

ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК СССР

1976

ТОМ 226

№ 4

*Experimental determination of
the density of nitrogen at high
pressures and temperatures.*



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА

А. А. АНТАНОВИЧ, М. А. ПЛОТНИКОВ

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЛОТНОСТИ АЗОТА
ПРИ ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ И ТЕМПЕРАТУРАХ

(Представлено академиком Л. Ф. Верещагиным 20 X 1975)

Для успешного развития ряда технических приложений требуется знание термодинамических свойств промышленно важных газов при высоких давлениях и температурах. В частности, для проектирования и последующей эксплуатации новых аэродинамических установок, предназначенных для моделирования гиперзвуковых потоков с большими числами Рейнольдса ($Re \sim 10^8 - 10^9$), необходимы данные о термодинамических свойствах азота при давлениях до 5–20 килобар и температурах до 1000–3000° K (1).

Однако подавляющее большинство экспериментальных работ по определению термодинамических свойств газов при высоких давлениях ограничено температурами 300–400° C. Это связано с использованием аппаратов высокого давления с наружным обогревом. Использование аппаратов с внутренним подогревом газа для теплофизических исследований было затруднено в связи с интенсивной газовой конвекцией, возникающей в таких аппаратах и нарушающей равномерный характер распределения температуры (2).

Имеющиеся в настоящее время таблицы термодинамических свойств азота (3, 4), полученные расчетным путем по уравнениям состояния, нуждаются в экспериментальной проверке, так как границы применимости этих уравнений, а также справедливость заложенных в них допущений и ограничений могут быть определены лишь на основании экспериментальных $P-v-T$ данных в широком диапазоне давлений и температур.

Настоящая работа посвящена экспериментальному определению плотности азота при давлениях до 3–8 килобар в диапазоне температур 400–1800° K. Исследованный диапазон параметров состояния изображен на рис. 1. Там же показана область параметров, в которой имеются экспериментальные данные других авторов.

Исследования проводились на специально разработанном аппарате стационарного действия с внутренним подогревом газа, позволяющим в течение длительного времени поддерживать температуру до 3000° K в газобразной среде при давлениях 5–10 килобар (5).

Для устранения газовой конвекции все свободное пространство внутри аппарата было заполнено пористым нитридом алюминия с пористостью 60%. Заполнение внутреннего пространства пористым тугоплавким материалом позволило полностью исключить конвекцию газа и получить достаточно по размерам зону с равномерным полем температуры. Разность температур на расстоянии 60 мм, измеренная двумя термодарами, не превышала погрешности измерений.

Для экспериментального определения плотности азота была использована разновидность метода вытеснения (6), пригодная для измерений при высоких температурах. С этой целью проводилось два последовательных опыта (с вкладышем и без вкладыша) при постоянных количествах газа m_1 и m_2 в пьезометре. В обоих опытах после заполнения пьезометра некоторым количеством газа включался подогрев и измерялась зависимость давления газа в пьезометре P от его температуры T . В результате получа-

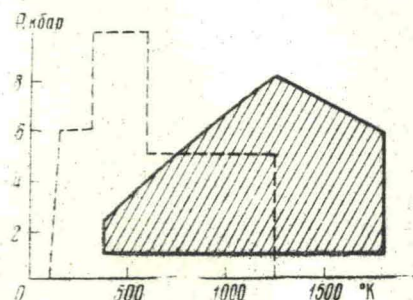


Рис. 1

Рис. 1. Области параметров состояния, исследованные в настоящей работе (заштрихована) и другими авторами (пунктирная линия)

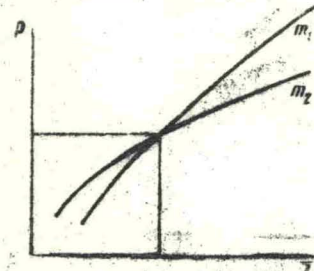


Рис. 2

Рис. 2. К определению плотности газов по методу вытеснения

лись две кривые в координатах давление — температура газа, показанные на рис. 2.

Координаты точки пересечения этих кривых определяют величины давления и температуры, которым соответствует плотность, равная отношению массы газа, вытесненного вкладышем $\Delta m = m_1 - m_2$, к занимаемому им объему при условиях опыта, т. е.

$$\rho(P, T) = \frac{\Delta m}{V_{\text{вкл}}(P, T) - V_{\text{алн}}(P, T)}$$

Здесь $V_{\text{вкл}}(P, T) - V_{\text{алн}}(P, T)$ — объем газа, вытесненного вкладышем, с учетом доли объема, занимаемого нитридом алюминия.

Для определения количества газа, заключенного в аппарате, в каждом из двух опытов использовалась калиброванная емкость объемом 41,95 л. После окончания эксперимента газ расширялся в эту емкость и после установления теплового равновесия, нарушенного вследствие процесса расширения газа, измерялось его давление и температура. Масса газа определялась по уравнению $Pv = RT$.

Объемы $V_{\text{вкл}}$ и $V_{\text{алн}}$ при нормальных условиях определялись калибровкой по воде, а величины деформаций под действием давления и температуры рассчитывались известными методами для условий всестороннего сжатия. Давление в аппарате измерялось образцовым стрелочным и манганиновым манометрами, температура — образцовой платинородий-платиновой термопарой. Среднеквадратичная погрешность полученных $P-v-T$ данных во всем исследованном диапазоне давлений и температур лежит в пределах от 0,4 до 1,1%.

Полученные в результате измерений $P-v-T$ данные сглаживались по изотермам и изобарам при помощи метода наименьших квадратов с целью выравнивания колебаний плотности, вызванных случайными ошибками. Сглаженные значения плотности азота в исследованном диапазоне параметров состояния приведены в табл. 1.

В табл. 2 приведены наибольшие расхождения между полученными результатами и экспериментальными данными других авторов (⁶, ⁷⁻¹⁰). Из данных этой таблицы следует, что расхождение полученных результатов с экспериментальными данными Циклиса и Полякова, Робертсона и Бэбба, а также с данными монографий Дина и Вассермана и др., обобщающих большое число других экспериментальных данных, не превышает погрешность эксперимента. Исключение составляют данные Мальбруно и

Таблица 1

Экспериментально определенные значения плотности азота (г/см³)
при разных температурах

P, бар	400° K	600° K	800° K	1000° K	1200° K	1400° K	1600° K	1800° K
1000	0,478	0,362	0,292	0,246	0,213	0,188	0,169	0,153
2000	0,646	0,527	0,448	0,390	0,346	0,312	0,286	0,258
3000	0,746	0,632	0,551	0,490	0,443	0,405	0,373	0,347
4000	—	0,708	0,628	0,567	0,517	0,477	0,443	0,415
5000	—	—	0,690	0,628	0,582	0,541	0,502	0,476
6000	—	—	—	0,680	0,631	0,588	0,553	—
7000	—	—	—	—	0,674	0,632	—	—
8000	—	—	—	—	0,721	—	—	—

Таблица 2

Наибольшие расхождения полученных значений плотности азота с имеющимися

$$\text{экспериментальными данными } \Delta\rho = \frac{\rho_{\text{авт}} - \rho_{\text{экс}}}{\rho_{\text{авт}}} \cdot 100$$

Литературный источник, давление, температура	$\rho_{\text{авт}}$	$\rho_{\text{экс}}$	$\Delta\rho, \%$	Литературный источник, давление, температура	$\rho_{\text{авт}}$	$\rho_{\text{экс}}$	$\Delta\rho, \%$
(⁶), 1500 атм, 300° C	0,468	0,471	-0,81	(⁹), 2000 бар	0,594	0,597	-0,51
(⁷), 1000 бар	0,213	0,215	-0,94	(¹⁰), 1000 бар	0,203	0,196	3,45
(⁸), 3000 атм	0,746	0,741	0,67				

Водара, отклонение которых от полученных результатов при давлениях ниже 3 килобар и температурах выше 500° C превышает погрешность эксперимента, причем это отклонение возрастает с ростом температуры и достигает при давлении 1 килобар и температуре 1000° C величины 3,5%.

Институт физики высоких давлений
Академии наук СССР
Академгородок Московской области

Поступило
20 X 1975

ЛИТЕРАТУРА

- ¹ Ю. П. Бирюков, Т. П. Гавриленко и др., *Аэродинамика* (Тр. I сибирской конференции по аэродинамике), Новосибирск, 1973. ² Л. Ф. Верещагин, Я. А. Калашников, *ЖТФ*, т. 25, № 8, 1508 (1955). ³ А. А. Антанович, М. А. Плотников, Г. Я. Савельев, *Журн. прикл. мех. и технич. физ.*, т. 3, 99 (1969). ⁴ Н. А. Зыков, Р. М. Севастьянов, *Матер. к расчету газодинамических установок с высокими параметрами торможения азота*, Тр. Центр. аэрогидродинамич. ин-та, в. 1329 (1971). ⁵ М. А. Плотников, А. А. Антанович и др., *Инж.-физич. журн.*, т. 20, № 4, 734 (1971). ⁶ Д. С. Цикаис, Е. В. Поляков, *ДАН*, т. 176, № 2, 308 (1967). ⁷ А. А. Вассерман, Я. З. Казавчинский, В. А. Рабинович, *Теплофизические свойства воздуха и его компонентов*, М., 1966. ⁸ F. Din, *Thermodynamic Functions of Gases*, v. 3, London, 1961. ⁹ S. L. Robertson, S. E. Babb, G. I. Scott jr., *J. Chem. Phys.*, v. 50, 4560 (1969). ¹⁰ P. Malbrunot, B. Vodar, *Physica*, v. 66, 351 (1973).