

# Math-Net.Ru

Общероссийский математический портал

Л. И. Чернеева, В. Н. Проскурин, Метод измерения давления насыщенного пара высококипящих веществ, *ТВТ*, 1972, том 10, выпуск 3, 674–677

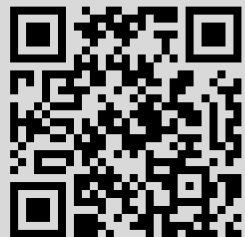
Использование Общероссийского математического портала Math-Net.Ru подразумевает, что вы прочитали и согласны с пользовательским соглашением

<http://www.mathnet.ru/rus/agreement>

Параметры загрузки:

IP: 18.97.9.168

23 января 2025 г., 06:01:38



ток, на котором происходит поверхностное кипение при сложном законе изменения  $q$ , заменяется при этом эквивалентным участком с равномерным распределением удельного теплового потока, равного среднеинтегральному значению  $\bar{q}$  на кипящем участке.

Нами проделан расчет  $\Delta r_{\text{кин}}$  по предложенной в [1] методике для случая сложного распределения теплового потока. Для определения длины кипящего участка  $l_{\text{кин}}$  необходимо знать температуры начала  $t_{\text{н.к}}$  и прекращения кипения  $t_{\text{к.к}}$ . Для этого рассчитывались в 17 сечениях по локальным значениям  $q$  соответствующие величины  $t_{\text{н.к}}$  на участке с возрастающим тепловым потоком и величины  $t_{\text{к.к}}$  на участке с убывающим тепловым потоком, показанные на рис. 2.

Температура начала кипения на эквивалентном участке для равномерного распределения теплового потока естественно получается иной, чем действительная  $t_{\text{н.к}}$  на участке со сложным законом изменения  $q$ .

Опытные и расчетные значения перепада давления (рис. 3) согласуются в основном в пределах  $\pm 15\%$ . Следовательно, полученная в работе [1] методика расчета перепада давления для монотонно убывающего или возрастающего теплового потока может применяться в первом приближении и для произвольного распределения удельного теплового потока по длине трубы.

Всесоюзный теплотехнический институт  
им. Ф. Э. Дзержинского

Поступило в редакцию  
29 VII 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Н. В. Тарасова, В. И. Хлопушин, Л. В. Воронина. Теплоэнергетика, № 6, 1968.
2. Д. А. Лабунцов, Б. А. Кольчугин, Э. А. Захарова. Теплоэнергетика, № 4, 1965.
3. Г. Г. Бартоломей, В. М. Чантурян. Теплоэнергетика, № 2, 1967.
4. Раухани. Теплопередача, № 3, 1968.

УДК 536.423.15

### МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ ДАВЛЕНИЯ НАСЫЩЕННОГО ПАРА ВЫСОКОКИПАЮЩИХ ВЕЩЕСТВ

*Л. И. Чернеева, В. И. Проскурии*

Измерение давления насыщенного пара высококипящих веществ в области высоких температур и давлений известными статическими и динамическими методами — весьма сложная и трудоемкая задача. Основной сложностью статического метода является термостатирование системы: жидкость — пар, динамического (метод точек кипения) — размещение термопары вблизи уровня кипения жидкости и проведение измерений при условии слабой конденсации пара и при отсутствии в паре примеси инертного газа [1—3].

Разработанный метод относится к числу динамических и позволяет достаточно просто обеспечить необходимые условия измерения температуры насыщенного пара на всей кривой насыщения, за исключением области низких давлений. Сущность метода заключается в измерении температуры внутри находящейся под уровнем жидкости измерительной ячейки, в которой насыщенный пар, поступающий снизу при кипении жидкости, конденсируется из-за отвода тепла к подогретой жидкости, окружающей ячейку с боковой и верхней сторон. Заполнение ячейки насыщенным паром определяется по постоянству температуры при постоянном внешнем давлении и изменении количества подводимого к жидкости тепла.

Принципиальная схема измерительного устройства изображена на рис. 1. В нижней части столба исследуемой жидкости 5, находящейся в сосуде 1, расположен перевернутый вверх дном стакан 2, который образует измерительную ячейку, заполняющуюся насыщенным паром при кипении жидкости под ним. Использование перевернутого стакана, находящегося под уровнем жидкости и заполняющегося паром, было заимствовано из работы [4], в которой давление насыщенного пара жидкого хлорида висмута определялось по величине снижаемого давления аргона в момент визуально наблюдаемого появления пара в кварцевом перевернутом стакане, а температура насыщенного пара определялась на основании показаний термопары, установленной на наружной поверхности стенки сосуда с исследуемой жидкостью. В отличие от [4] внутри перевернутого стакана введены термопара 4 и дополнительный стакан 3 с отверстием в боковой стенке. Дополнительный стакан установлен так, что его дно находится выше нижнего края перевернутого стакана, а чувствительный элемент термопары расположен немного выше отверстия в стенке стакана. Тепло к столбу жидкости подводится снизу, от расположенного под дном сосуда электрического нагревателя 6, а боковая поверхность сосуда охлаждается. Такая схема подвода

и отвода тепла позволяет довести жидкость до кипения на дне сосуда, в то время как боковая поверхность и дно перевернутого стакана будут омываться недогретой жидкостью. При закипании жидкости под перевернутым стаканом он заполняется насыщенным паром, а из дополнительного стакана жидкость сливается через отверстие в боковой стенке и термопаре оказывается расположенной над уровнем остающегося в дополнительном стакане некоторого количества жидкости. В процессе кипения жидкости под перевернутым стаканом поступающий в него насыщенный пар конденсируется из-за отвода тепла к недогретой жидкости снаружи стакана. Дополнительный стакан с остающимся в нем небольшим количеством жидкости экранирует термопару от поверхности кипящей под перевернутым стаканом жидкости и от стенки перевернутого стакана.

Заполнение стаканов насыщенным паром и достижение равновесия определяются по установлению постоянной температуры  $T_s$  внутри стаканов при постоянном давлении инертного газа и переменном ко-

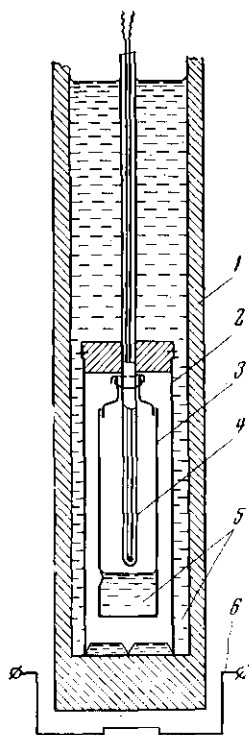


Рис. 1

Рис. 1. Схема измерительного устройства

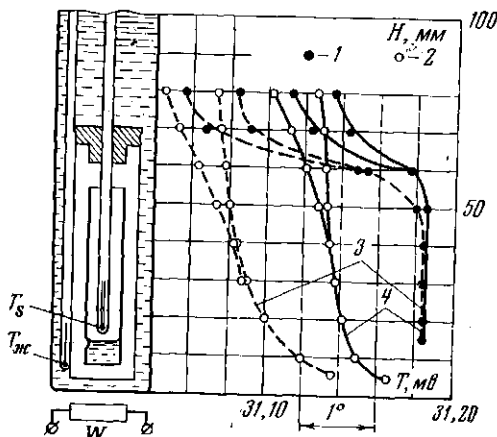


Рис. 2

Рис. 2. Распределение температур в жидкости и паре при постоянном внешнем давлении:

1 —  $T_s$ ; 2 —  $T_ж$ ; 3 —  $W_1 = 900$  вт; 4 —  $W_2 = 1250$  вт

личестве подводимого тепла. Величина  $T_s$  принимается за температуру насыщенного пара, а давление определяется как сумма измеренного значения давления инертного газа и гидростатического давления столба жидкости на уровне нижнего края перевернутого стакана.

В области 700—800° С было проведено измерение распределения температур в заполненных насыщенным паром калия стаканах и в жидком калии снаружи перевернутого стакана. Температура измерялась хромель-алюмелевыми микротермопарами ФЭИ, которые градуировались сравнением с платина-платинородиевой термопарой. Результаты одного из опытов приведены на рис. 2. Температура пара в стаканах  $T_s = 31,184$  мв ( $\sim 749^\circ$  С) остается постоянной при постоянном внешнем давлении  $p = 0,93$  атм и изменении мощности нагревателя в 1,4 раза: от  $W_1 = 900$  вт до  $W_2 = 1250$  вт. Температура жидкости снаружи перевернутого стакана  $T_ж$  ниже температуры пара  $T_s$ , разность  $\Delta T = T_s - T_ж$  уменьшается с увеличением мощности нагревателя: при  $W_1 = 900$  вт,  $\Delta T = 2,5$  град и при  $W_2 = 1250$  вт,  $\Delta T = 1$  град. Следовательно, в перевернутом стакане должна происходить конденсация пара, в процессе которой и проводится измерение температуры насыщенного пара  $T_s$ .

Проверка метода проведена путем измерения давления насыщенного пара калия и сравнения полученных данных с результатами других работ, выполненных иными методами. В интервале 750—1570° С и 0,94—68 атм были проведены две серии опытов с разными заполнениями и термопарами и получено 195 точек (см. таблицу). Чистота калия составляла 99,98% (0,02% примеси натрия). Для создания давления использовался аргон, очищенный пропускаям через медную стружку при 500° С, и столб цезия при 350° С. Измерительное устройство для обеспечения маностатичности соединялось с демпферным баллоном емкостью 35 л. В молибденовом сосуде диаметром

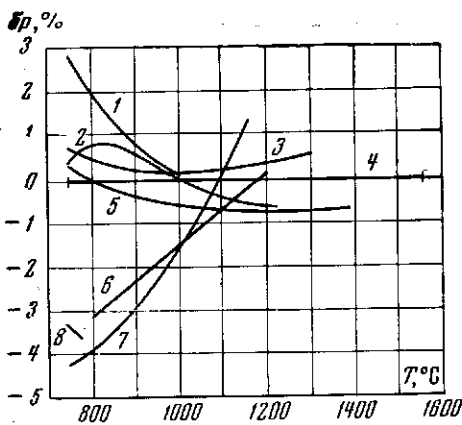


Рис. 3. Сравнение с данными различных работ:

1 — [9]; 2 — [3]; 3 — [8]; 4 — данная работа;  
5 — [7]; 6 — [11]; 7 — [10]; 8 — [12]

20 мм устанавливался перевернутый стакан диаметром 16 и высотой 70 мм, внутри которого располагалась гильза термопары диаметром 6 мм, а также дополнительный стакан диаметром 12 и высотой 50 мм. Стаканы и гильза изготовлены из молибдена. Количество калия в опытах равнялось 16,5 и 18,5 г. Сосуд заполняли жидким калием при вакууме  $10^{-4}$  мм рт. ст., температуру измеряли образцовыми платина-платинородиевыми термопарами второго разряда, которые градуировались во ВНИИКСМИП. Давление аргона измеряли ртутным манометром до 2,7 кгс/см<sup>2</sup> и образцовыми пружинными манометрами класса 0,16.

За температуру насыщенного пара принималась постоянная температура при постоянном давлении аргона и изменении мощности нагревателя на  $\pm 20\%$  (в отдельных опытах на  $\pm 30\%$ ) от некоторой величины мощности, при которой наблюдалось прекращение роста температуры калия внутри стаканов в процессе разогрева.

Полученные в интервале 750—1570°С данные описываются уравнением, коэффициенты которого определены методом наименьших квадратов:

$$\lg p = 6,19146 - (4557,93 / T) - 0,58626 \lg T,$$

где  $p$  — атм,  $T$  — °К.

Погрешность измерения температуры принята равной: 1—1,1 град до 1300°С по [5]; 3,4 град при 1400°С и 3,6 град при 1500°С по допускаемому отклонению термоэ.д.с. платина-платинородиевых термопар от стандартной градуировки [6].

Калий (экспериментальные точки)

$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$	$T_s, ^\circ\text{C}$	$P_s, \text{атм}$
I серия						II серия					
747,3	0,914	945,4	4,373	1238,9	20,61	751,0	0,947	967,8	5,053	1271,3	23,45
755,3	0,986	955,9	4,674	1253,4	21,97	756,4	0,998	977,2	5,364	1276,8	24,13
756,9	1,003	964,7	4,953	1260,7	22,58	759,1	1,024	981,3	5,491	1283,4	24,65
758,0	1,015	970,0	5,189	1269,5	23,46	763,2	1,064	974,7	5,301	1298,1	26,10
765,5	1,085	971,8	5,185	1277,4	24,03	768,6	1,118	998,4	6,144	1306,3	26,88
771,4	1,145	979,3	5,428	1289,2	25,19	774,4	1,173	1018,2	6,892	1312,5	27,57
776,7	1,197	986,0	5,710	1306,0	26,82	779,5	1,229	1030,9	7,414	1324,4	28,89
782,2	1,257	1009,1	6,543	1308,5	27,19	784,7	1,284	1044,5	8,018	1339,1	30,48
790,4	1,352	1026,7	7,228	1317,7	28,14	794,2	1,393	1061,3	8,816	1355,3	32,30
793,3	1,391	1035,0	7,595	1331,3	29,66	797,1	1,431	1072,9	9,367	1372,5	34,33
799,3	1,457	1057,0	8,586	1347,4	31,35	803,8	1,516	1082,0	9,811	1382,7	35,59
805,8	1,540	1067,8	9,099	1363,6	33,30	814,1	1,653	1087,0	10,06	1390,4	36,69
808,8	1,577	1077,9	9,604	1379,4	35,24	815,4	1,669	1095,0	10,50	1395,7	37,29
811,1	1,617	1082,3	9,826	1389,0	36,38	818,7	1,734	1107,1	11,19	1406,4	38,82
819,5	1,746	1082,3	9,826	1395,9	37,39	824,8	1,820	1122,1	12,07	1410,5	39,23
820,6	1,746	1090,7	10,27	1402,7	38,18	826,1	1,828	1135,5	12,87	1424,2	41,08
821,3	1,752	1100,8	10,82	1414,0	39,77	826,4	1,826	1145,1	13,44	1425,0	41,10
830,9	1,902	1114,9	11,63	1414,0	39,77	831,1	1,905	1156,8	14,23	1440,0	43,21
831,2	1,908	1129,7	12,51	1418,0	40,10	836,0	1,979	1160,9	14,52	1446,4	44,18
834,7	1,969	1140,1	13,14	1431,0	42,11	839,0	2,033	1168,4	15,03	1454,5	45,36
838,3	2,013	1150,3	13,79	1433,3	42,23	844,0	2,111	1169,7	15,20	1455,2	45,56
846,8	2,158	1158,4	14,35	1446,8	44,28	852,4	2,249	1172,7	15,37	1462,5	46,26
847,5	2,180	1162,4	14,63	1451,0	44,88	854,6	2,297	1178,8	15,82	1466,9	47,04
857,0	2,332	1166,2	14,83	1459,0	45,94	858,4	2,354	1180,0	15,91	1474,0	48,07
861,8	2,423	1173,2	15,39	1462,8	46,36	867,1	2,524	1186,0	16,36	1487,4	50,01
871,7	2,611	1174,2	15,50	1467,2	47,10	875,9	2,686	1194,3	16,97	1504,8	52,59
871,7	2,628	1179,1	15,81	1467,2	47,10	896,4	3,123	1199,9	17,47	1522,0	55,46
885,4	2,885	1180,4	15,92	1480,6	49,04	905,5	3,337	1212,0	18,29	1528,0	56,42
904,9	3,320	1185,9	16,32	1495,8	51,30	919,7	3,656	1215,0	18,56	1537,8	58,17
914,0	3,527	1193,3	16,93	1513,0	54,01	923,4	3,758	1221,4	19,09	1551,3	60,46
920,8	3,691	1207,7	18,02	1526,6	56,40	941,0	4,238	1232,1	20,04	1568,5	63,56
935,4	4,084	1217,4	18,76	1531,5	57,37	950,8	4,524	1246,0	21,26		
		1226,4	19,50	1540,0	59,01	950,3	4,813	1261,5	22,71		

Погрешность определения давления насыщенного пара, вычисленная как сумма погрешностей манометров, погрешности расчета гидростатического давления и погрешности отнесения, не превышают 1,2—0,7% при температурах до 1400°C и 1,3% при температурах выше 1400°C. Разброс точек относительно сглаживающей кривой не превосходит 0,5% в области нормальной точки кипения и 0,7% при температурах 800—1570° С.

Сравнение полученных данных с результатами других работ представлено на рис. 3. Наименьшее расхождение имеет место с данными [7, 8] — не более 0,8% при всех температурах. Данные [9] в области нормальной точки кипения лежат на 2,8% выше, но с увеличением температуры расхождение уменьшается. Данные [10—12] в области нормальной точки кипения лежат на 3—4% ниже. С увеличением температуры расхождение с [10, 11] уменьшается и в области 1000—1200° С не превышает 1%. Полученные результаты хорошо согласуются с расчетно-теоретическими данными [3]: расхождения не превышают 0,9% при низких температурах и уменьшаются до 0,7% с ростом температуры, что меньше погрешности как эксперимента, так и расчета.

Малые расхождения результатов, полученных предложенным методом, с данными наиболее тщательно выполненных различными методами экспериментальных работ [7—9] и расчетно-теоретической работы [3] позволяют сделать вывод, что в предложенном методе отсутствуют существенные методические ошибки, и полученные результаты не содержат значительных систематических ошибок. Малый разброс экспериментальных точек, который меньше расчетной погрешности измерений, свидетельствует об отсутствии случайных ошибок и подтверждает, что приведенная точность данных по давлению насыщенного пара калия не превышена.

Энергетический институт  
им. Г. М. Кржижановского

Поступило в редакцию  
1 IX 1971

#### ЛИТЕРАТУРА

1. М. М. Попов. Термометрия и калориметрия. Изд. МГУ, 1954.
2. А. Н. Несмеянов. Давление пара химических элементов. Изд. АН СССР, 1961.
3. Э. Э. Шпильрайн, К. А. Якимович, Е. Е. Тоцкий, Д. Л. Тимрот, В. А. Фомин. Теплофизические свойства щелочных металлов. Изд. стандартов, 1970.
4. J. W. Johnson, W. J. Silva, D. Cubicciotti. *J. Phys. Chem.*, **69**, № 11, 3916, 1965.
5. Приборы для измерения температуры и их поверка. Машгиз, 1955.
6. Термомпары. Градуировочные таблицы при температуре свободных концов 0° С. ГОСТ 3044—61.
7. J. P. Stone, C. T. Ewing, J. R. Spann, E. W. Steinkuller, D. D. Williams, R. R. Miller. *J. Chem. Eng. Data*, **11**, 315, 1966.
8. Э. Э. Шпильрайн, Э. В. Никаноров. В сб. Теплофизические свойства газов. «Наука», 1970, стр. 141.
9. M. M. Makansi, M. Madsen, W. H. Selke, C. F. Bonilla. *J. Chem. Phys.*, **60**, 128, 1956.
10. J. F. Walling. *J. Phys. Chem.*, **67**, 1380, 1963.
11. D. V. Rigney, S. M. Karleuer, R. E. Cleary. *NSA*, **19**, 22, 42854, 1965 (цит. по [3]).
12. Ю. К. Виноградов, Л. Д. Воляк. Теплофизика высоких температур, **4**, 50, 1966.

УДК 536.3

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ СПЕКТРАЛЬНОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНОЙ СПОСОБНОСТИ МЕТАЛЛОВ

*Л. Н. Латышев, В. Я. Чеховской, Е. Н. Шестаков*

Для исследования спектральной излучательной способности металлов используется метод непосредственного сравнения яркостей поверхности образца — трубки и модели черного тела — отверстия в боковой стенке трубки [1]. Нормальная спектральная излучательная способность (при наличии линейного приемника излучения) определяется выражением

$$\epsilon_n(\lambda_e T) = (b_{\lambda e T}) / (b_{\lambda e T}^0) = J_f / J_f^0, \quad (1)$$