ТЕПЛОФИЗИКА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
Том 17 1979 № 1

УДК 532.13

ИЗМЕРЕНИЕ ВЯЗКОСТИ ПАРОВ РТУТИ И АНАЛИЗ ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Люстерник В. Е.

В целях уточнения имеющихся данных по вязкости разреженных паров ртути проведено экспериментальное исследование в интервале температур 694–1054 К и давлений 0,5–1 атм. Применен капиллярный кварцевый вискозиметр с непрерывной циркуляцией вещества. Проведена тщательная калибровка прибора. Погрешность опытных данных (с доверительной вероятностью 0,95) с учетом всех поправок метода составила ±1,2%. Рассмотрены все ранее опубликованные значения как вязкости, так и теплопроводности разреженных паров ртути. С помощью новых опытных точек обозначена группа хорошо согласующихся между собой результатов измерений разных авторов, описывающая вязкость и теплопроводность этих паров от точки кипения до 2000 К.

В монографии [1], содержащей детальный анализ исследований свойств ртути, указано на необходимость проведения новых исследований свойств переноса, в том числе и вязкости паров этого вещества в разреженном состоянии.

Для настоящего исследования применен капиллярный вискозиметр непрерывного действия, использовавшийся ранее для измерения вязкости агрессивных паров, а также углеводородов и водяного пара [2]. Этот вискозиметр представляет собой замкнутый кварцевый герметичный контур циркуляции, включающий генератор пара, измерительный капилляр, конденсатор пара, объемный расходомер жидкости и линию слива конденсата в генератор пара. Перепад давления на капилляре задается с помощью температурных режимов в генераторе пара и конденсаторе, а также давлением инертного газа (аргона) в конденсаторе. Этот перепад давления ΔH измеряется с помощью катетометра КМ-8 по высоте столба конденсата в линии слива. Погрешность измерения ΔH составляет ±0,1 мм. Контрольный объем V_0 объемного расходомера периодического действия калиброван путем взвешивания по ртути и по воде.

Согласование калибровок по ртути и воде лежит в пределах 0,02%: $V_0=1{,}1066$ см$^3\pm0{,}0002$ см^3.

В соответствии с разработанной в [2] методикой измерения расчетная формула Пуазейля — Гагена для примененного типа вискозиметра с учетом поправки на кинетическую энергию имеет вид

$$\eta=38{,}5\frac{r^4}{L}\frac{\Delta H}{V_0}\tau\gamma_п-0{,}044\frac{V_0}{L}\frac{\gamma_ж}{\tau}, \qquad (1)$$

где η — вязкость исследуемого пара, 10^{-7} Н·с/м^2; r и L — радиус и длина капилляра при температуре опыта, см; τ — время заполнения контрольного объема расходомера конденсатом, с; $\gamma_п$ и $\gamma_ж$ — плотность исследуемого пара при условиях опыта и плотность жидкости (конденсата) при комнатной температуре, г/см^3.

Для определения давления пара при условиях опыта используется образцовый пружинный вакуумметр. Этот вакуумметр присоединен к кон-

туру после конденсатора, т. е. на участке, содержащем только газообразный аргон. В результате индивидуальных градуировок вакуумметра по прибору высокого класса получена расчетная формула

$$P=B-0{,}01015D[1+0{,}0008(t-20)], \qquad (2)$$

где P — действительное абсолютное давление пара за капилляром, ат; B — величина атмосферного давления, ат; D — показание вакуумметра, деления шкалы; t — комнатная температура, °С. В квадратных скобках дана температурная паспортная поправка вакуумметра.

Среднее давление в капилляре составляет

$$P_{ср}=P+\gamma_{ж}\frac{\Delta H}{2}\cdot 10^{-4}, \text{ ат.}$$

Погрешность измерения давления указанным прибором во всем рабочем диапазоне давлений не выходит за пределы 0,001 ат, что составляет 0,1—0,2%.

Температура в термостате генератора пара поддерживается постоянной с точностью ±0,01° С с помощью фототиратронного реле, управляемого от платинового термометра сопротивления термостата, включенного в мостовую схему. Указанная точность достаточна для поддержания стабильности давления в парогенераторе и во всем контуре вискозиметра.

Второй аналогичный регулятор поддерживает постоянство температуры в термостате капилляра. Температура капилляра устанавливается одинаковой по всей его длине с точностью ±0,5° С при помощи секционированного нагревателя и измеряется подвижной платинородий-платиновой термопарой, спай которой перемещается, оставаясь постоянно в тепловом контакте с капилляром. Градуировка термопары до и после опытов показала ее хорошую стабильность и соответствие стандартной градуировочной таблице. Это соответствие в пределах точности градуировки передается соотношением

$$E_{ст}=1{,}0061\,E_{к}, \qquad (3)$$

где $E_{ст}$ и $E_{к}$ — термо-э.д.с. по стандартной градуировочной таблице для термопар ПП и по показаниям подвижной термопары капилляра соответственно. Температура опыта определяется путем усреднения ее значений по длине капилляра. Время заполнения контрольного объема расходомера измерялось с помощью секундомера СД-51 с инструментальной погрешностью 0,2 с. Ошибки визуальной регистрации момента достижения мениском нижней и верхней отметок уровня также составляет по 0,2 с.

Важным условием получения надежных значений вязкости является определение диаметра капилляра d. Диаметр рабочего кварцевого капилляра определялся как прямым, так и косвенным методами.

1) При отборе кварцевого капилляра для монтажа рабочего участка (L=22,65 см) проводилось измерение на сколе каждого конца для двух взаимно перпендикулярных диаметров (для контроля эллиптичности и конусности) и получено: первый конец 0,775·0,780 мм, второй конец 0,760·0,770 мм; $d_{ср}$=0,771 мм.

2) После проведения опытов и демонтажа капилляра проведено десятикратное измерение его объема путем взвешивания массы ртути, заполнявшей его по всей длине. Проведены две серии заполнений и взвешиваний: d_1=0,7761 мм, d_2=0,77607 мм.

3) На действующей установке проведены калибровочные опыты на водяном паре при давлении 0,5 и 1 атм и температурах 439 и 538 К, где имеющиеся в литературе многочисленные данные по вязкости согласуются между собой в пределах 0,5—1,0% [3]. При указанных выше значениях

V_0, L и вязкости водяного пара на основании расчетной формулы (1) получено среднее значение $d_{ср}$=0,778 мм с максимальным разбросом ±0,5% (по d^4).

Последнее значение наиболее надежное, поскольку включает в себя весь комплекс параметров прибора и позволяет устранить некоторые систематические погрешности измерения ΔH, давления и температуры. Кроме того, калибровочные опыты проведены в рабочем диапазоне значений чисел Рейнольдса и, следовательно, учитывали ту же поправку на концевые эффекты, что и в опытах со ртутью. Это поправка варьировалась с помощью изменения перепада давления, скорости протекания, а также плотности газа и составляла от 0,5 до 5% от измеряемой величины. Результаты совпадали с точностью до ±0,2%.

Экспериментальные значения вязкости ртути $\eta \cdot 10^4$ Н·с/м²

T, К	η	T, К	η
694	0,704	893	0,945
693	0,706	894	0,935
693	0,706	955	1,020
810	0,852	956	1,051
810	0,846	961	1,012
817	0,858	1050	1,087
831	0,873	1054	1,099
882	0,935		

Поправка на скольжение при всех режимах работы вискозиметра оказалась пренебрежимо малой ввиду того, что отношение длины свободного пробега молекул l к радиусу капилляра r составляло $l/r \leqslant 10^{-4}$.

В опытах исследована ртуть марки Р-1 с чистотой не хуже 99,9%. Необходимые для расчетов значения плотности жидкой и газообразной ртути взяты из работы [1].

Результаты измерений представлены в таблице.

Погрешность определения вязкости паров ртути (с доверительной вероятностью 0,95) составляла ±1,2%.

Поправка на концевые эффекты в опытах со ртутью находилась на уровне 1–2,5% от измеряемого значения. Полученные опытные точки и все литературные данные по вязкости паров ртути приведены на рисунке.

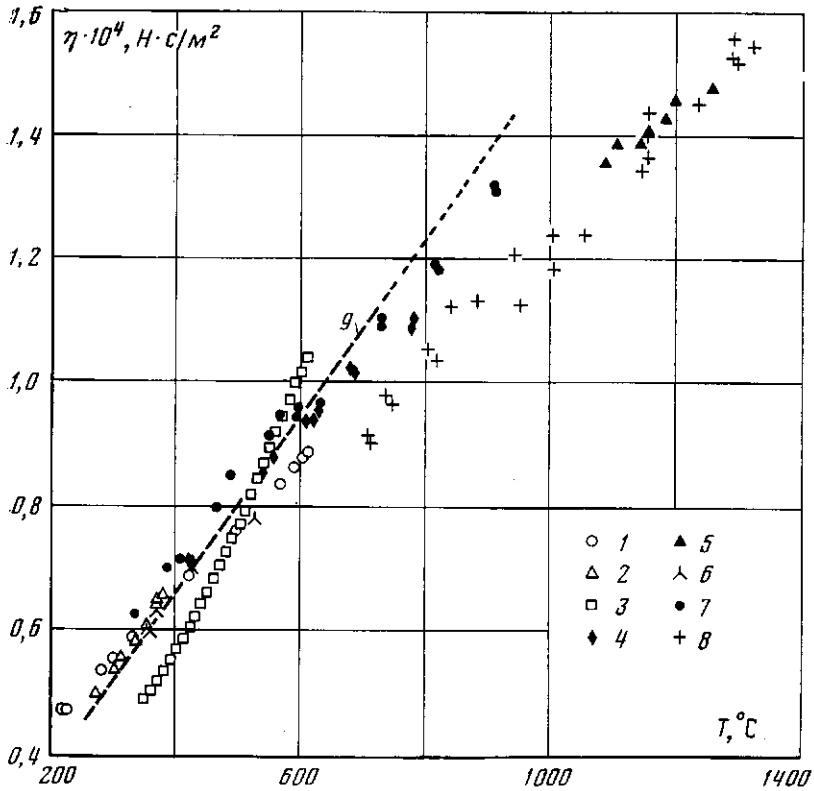
Кроме рассмотренных ранее в [1] работ Коха, Брауне, Баша и Вентцеля и Халилова и нашего исследования, в настоящее время имеются еще две — Франка и Хензела [4] и Тимрота с сотр. [5]. Работа [4] выполнена методом затухания колебаний тигля, заполненного парами ртути, и имеет погрешность порядка ±10%. Данные в [5] получены методом затухания колебания плоского диска и имеют погрешность ±1,5%.

Кроме того, в настоящее время известны работы [6–8], где проведено измерение коэффициента теплопроводности паров ртути. Эти измерения выполнены в том же диапазоне температур. Вязкость и теплопроводность одноатомных разреженных газов связаны известным из молекулярно-кинетической теории соотношением [6]

$$\eta = \lambda / c_V \cdot 2{,}5 \quad \text{Н·с/м}^2, \tag{4}$$

где λ — коэффициент теплопроводности, Вт/м·град; c_V — изохорная теплоемкость, Дж/кг·град.

Рассчитанные по этой формуле значения вязкости при использовании данных работ [6–8] также представлены на рисунке. В [8] приведена аналитическая зависимость от температуры. Из рассмотрения совокупности всех данных следует, что существующий экспериментальный материал по теплопроводности имеет большой разброс. Например, различие в данных [6, 7] достигает 20%. Результаты измерений [6, 8] до температуры 700 К хорошо согласуются как между собой, так и после пересчета по (4) с нашими экспериментальными данными. Максимальное различие при 700 К составляет 4%. Следует отметить, что представленные на рисунке данные работы [8] соответствуют измерениям в парах ртути на линии насыщения. Поэтому уже при температуре 800 К, когда давление насы-



Экспериментальные и расчетные значения вязкости паров ртути: *1* – данные Браупе, Баша и Вентцеля из [1]; *2* – данные Коха из [1]; *3* – данные Халилова из [1]; *4* – опытные данные автора; *5* – данные [4]; *6* – данные [5]; *7* – расчет по данным [6]; *8* – расчет по данным [7]; *9* – расчет по данным [8]

щенных паров достигает 10 ат, газ не может рассматриваться как разреженный и пересчет теплопроводности в вязкость по соотношению (4) становится некорректным (соответствующая часть кривой *9* на рисунке обозначена мелким пунктиром).

Учитывая наличие довольно большого массива данных, для них целесообразно применить методы статистической обработки.

Институт высоких температур
Академии наук СССР

Поступила в редакцию
28 III 1978

ЛИТЕРАТУРА

1. *М. П. Вукалович, А. И. Иванов, Л. Р. Фокин, А. Т. Яковлев.* Теплофизические свойства ртути. Изд. стандартов, 1971.
2. *А. Г. Жданов, В. Е. Люстерник, Д. Л. Тимрот.* ИФЖ, *15*, № 6, 1120, 1968.
3. *М. П. Вукалович, С. Л. Ривкин, А. А. Александров.* Таблицы теплофизических свойств воды и водяного пара. Изд. стандартов, 1969.
4. *E. U. Frank.* Ber. Buns. Phys. Chem., *79*, № 10, 889, 1975.
5. *Д. Л. Тимрот, М. А. Середницкая, М. С. Беспалов, С. А. Трактуева.* ТВТ, *17*, № 1, 1979.
6. *Н. В. Варгафтик, Л. В. Якуш.* ТВТ, *8*, № 6, 1182, 1970.
7. *Л. Заркова, В. Стефанов.* ТВТ, *14*, № 2, 277, 1976.
8. *J. R. Siegel, C. F. Bonilla.* 7th Symp. on Thermophys. Prop. Abstracts, NBS, Gaithersburg, Maryland, USA, 1977, p. 168.