

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 $1000 - 3000^\circ \text{K}$ ⁽¹⁾.

Однако подавляющее большинство экспериментальных работ по определению термодинамических свойств газов при высоких давлениях ограничено температурами $300 - 400^\circ \text{C}$. 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 $400 - 1800^\circ \text{K}$. Исследуемый 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 термометрами, 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-

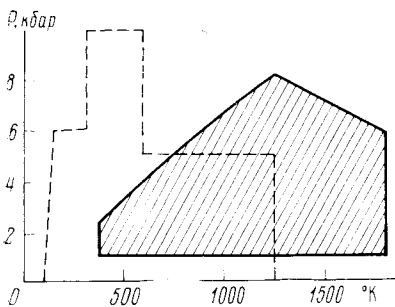


Рис. 1

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

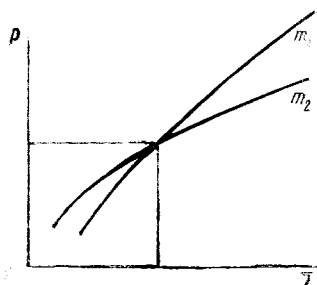


Рис. 2

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 пиритом алюминия.

Для определения количества газа, заключенного в аппарате, в каждом из двух опытов использовалась калиброванная емкость объемом 41,95 л. После окончания эксперимента газ расширился 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° К	600° К	800° К	1000° К	1200° К	1400° К	1600° К	1800° К
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

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

Литературный источник, давление, температура	$\rho_{\text{авт}}$	$\rho_{\text{эксп}}$	$\Delta\rho, \%$	Литературный источник, давление, температура	$\rho_{\text{авт}}$	$\rho_{\text{эксп}}$	$\Delta\rho, \%$
(⁶), 1500 атм, 300° С	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° С превышает погрешность эксперимента, причем это отклонение возрастает с ростом температуры и достигает при давлении 1 килобар и температуре 1000° С 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. Циклис, 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. J. Scott jr., J. Chem. Phys., v. 50, 4560 (1969).
- ¹⁰ P. Malbrunot, B. Vodar, Physica, v. 66, 351 (1973).