pm 0,10) \cdot 10^{-5}$ см, что в пределах погрешности опыта совпадает с радиусом входных отверстий пор, зарегистрированным электронным микроскопом. По превышению относительных потоков He и Ar в свободномолекулярном режиме над единицей (см. фигуру) были рассчитаны доли диффузного отражения газов, которые составили $\epsilon_{\text{He}} = 0,95$, $\epsilon_{\text{Ar}} = 0,97$. Эти данные в пределах ошибки эксперимента ($\sim 1\%$) совпадают с соответствующими значениями $\epsilon_{\text{He}} = 0,95$, $\epsilon_{\text{Ar}} = 0,98$ на плавном стекле [3].

Это совпадение свидетельствует о достаточно высокой гладкости стенок пор исследуемого полиэтилентерефталатного фильтра, так как известно [4], что наличие шероховатости приводит к исчезновению различий в относительных расходах различных газов.

Поступила 14 XII 1982

ЛИТЕРАТУРА

1. Барашенков В. С. Новые профессии тяжелых ионов. М.: Атомиздат, 1977.
2. Борисов С. Ф., Неудачин И. Г. и др. Течение разреженных газов через отверстие при малых перепадах давления. — ЖТФ, 1973, т. 43, № 8.
3. Акинъшин В. Д., Борисов С. Ф. и др. Экспериментальное исследование течения разреженных газов в капиллярном сите при различных температурах. — ПМТФ, 1974, № 2.
4. Породнов Б. Т., Флягин А. Г. Экспериментальное исследование истечения гелия, неона и аргона в вакуум через длинный одиночный капилляр при температурах 295—490 К. — ПМТФ, 1978, № 4.
5. Suetin P. E., Porodnov B. T. et al. Poiseuille flow at arbitrary Knudsen numbers and tangential momentum accommodation. — J. Fluid. Mech., 1973, vol. 60, pt 3.
6. Lund L. M., Berman A. S. Flow and self-diffusion of gases in capillaries. — J. Appl. Phys., 1966, vol. 37, pt 1, 2.

УДК 536.24 : 532.517.4

ВЛИЯНИЕ НЕИЗОТЕРМИЧНОСТИ НА КОЭФФИЦИЕНТЫ СОПРОТИВЛЕНИЯ ПРИ ТЕЧЕНИИ ТУРБУЛЕНТНЫХ ДОЗВУКОВЫХ ПОТОКОВ В КАНАЛАХ

Д. И. Ламден, И. Л. Мостинский, М. Б. Резников
(Москва)

В настоящее время в литературе имеется несколько различных подходов к теоретическому определению коэффициентов сопротивления для неизотермического течения в каналах и трубах. Некоторые из них (например, [1—3]) предсказывают значительно более сильную зависимость коэффициентов сопротивления от температурного фактора $\psi = T_w/T_\infty$ (T_w — температура стенки, T_∞ — температура в ядре потока), чем это следует из результатов экспериментальных работ [4—7]. В работах [8, 9], опирающихся на подробный численный анализ систем интегродифференциальных уравнений, достигается значительно лучшее согласование с имеющимися экспериментальными