

АНОМАЛЬНЫЙ ПЕРЕХОД К ТУРБУЛЕНТНОСТИ В БЛАГОРОДНЫХ ГАЗАХ

С.А.Новопашин, А.Мюриэль*¹⁾

Институт теплофизики Сибирского отд. РАН,
Новосибирский государственный университет
630090 Новосибирск, Россия

*Center for Fluids Dynamics, University of the Philippines Los Baños
College, Laguna, Philippines

*Laboratoire de Physique, Ecole Normale Supérieure de Lyon
69364 Lyon Cedex 07, France

Поступила в редакцию 14 августа 1998 г.

Экспериментально обнаружено отличие критических чисел Рейнольдса при переходе к турбулентному режиму для течений He, Ar и Kr.

PACS: 47.25.Ae

Многочисленные эксперименты показывают, что уравнением Навье – Стокса [1]

$$\rho \left(\frac{\partial U}{\partial t} + (U \Delta) U \right) = -\nabla P + \eta \Delta U + (\zeta + \eta/3) \nabla(\nabla U) \quad (1)$$

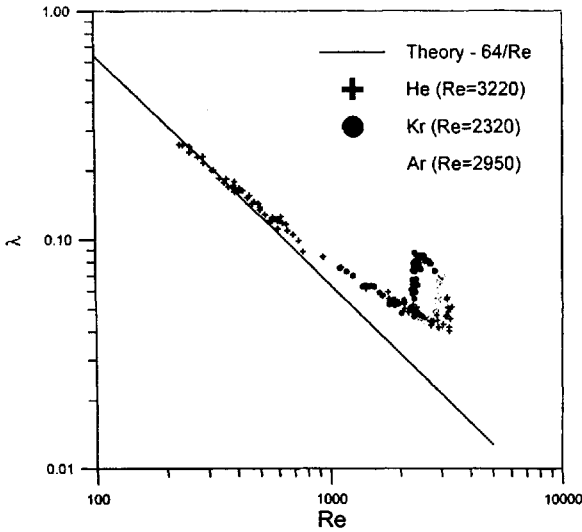
описывает ламинарное течение жидкости. Для течений газа коэффициенты вязкости η и ζ связаны с релаксацией поступательных и внутримолекулярных степеней свободы молекул [2]. При рассмотрении течения несжимаемой жидкости последний член в уравнении (1) может быть отброшен. Это упрощает анализ течения и позволяет ввести единственный безразмерный параметр, который характеризует течение – число Рейнольдса $R = \rho LU/\eta$, где ρ , L и U – плотность, характерные размер и скорость течения. Нарушение стационарного потока и переход к турбулентному течению ассоциируются с потерей устойчивости при увеличении числа Рейнольдса. Для сжимаемого течения последний член в (1) должен быть сохранен, что приводит к необходимости введения дополнительно числа Маха $M = U/c$ (c – скорость звука) и рассмотрения влияния коэффициента объемной вязкости η . Кроме того, для сжимаемых течений необходимо решение тепловой задачи вследствие возникновения температурных полей и теплообмена на границах течения. Отметим, что в области лиминарно-турбулентного перехода вторая вязкость может оказывать влияние на течение [3]. Для благородных же газов вторая вязкость строго равна нулю [2]. В этом случае течение полностью характеризуется числами Рейнольдса и Маха. Добавки, связанные со сжимаемостью газа, имеют величины порядка M^2 . Поэтому для течений с числами Маха ниже 0.2 эффектами сжимаемости обычно пренебрегают (возникающие погрешности не превышают нескольких процентов). В соответствии же с идеями, изложенными в [4, 5], переход к турбулентному режиму может происходить различным образом даже в этом случае. Цель работы состоит в сопоставлении критических чисел Рейнольдса для течений He, Ar и Kr. Для экспериментов выбрано

¹⁾ Amador Muriel

течение Хагена – Пуазейля – течение в длинной круглой трубе. Это течение устойчиво к бесконечно малым возмущениям [6, 7]. Переход же к турбулентному режиму происходит вследствие конечного уровня возмущений либо недостаточно гладких граничных условий на входе в трубу. В ламинарном режиме течения коэффициент сопротивления $\lambda = (\Delta P/L)/(\rho U^2/2d) = 64/Re$ [1]. Здесь $\Delta P/L$ – средний градиент давления по длине трубы, ρ – плотность газа, U – расходная скорость газа, d – диаметр трубы. В турбулентном режиме коэффициент сопротивления резко возрастает, что позволяет уверенно контролировать критическое число Рейнольдса.

Эксперименты выполнены на установке, описанной в [3]. Измерения проведены при истечении газа через стеклянный капилляр (длина 300 мм, диаметр 1.3 мм) из герметичной камеры объемом 0.13 мм³, наполненной газом при повышенном давлении. Камера снабжена системами откачки и напуска газа, что позволяет исследовать различные газы. Измерение перепада давления на капилляре осуществлено датчиком давления мембранного типа, обеспечивающего точность 0.02 мм.рт.ст. Скорость падения давления в камере позволяет определить расход газа (а следовательно, и среднюю скорость течения) как функцию перепада давления на капилляре. В случае плавного входа (капилляр оплавлялся) переход к турбулентному режиму происходил при числах Рейнольдса выше 10⁴. Для проведения экспериментов входной участок капилляра был отпилен перпендикулярно его оси. В этих условиях переход происходит вследствие возмущений на входе. Таким образом, переход к турбулентному режиму при течениях различных газов осуществлялся при абсолютно идентичных возмущениях. Процедура измерения состояла в следующем. Камера откачивалась до давления 10⁻¹ мм.рт.ст., затем наполнялась исследуемым газом до давления выше атмосферного (максимальное значение было для гелия – 1.2 · 10³ мм.рт.ст.). В течение 30 мин происходило установление теплового равновесия с окружающей средой и успокоение течения газа в камере. Клапан, закрывающий капилляр с внешней стороны, открывался на 3–4 с. Характерное падение давления за это время зависит от газа и перепада давлений. Для справки укажем, что для аргона в области ламинарно-турбулентного перехода это падение составляло ~ 0.5 мм.рт.ст. Уменьшение давления в камере происходило вследствие вытекания газа и падения температуры оставшегося газа. Вследствие теплообмена при вытекании газа процесс не является ни адиабатическим, ни изотермическим. После закрытия клапана давление в камере поднимается вследствие восстановления температуры газа в камере до комнатной. Время восстановления зависит от газа, и, например, для криптона составляет около 150 с. Разница давлений в камере до пуска и после восстановления температуры позволяет вычислить расход газа. Число Рейнольдса и коэффициент сопротивления определялись по параметрам газа на входе в капилляр. При начальном перепаде давления течение является турбулентным. При уменьшении давления до некоторой критической величины течение переходит в ламинарный режим. Отметим, что истечение газа в турбулентном режиме сопровождается излучением звука, интенсивность которого существенно падает в точке перехода к ламинарному течению.

Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса для He, Ar и Kr показана на рисунке. Физические характеристики для этих газов при температуре 300 К и давлении 750 мм.рт.ст. приведены в таблице. Там же приведены критические числа Рейнольдса, числа Маха и перепад давления в точке перехода.



Зависимость коэффициента сопротивления от числа Рейнольдса

Рисунок и таблица показывают, что критическое число Рейнольдса для криптона на 27% ниже, чем у аргона, и на 38% ниже, чем у гелия. Соответствующая граница для аргона и гелия составляет около 10%. Наблюдаемая разница критических чисел Рейнольдса выглядит парадоксально. Действительно, в соответствии с поправками, связанными со сжимаемостью, критическое число для гелия должно наиболее сильно отличаться от соответствующих величин для аргона и криптона. Разница же между аргоном и криптоном должна быть существенно меньшей. Можно предположить, что решение этого противоречия потребует привлечения новых гипотез, касающихся природы ламинарно-турбулентного перехода.

	He	Ar	Kr
Скорость звука (м/с)	1012	334	222
Кинематическая вязкость ν (10^{-6} м ² /с)	114	13.0	7.51
Критическое число Рейнольдса	3220	2950	2320
Число Маха	0.22	0.11	0.08
Перепад давления (мм.рт.ст.)	300	45	28

1. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, *Гидродинамика*, М.: Наука, 1986.
2. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц, *Физическая кинетика*, М.: Наука, 1979.
3. О.А.Нерушев, С.А.Новопашин, *Письма в ЖЭТФ* **64**, 43 (1996).
4. A.Muriel and M.Dresden, *Physica D* **81**, 221 (1995).
5. A.Muriel and M.Dresden, *Physica D* **94**, 103 (1996).
6. J.A.Fox, M.Lesson, and W.V.Bhat, *Phys. Of. Fl.* **11**, 1 (1968).
7. H.Salwen, F.W.Cotton, and C.E.Grosch, *J. Fl. Mech.* **92**, 273 (1980).