

УДК 536.7+546.49 (02)

## Уравнение состояния насыщенных и перегретых паров ртути до 1600 К и 100 МПа

Л.Р. Фокин, В.Н. Попов

Объединенный институт высоких температур РАН

С.П. Наурзаков

РНИЦ «Курчатовский институт»

Equation of State for Saturated and Superheated Mercury Vapor up to 1600 K and 100 MPa

L.R. Fokin, V.N. Popov, S.P. Naurzakov

*Ранее на Портале [thermophysics.ru](http://thermophysics.ru) в разделе справочнов НВ.title гл.9 ртуть были размещены краткие таблицы термодинамических свойств насыщенных паров ртути в интервале температур 200 -1450 °С. Свойства пара были рассчитаны с помощью уравнения состояния с тремя вириальными коэффициентами. В дальнейшем в ОИВТ РАН работа по уравнению состояния паров ртути была продолжена и результаты были сообщены в 2010 г. на Межотраслевом семинаре «Тяжелые жидкометаллические теплоносители в быстрых реакторах» и представлены для публикации в редакцию журнала Теплофизика высоких температур. В труднодоступных трудах семинара (Компакт диск, Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 2010, с. 160-176) и в рукописи статьи в журнале многие важные детали, в частности, подробный перечень и анализ исходных данных, детали алгоритма совместной обработки опытных данных, процедура построения расширенной матрицы ошибок параметров и сами таблицы свойств представлены в сокращенном виде. На Портале помещены расширенные материалы этой работы, в частности, подробные таблицы термодинамических свойств насыщенного (по круглым температурам в шкалах Кельвина и Цельсия) и перегретого пара.*

### Аннотация

Для диэлектрического ртутного пара при плотности  $< 3 \text{ г/см}^3$  выполнена совместная обработка опытных данных о сжимаемости, скорости звука, давлениям насыщения, а также данных по вязкости и теплопроводности разреженного пара. Расчет термодинамических свойств проведен с помощью уравнения состояния с тремя вириальными коэффициентами. Для определения этих коэффициентов использован трехпараметрический потенциал Леннарда – Джонса  $m = 6$ . С помощью нелинейного метода наименьших квадратов определены 8 параметров расширенной модели, в частности, три параметра потенциала. Рассчитаны таблицы термодинамических свойств на линии насыщения и для перегретого пара при  $T < 1600 \text{ К}$  и давлениях  $< 100 \text{ МПа}$ . Предложенные внутренне согласованные оценки расширенной (доверительной) погрешности справочных данных с учетом как случайных, так и систематических погрешностей исходных данных. Обсуждаются противоречия между восстановленным потенциалом взаимодействий и потенциалами, полученными на основе спектроскопических данных и результатов квантово – механических расчетов.

### Введение

Ртуть традиционно является предметом интересов в атомной энергетике. Более 40 лет тому назад на кафедре Теоретических основ теплотехники под руководством проф. М.П. Вукаловича была подготовлена монография по теплофизическим свойствам ртути [1], которая включала таблицы термодинамических свойств пара до 100 бар и 800 С на линии насыщения

и до 200 бар и 2000 С в перегретом паре. Уравнение состояния (УС) пара включало два вириальных коэффициента (ВК), причем второй ВК был рассчитан на основе потенциала Морзе, восстановленного при обобщении разнородных опытных данных. Эти таблицы термодинамических свойств вошли в справочник [2], включая его зарубежные издания [3], в ряд общетехнических справочников [4] и учебные руководства [5]. Работа по УС пара была продолжена и получила развитие в ИВТАН.

Уже во время подготовки и после выхода в свет монографии [1] были опубликованы результаты новых исследований теплофизических свойств ртутного пара, существенно расширивших базу экспериментальных данных. К их числу относятся:

- экспериментальные исследования электропроводности и плотности жидкости и пара, выполненные в Институте атомной энергии в широкой области температур и давлений до  $\sim 2050$  С и 500 МПа [6-10],
- исследования свойств паров ртути в ИВТАН: давлений насыщения [11], а также вязкости [12] и теплопроводности [13] в разреженном состоянии,
- исследование теплопроводности в Московском авиационном институте [14],
- исследования теплопроводности пара в Институте электроники БАН, София [15],
- измерения скорости звука в плотном паре, в частности, на изобарах  $30 \div 160$  МПа [16,],
- новые прецизионные определения упругости пара в области нормальной точки кипения [17] и работа 2010 г. [18].
- обширный цикл исследований электрофизических свойств и сжимаемости ртути в Германии, университет г. Марбург [19], результаты которых для пара обобщены в диссертации [20].

С учетом новых опытных данных в 2003 году было разработано УС с тремя ВК для насыщенного и перегретого пара ртути до 1650 К и 130 МПа [21] и соответствующие таблица термодинамических свойств в 2004 г. были размещены на портале [thermophysics.ru](http://thermophysics.ru) [22]. Портал включает вычислительный комплекс, который позволяет проводить расчеты термодинамических свойств паров ртути, а также рубидия и цезия при широкой вариации исходных данных [23]. В дальнейшем для ртути был существенно расширен и уточнен массив опытных данных, значения температур представлены в шкале МШТ- 90. Кроме того, в процедуру оценок неопределенности справочных данных был включен дополнительный блок моделирования систематических погрешностей отдельных серий опытных данных. Было показано, вероятно, впервые каким образом используя матрицу ошибок параметра можно с учетом ее недиагональных членов провести корректную оценку погрешности работы (перепада энтальпий) при изэнтропическом расширении пара

#### *Исходные данные*

Многие экспериментальные исследования свойств ртути относятся к числу уникальных работ, выполненных в прошлом столетии. Так именно для ртути впервые в 1915 г. Были проведены высокотемпературные измерения плотности жидкости и пара на линии насыщения [24] и в 1932 г определены значения критических температуры и давления [25] близкие к современным значениям [20]. В настоящей работе УС ртутного пара с тремя ВК получено при совместной обработке следующих данных: о сжимаемости ( $pVT$ ) пара, о давлениях насыщения  $p_s - T_s$ , о скорости звука  $a(p, T)$ , а также о вязкости  $\eta(T)$  и теплопроводности  $\lambda(T)$  разреженного пара. Перечень соответствующих источников с указанием интервала параметров, числа точек, погрешностей принятых нами на основании критического анализа данных, и кратких характеристик экспериментальных методов приведены в таблице 1.

Таблица 1

Исходные данные, включенные в обработку

№	Авторы, год, ссылка	Свойство	$\Delta T$ , К	Число точек	Погрешность	Примечания

1	Бендер, 1915, [24]	$pVT$ :	1503 – 1653	4	$\Delta Z = 0.1$	$pVT$ : $\rho', \rho''$ на изохорах в кварцевых капиллярах
2	Вукалович и др., 1971, [1]	$pVT$ :	673 – 1073	6	$\Delta Z = 0.01 – 0.02$	$pVT$ : справочные данные
3	Кикоин, Сенченков, 1967, [6]	$pVT$ :	1373	1	$\Delta Z = 0.04$	$pVT$ : кварцевый пьезометр с открытым капилляром, $p = 400$ атм
4	Кикоин, Сенченков, 1967, [6]	$pVT$ :	1573 – 1773 1723 – 1998	7 7	$\Delta Z = 0.05$ $\Delta Z = 0.05$	$pVT$ : керамическая ячейка, интенсивность излучения $^{203}\text{Hg}$ , изохора $\rho \sim 2 \text{ г/см}^3$ изохора $\rho \sim 2,9 \text{ г/см}^3$
5	Наурзаков, 1978, [8,9]	$pVT$ :	1719 – 2044 1758 – 1880	9 5	$\Delta Z = 0.04 – 0.06$ $\Delta Z = 0.04$	$pVT$ : металлический пьезометр, изохора $\rho \sim 2,9 \text{ г/см}^3$ изобара 100 МПа
6	Гетцлаф, 1988, [20]	$pVT$ :	1673 – 1893 1373	12 6	$\Delta Z = 0.04$ $\Delta Z = 0.04$	$pVT$ : металлический пьезометр, обобщение цикла работ изохора $\rho \sim 2,9 \text{ г/см}^3$ изотерма 1100 С,
7	Авторы, 2010	$B(T)$	400 – 1500	12	$\Delta B = 90 – 10 \text{ см}^3/\text{моль}$	ВВК: расчет на основе теоретического потенциала [25]
8	Кожевников и др., 1999, [16]	$a(p, T)$	1715 – 1899 1468 – 1900	3 14	$\Delta a = 6 \text{ м/с}$ $\Delta a = 4 \text{ м/с}$	$a(p, T)$ ; измерение скорости звука в металлической ячейке, интерферометр изобара 30 МПа изобара 60 Мпа
9	Бирч, 1932, [26]	$p_s - T_s$	673 – 1773	12	$\delta p_s = 4\%$	скачки электропроводности при фазовом переходе жидкость- пар, опытные данные в [27]
10	Битти и др., 1937, [28]	$p_s - T_s$	623 – 631	42	$\Delta p_s = 0.1 \text{ мм рт.ст.}$	метод точек кипения
11	Эрцбергер, Питман, 1955, [29]	$p_s - T_s$	285 – 326	18	$\delta p_s = \Delta p_s = 0.1 \text{ мм рт.ст.} 1\%$	поршневой манометр со слюдяными лепесткам
12	Сугавара, Сато, 1962, [30]	$p_s - T_s$	600 – 930	14	$\delta p_s = 2 \%$	метод точек кипения
13	Амброзе, Спрейк 1972, [17]	$p_s - T_s$	380 – 771	81	$\Delta p_s = 0.1 \text{ мм рт.ст.}$	метод точек кипения
14	Шпильрайн,	$p_s - T_s$	554-	50	$\delta p_s =$	метод точек кипения

	Никаноров, 1971,[11]		883		0.5 –0.7 %	
15	Хаббард, Росс, 1982, [31]	$p_s - T_s$	741 – 883	37	$\delta p_s = 4 \%$	метод точек кипения
16	Шонхер, 1988, [32]	$p_s - T_s$	1051 – 1633	7	$\delta p_s = 3 \%$	равновесие жидкость- пар из $pVT$
17	Мерлоне, Музаччио, 2010, [18]	$p_s - T_s$	500 – 665	15	0.1 мм рт.ст.	метод точек кипения
18	Кох, 1885, [33]	$\eta(T)$	574 – 653	17	$\Delta$	метод капилляра, разреженный газ
19	Брауне и др.,1928, [34]	$\eta(T)$	491 – 861	13	$\delta\eta =$ 2,5%	метод диска
17	Люстерник, 1979, [12]	$\eta(T)$	693 – 1054	15	$\delta\eta =$ 3,5%	метод капилляра
18	Тимрот и др., 1979,[13]	$\eta(T)$	625 – 800	5	$\delta\eta =$ 3,5%	метод диска
19	Шлейермахер, 1889, [35]	$\lambda(T)$	476	1	$\delta\lambda = 5\%$	метод нагретой нити
20	Зайцева, 1959, [36]	$\lambda(T)$	567 – 717	6	$\delta\lambda = 4\%$	метод нагретой нити
21	Варгафтик, Якуш, 1970, [14]	$\lambda(T)$	606 – 1184	17	$\delta\lambda = 5\%$	метод нагретой нити
22	Ергиноз, Бонилла, 1970, [37]	$\lambda(T)$	627 – 677	4	$\delta\lambda = 6\%$	То же, анализ данных в [38]
23	Заркова, Стефанов,1976, [15]	$\lambda(T)$	600 – 2400	10	$\delta\lambda = 7\%$	То же, вариант Блейса и Манна
24	Вукалович и др., 1971, [1]	$Cs'(T)$	234 – 1073	10	0.5-1.5%	справочные данные [1]
25	Левин, Шмутцлер,1984, [39] 1	$Cs'(T)$	1473 – 1673	3	7-10%	импульсный метод, измерение $Cp(p, T)$ , пересчет на $Cs'$
26		$S'_{пл}$	59.2916		0.02 Дж/(мол ь К)	обобщение данных о теплоемкости твердой фазы [40]
27		$\Delta H^o$	64550		25 Дж/моль	справочная величина, результат обобщения $p_s - T_s$ данных

Массив  $pVT$ - данных включает 4 из 6 опытных точек из пионерской работы Ю. Бендер 1915 г. [24], в которой автор наблюдала перемещение мениска ртути в закрытых кварцевых капиллярах. При расчете фактора сжимаемости  $Z(p, T) = pV/(RT)$  (обозначения общепринятые) этих данных были использованы значения давлений насыщения из работы [20]. Для первых двух точек фактор  $Z > 1$ , и они были исключены из обработки.

Во второй половине прошлого столетия интересы исследователей ртути были связаны во многом с изучением свойств в области плотностей 8-9 г/см<sup>3</sup>, где наблюдался переход металл - полупроводник и при более высоких параметрах в окрестности критической точки. В этих работах свойства пара определялись по остаточному принципу. При этом методы измерения сжимаемости, ориентированные на высокие плотности, отчасти теряли свою точность при измерениях свойств пара. Фактически только в работе Кикоина И.К и

Сенченкова А.П. [6] была получена одна опытная точка в прямом  $pVT$  эксперименте с паром: в кварцевую ампулу с ртутью, находящейся в среде аргона с параметрами 1100 С и 400 атм. был впаян открытый капилляр, и избыток ртути выходил в окружающую среду пьезометра. В Институте атомной энергии свойства ртути при высоких параметрах изучали на двух установках. Одна установка была создана для исследования одновременно плотности и электропроводности [6]. Плотность определялась по интенсивности излучения радиоактивного изотопа  $^{203}\text{Hg}$ , находящейся в керамической ячейке. Источником систематических погрешностей служила ртуть, диффундирующая в керамический остов. В статье [6] опубликованы сглаженные таблицы опытных данных в интервале 0 -2000 С до 500 МПа. При этом для пара при докритических параметрах приводится  $\sim 80$  точек в интервале плотностей 0.45- 5 г/см<sup>3</sup>.

Другая установка [7-9] была предназначена, в частности, для уточнения данных по плотности [6]. Металлический пьезометр постоянного объема и переменной массы через капилляр соединялся с балластной емкостью, находящейся при низкой температуре, в которой осуществлялось под давлением разделение ртути и аргона. Уровень ртути контролировался dilatометрическим методом. Подробные таблицы  $pVT$  данных в интервале температур 1390- 2044 К и давлений 50- 360 МПа приводятся в [8, 9] и содержат около 100 точек в паровой области ниже критической температуры. Там же приводятся 10 точек по давлению насыщения.

В дальнейшем был улучшен процесс изготовления вакуумно - плотных керамических ячеек из окиси бериллия и выполнены измерения электропроводности ртути при закритических параметрах [10]. Эти измерения, к сожалению, не сопровождались определением плотности.

Измерения сжимаемости ртути в широкой области параметров состояния, включающие область пара, проводились в Марбургском университете в Германии [19]. Был использован металлический пьезометр постоянного объема и переменной массы с сильфонным нуль – манометром, расположенном в области низких температур. Область рабочих параметров 900-1600 С и 20-200 МПа. Применительно к сжимаемости пара основная информация об этих исследованиях приведена в диссертации [20], которая включает таблицы сглаженных  $pVT$  данных жидкости и пара на линии насыщения и в однофазных областях.

. Измерения электропроводности и оптических свойств плотного ртутного пара в этих и близких по содержанию работах [19, 41] показали, что заметная ионизация насыщенного пара наблюдается при плотностях  $> 3$  г/см<sup>3</sup>. Это значение плотности было принято в качестве верхнего значения разрабатываемого нами УС диэлектрического пара.

На графике  $Z(p)_T$  был проанализирован взаимный ход изотерм для фактора сжимаемости по [6-8, 20] и их поведение при уменьшении давления и стремлении изолиний к 1. Выяснилось, что наиболее типичный для диэлектрического пара вид имеют изотермы с высокой плотностью порядка 2-2.9 г/см<sup>3</sup>, и соответствующие массивы опытных точек на изобарах и изохорах были включены в обработку с погрешностями, указанными в таблице 1

К числу достижений экспериментальной теплофизики с полным основанием следует отнести работы по измерению скорости звука в ртути при высоких параметрах, включающих область перехода металл- неметалл и закритическую область [16,42]. Был использован эхо – импульсный метод. Сигнал на частоте  $\sim 10$  МГц проходит между массивными звукопроводами через слой ртути толщиной 2-3 мм и фиксируется время прохождения прямого и отраженного импульса. Основной массив опытных данных содержится в статье [16]. Со стороны пара вблизи линии насыщения авторы наблюдали так называемое явление приветтинга, которое проявлялось в нерегулярном поведении изотерм до выхода в ‘чистый’ пар. В совместную обработку для пара включены сглаженные опытные данные, очищенные от приветтинга на изобарах 30 – 120 МПа при температурах менее 1800 К. Нами при оценке погрешности этих данных 4 – 6 м/с учитывалось, в частности, то обстоятельство, что в статье отсутствуют упоминания о тарировочных опытах.

Опытные данные о давлении насыщения [8, 11,17-18, 24, 30-32], важные сами по себе, несут полезную информацию при построении УС и при восстановлении потенциала. Расчет давлений насыщения в нашей работе проводится на основе равенства энергий Гиббса  $G'(T) =$

$G''(T)$  сосуществующих на изотермах жидкости и пара. В области температур 300 - 400 С прецизионные данные о давлениях насыщения [17, 18] играют важную роль при оценках второго ВК УС в области недоступной в опытах по сжимаемости пара. При высоких температурах 1000- 1400 С и давлениях  $\sim 100$  МПа согласование  $pVT$  и  $p_s - T_s$ -данных для ртути является основным способом обеспечения достоверности результатов. Дело в том, что в области нормальной точки кипения вклад в энергию Гиббса за счет второго ВК составляет  $\Delta G''/(RT) = Bp_s/(RT) \sim 10^{-3}$  [40], что на порядок больше, чем погрешность определения давлений насыщения  $\delta p_s \sim 10^{-4}$  в этой области температур. При высоких давлениях заметный вклад в рассчитываемое значение  $G''(T)$  вносят третий и четвертый ВК. В этой схеме расчета важно при определении  $G''$  учитывать неопределенность свойств жидкой фазы. С этой целью в процедуру совместной обработки данных были включены в качестве недетерминированной информации прецизионные опытные данные о теплоемкости и энтальпии жидкой фазы в интервале температур 234 - 623 К [1], а также результаты новых высокотемпературных измерений теплоемкости жидкой фазы [39], роль последних при расчетах выше 1100 К особенно велика. Опытные данные [39] были пересчитаны к значениям теплоемкости вдоль линии насыщения  $C_s'(T)$ , которые удобно использовать при расчете  $G''(T)$ , и 4 точки  $C_s'(T)$  в интервале температур 1473 - 1693 К были включены в массив опытных данных с погрешностью  $\sim 10\%$ . Одновременно в обобщенную модель аппроксимации данных был включен полином  $C_s'(T, a)$  с тремя параметрами. Кроме того, в массив опытных данных и одновременно в число варьируемых параметров были включены энтропия твердой ртути  $S_{пл}' = 59.2916 \pm 0.1$  Дж/(моль К) при температуре плавления  $T_{пл} = 234.28$  К и теплота сублимации  $\Delta H^0_0 = 64550 \pm 20$  Дж/моль при  $T = 0$  К., Эти величины входят в выражения для энергий Гиббса фаз (см. приложение).

Массив  $p_s - T_s$ -данных включал результаты уникальных по точности экспериментов в области нормальной точки кипения ртути [17, 18, 28]. Измерения проводились методом точек кипения при регистрации температуры в области конденсации пара. Данные [28] служили базой при определении вторичной реперной точки в шкалах температур 1948 и 1968 гг. В работе [17] в интервале температур 380 -640 К в качестве манометра использовалась шкала давлений насыщения водяного пара, а при работе в области температур 630 - 770 К использован ртутный манометр, давление на который передавалось через столб аргона. В 2010 г. опубликованы результаты новых прецизионных данных по давлению насыщения ртути в интервале 500 - 665 К [18], выполненные в итальянском метрологическом институте. Термостатирование рабочей ячейки осуществлялось с помощью тепловой трубы. Для измерения давления и температуры применялись приборы, сертифицированные на национальном уровне. В статье [18] отсутствует информация о контрольных опытах на других объектах. Для всех трех работ [17, 18, 28] для дальнейшей обработки принята погрешность  $\sim 0.1$  мм рт.ст.

Из числа многочисленных результатов измерений давлений  $< 1$  мм рт.ст. в обработку были включены данные работы [29], в которой для определения давления был использован уникальный поршневой манометр со слюдяными лепестками. При высоких давлениях  $> 10$  МПа в массив  $p_s - T_s$ -данных были включены результаты трех работ [24, 31, 32] (данные из диссертации Бирча приведены в [27]). Опираясь на авторитет соответствующих научных школ для этих данных была принята погрешность 2 - 3%. Совместная обработка опытных данных о термодинамических свойствах пара с использованием вириального УС (П1-1) подразумевает восстановление некоторого потенциала межатомных взаимодействий  $U(r)$ , обеспечивающего в рамках молекулярно-кинетической теории связь свойств с ВК. Однако ту же задачу восстановления потенциала  $U(r)$  позволяет решать использование опытных данных о транспортных свойствах разреженного пара. В этой связи в совместную обработку были включены данные о вязкости [12, 13, 33, 34] и теплопроводности [14, 15, 35, 36] в интервале температур 575 - 1054 К и 476 - 2400 К соответственно. Из числа опытных точек по теплопроводности пара работы [37] в обработку с учетом анализа этих данных в статье [38] были включены 4 точки в интервале 627-677 К. Среди опытных данных по теплопроводности пара следует отметить данные Стефанова и Зарковой, полученные с использованием метода Блейса и Манна на вольфрамовой проволочке до 2400 К [15]. Эти высокотемпературные

результаты имеют значительную погрешность  $\sim 10\%$ , но их роль в восстановлении потенциала за счет широкого интервала температур значима.

В последние десятилетия в связи с успехами лазерной спектроскопии появилась новая информация о потенциале взаимодействия атомов ртути в основном электронном состоянии [45]. Кроме того выполнены на современном уровне квантово - механические расчеты этого потенциала [25]. На основе этих результатов глубина потенциальной ямы потенциала  $\varepsilon \sim 500$  К, а величина диаметра столкновений  $d \sim 3$  А. Эти значения заметно отличаются от параметров потенциала Леннарда – Джонса (Л-Дж) 9-6, полученных ранее при обобщении свойств паров ртути [21, 40]. Чтобы отразить роль новой информации о потенциале взаимодействия [25, 45] в процедуре согласования данных нами по потенциалу [25] был рассчитан второй ВК и 12 точек в интервале температур 400-1500 К с погрешностью, оцененной ранее в работе [40], были включены в общий массив данных (см. таблицу 1).

### 3. Потенциал взаимодействия

Для обобщения рассмотренного выше массив данных о термодинамических и транспортных свойствах ртутного пара в данной работе был использован центрально-симметричный трехпараметрический потенциал Л-Дж m-6

$$U(r) = \varepsilon [R^{-m} - R^{-6}] / C(m,6), \quad (1)$$

где  $C(m, 6) = (6/m)^{6/(m-6)} [(m-6)/m]$ ,  $R = r/d$ , где  $\varepsilon$  - глубина потенциальной ямы,  $d$  – диаметр столкновения и  $U(d)=0$ ,  $m$ - показатель отталкивательной ветви потенциала. При всех недостатках этого семейства потенциалов [46] на данном этапе вид функция (1) выбран по следующим соображениям:

- потенциал (1) обладает большей гибкостью по сравнению с функцией Л-Дж 12-6. На основании предварительных расчетов для ртутного пара следовало ожидать значение показателя  $m \sim 9$ ,
- (1) является одной из немногих функций, для которых рассчитаны таблицы не только второго, но и третьего и четвертого ВК при значениях  $m = 9, 12, 18$  в приближении попарной аддитивности взаимодействия атомов [47],
- для этого потенциала в интервале приведенных температур  $T^* = T/\varepsilon = 0.4 - 400$  и показателей  $m = 8 - \infty$  таблицы интегралов столкновений, входящие в расчетные зависимости молекулярно-кинетической теории, были представлены с помощью простых алгебраических зависимостей [48], поправка [49], в свое время на примере аргона было показано, что поправка на неаддитивность взаимодействий при расчете третьего ВК может достигать 30%. В то же время именно для потенциала Л-Дж 9-6 соответствующие поправки к третьему ВК за счет притяжения и отталкивания в потенциале взаимодействия в первом приближении взаимно компенсируют друг друга [50].

### 4. Расчет термодинамических свойств и аппроксимация опытных данных

Расчет термодинамических свойств с помощью УС в вириальной форме в переменных  $\rho$ ,  $T$  проводился по стандартным соотношениям [1, 46, 51] Предварительно приведенные значения второго  $B^*(T^*)$ , третьего  $C^*(T^*)$  и четвертого  $D^*(T^*)$  ВК были аппроксимированы простыми алгебраическими выражениями в переменных  $T^*$ ,  $m$  (см. приложение). Для перехода между мольными и удельными величинами были приняты значение газовой постоянной  $R = 8.31451$  Дж/(моль К) и молекулярная масса ртути  $\mu = 200.59$  а.е. В качестве начала отсчета термодинамических функций в стандартном состоянии принято состояние твердой  $\alpha$ -фазы при 0 К и давлении 1 атм. Расчет идеально - газовых функций, в частности, энтропии и энергии Гиббса, в рассматриваемом интервале темпера проводился для атомарного газа с использованием значения изохорной теплоемкости  $C_v^0 = 3/2 R$ . При расчете энергии Гиббса жидкой фазы  $G^o(T)$  (см. (П1-9)) ряд величин: температура плавления  $T_{пл}$ , теплота плавления  $\Delta H_{пл}$ , энергия Гиббса  $G_{пл}^o - H_0^o$  рассматривались в качестве детерминированных значений. В то же время чтобы при расчете давлений насыщения, как указывалось выше, учесть неопределенность в функциях твердой фазы, энтропия  $S_{пл}$  считалась случайной величиной и входила в массив исходных данных. Теплоемкость вдоль линии насыщения жидкости  $C_s(T)$

представлена полиномом с варьируемыми параметрами (П1-14). Плотность жидкости на линии насыщения включена в расчет как детерминированная функция (П1-11). Совместная обработка исходных данных проводилась с помощью весового нелинейного метода наименьших квадратов (МНК) для дискретного набора точек

$$\Phi = \sum \sum \{W_{ij} [Y_{ij}(x) - y_{ij}(x, \mathbf{a})]\}^2 \rightarrow \min \quad (2)$$

где  $Y_{ij}$  и  $y_{ij}$  – экспериментальное и расчетное значения величин  $i$  в отдельном массиве данных  $j$ ,  $x$  – точно заданные аргументы в  $i, j$  точке,  $\mathbf{a}$  – вектор параметров,  $W_{ij} = \Delta_{ij}^{-2}$  – вес каждой опытной точки, который определяется с помощью принятых нами погрешности данных  $\Delta_{ij}$  (см. таб. 1),  $\Phi$  – безразмерный МНК-функционал. МНК в форме (2) сформулирован для набора случайных независимых величин, и в этом заключается одно из основных допущений принятой процедуры согласования данных. В действительности в каждой серии данных  $j$  опытные точки так или иначе коррелированы между собой за счет влияния некоторых систематических факторов (систематических ошибок). При этом в исходной матрице весов данных  $W$  все корреляции, связи между точкам исключены и сохранены только элементы на диагонали. Не явно предполагается, что систематические ошибки в работах отдельных авторов и тем более для данных разной физической природы образуют свою систему случайных зависимостей и при минимизации (2) компенсируют друг друга. Предполагается также, что тем или иным способом контролируется статистическая согласованность отдельных типов данных. Веса опытных точек в (2) определяются через полные (расширенные) погрешности данных, приведенные в таблице 1, и это тоже является приближением для МНК в форме (2). Искомые параметрами функционала (2) являются три параметра потенциала Л-Дж  $m-6$ , теплота сублимации  $\Delta H^0$ , энтропия  $S_{пл}^0$  и три (или 4) параметра температурной зависимости теплоемкости  $C_s'(T)$  (П1-14). Процедура минимизации функционала (2) по параметрам, сами параметры и оценки их погрешностей проводятся с помощью приложения к windows [23, 56, 57], осуществляющей минимизацию функции (2) методом линеаризации. Формат данных long double транслятора C++ , расчет производных  $\partial u / \partial a_k$  проводится численно. Общее число исходных данных равно 550 (-62), число варьируемых параметров 8. Модель теплоемкости  $C_s'(T)$  имела избыточное число параметров – 4, и как показали расчеты, на данном массиве данных четвертый параметр оказался незначимым.

#### *Результаты аппроксимации и расчет таблиц термодинамических свойств пара.*

В результате минимизации (1) был получен функционал  $\Phi = 273.5$  (Табл. 2). Отклонение исходных данных от расчетной поверхности лежат в пределах принятых погрешностей в том смысле, что вклад в функционал от отдельных точек  $< 3$ . Средние квадратичные оценки погрешностей параметров, доставляемые по формальной схеме МНК, значительно меньше самих параметров, т.е.  $\text{ско}(a_i) < a_i$ . Результаты независимой аппроксимации термодинамических (функционал  $\Phi_{\text{терм}}$ ) и транспортных (функционал  $\Phi_{\text{трансп}}$ ) свойств при сделанных выше допущениях с позиций  $\chi^2$ -распределения [52] не противоречат друг другу, т.е.  $\Phi_{\text{терм}} + \Phi_{\text{трансп}} \approx \Phi \pm 2\sqrt{\Phi}$ . Как и предполагалось, в результате восстанавливаемый потенциал Л-Дж  $m-6$  имеет мягкую отталкивательную ветвь и параметр  $m \approx 9$ . Параметры потенциала сильно коррелированы между собой. Как уже отмечалось выше, глубина ямы и диаметр столкновения найденного потенциала Л-Дж  $m-6$  значительно отличаются от параметров потенциалов из работ [25, 45]. Рассчитанные значения второго ВК лежат систематически ниже, т.е. больше по абсолютной величине, введенных в массив исходных данных. Вклад от второго ВК составляет  $\sim 10\%$  от общего функционала.

Одна из основных проблем, возникающих при интерпретации результатов аппроксимации рассматриваемых данных, связана с анализом погрешностей результатов. Как уже отмечалось выше, функционал МНК в форме (2) и порождаемая методом матрица ошибок параметров  $D^0(\mathbf{a})$  сформулированы для системы независимых случайных величин  $Y_{ij}$ . В результате оценки погрешностей справочных данных получаются заниженными. Можно видеть (см. рисунки), что отдельные серии данных систематически отклоняются от рассчитанных зависимостей. Учет этой ситуации при оценке полной погрешности результатов аппроксимации является фундаментальной проблемой методов обработки опытных данных. В нашей работе реализован некоторый вариант учета систематических погрешностей в



отдельных сериях данных при оценках погрешностей результатов. Ранее этот метод был использован при обобщении данных по теплоемкости и энтальпии графита [52]. Исключая из обработки основные массивы данных по сжимаемости пара, давлениям насыщения, скорости звука или, вязкости и теплопроводности проводятся новые процедуры аппроксимации (n вариантов), что порождает некоторый набор параметров  $\mathbf{a}_p$ . Рассматривая этот набор параметров в качестве случайных величин находим их средние, равные, вообще говоря, исходному вектору  $\mathbf{a}^0$ , дисперсии и ковариации по правилам работы со случайными величинами [53], например,  $\text{cov } a_i a_j = \{ \sum (a_i - a_i^0) (a_j - a_j^0) \} / (n-2)$ . Эти дисперсии и ковариации образуют новую матрицу ошибок параметров  $D_{\text{сист}}(\mathbf{a})$ . В результате появляется возможность сконструировать расширенную матрицу ошибок параметров (см. приложение Табл. П2, П3)

$$D(\mathbf{a}) = D^0(\mathbf{a}) + D_{\text{сист}}(\mathbf{a}) \quad (3)$$

и далее с помощью правила переноса ошибок перейти сначала к оценкам  $\text{ско}^\infty y(x, \mathbf{a})$  и затем к построению расширенного коридора ошибок – расширенной погрешности функций при некоторой доверительной вероятности  $P$

$$\Delta_p y(x) = t_p \text{ско} y(x, \mathbf{a}) = t_p [ \sum_i \sum_j (\partial y / \partial a_i) (\partial y / \partial a_j) \text{cov } a_i a_j ]^{1/2} \quad (4)$$

При многочисленных допущениях, сделанных на пути реализации (2-4), целесообразно квантиль  $t_p$  (coverage factor) выбирать в наименьшей степени зависящим от вида некоторого композитного распределения, которое отражает ошибки вектора параметров.

Опираясь на разложение Грама-Шарле для симметричных распределений [54]

$$P_t = P_t(\text{Gauss}) + (t - \sqrt{3}) H_3(t) \quad (5)$$

где  $P_t(\text{Gauss})$  – вероятность нормального распределения погрешностей,  $H_3(t)$  функция Чебышева-Эрмита можно видеть, что при  $t_p = \sqrt{3}$  доверительная вероятность мало зависит от вида функции распределения и близка к вероятности нормального распределения. Это результат совпадает с анализом симметричных распределений, приводимых в монографии [55]. Вероятность  $P_{\sqrt{3}}(\text{Gauss})$  близка к 90%, и именно к этой вероятности мы относим приводимые в таблицах оценки погрешностей свойств. С учетом значительной неопределенности всей процедуры оценок погрешностей принимаем  $t_{0,9} = 2$ .

Коэффициенты вязкости и теплопроводности определялись по известным формулам, которые приведены в приложении. Приведенные интегралы столкновения рассчитывались по [48].

Обработка исходных данных проводилась с помощью инструмента реализованного в виде приложения [23, 56, 57]. Всего обрабатывалось 9 видов разнородной информации, каждая из которой введена в отдельный файл. Каждый из этих файлов может быть разбит на несколько частей (до 14), так файл с давлениями насыщения был разбит на 11 частей по авторам. Это позволяет оперативно исключать как сами файлы, так и их части из обработки с целью учёта систематических погрешностей.

Были проведены многочисленные расчёты и выбран вариант представленный ниже. Здесь  $2S$  – остаточный функционал, PARAMETERS – искомые параметры  $a_i$ ,  $a_1 - d$ ,  $A$  – диаметр столкновения,  $a_2 - \epsilon$ ,  $K$ ,  $a_3 - m$ ,  $a_4 - a_8$  – пояснены ниже, ERRORS – погрешности искомых параметров. Использовали в основном для поиска решения алгоритм Левенберга-Марквардта, а окончательно алгоритм FUMILI [58].

Таблица 2

Результаты аппроксимации разнородной информации. Параметры и их погрешности

I1=5 nn3=0 2S=2.734866e+02 GT=-2.6473e-05 KAP=3.3837e-03 LAMB=1.0000e+00 T1=1.0000e+00				
№	PARAMETERS	ERRORS	FACTORS	FISHER'S
1	2.72458563973251e+00	1.63e-02	8.5e+01	6.1e+04
2	9.00049470916809e+02	2.93e+01	7.2e+02	2.1e+03
3	9.25384540884955e+00	3.35e-01	2.9e+02	1.7e+03
4	3.07359695778119e+01	1.89e-01	1.5e+06	5.8e+04
5	-1.28614066259862e-02	6.70e-04	2.2e+06	8.1e+02

6	1.17940057912069e-05	5.50e-07	2.0e+05	1.0e+03
7	5.92856084803894e+01	2.62e-02	2.2e+05	1.1e+07
8	6.4555258260718e+04	9.08e+00	6.8e+04	1.1e+08

С целью учёта систематических погрешностей были проделаны для выбранного варианта 20 аппроксимаций, результаты представлены в виде матрицы вариации искомых параметров в приложении. Полученные искомые параметры выбранного варианта и результирующая матрица ошибок введены в базу данных приложения, работа которой представлена на Рис. 1.

Используя эту базу данных, были рассчитаны теплофизические свойства ртути и их погрешности на линии насыщения, которые представлены в Табл. 3-7.

Таблица 3

Термодинамические свойства ртути на линии насыщения

T, K	p, МПа	$v'$	$v''$	$h'$	$h''$	r	$s'$	$s''$
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг			кДж/(кг·К)	
400	1.3875e-04	7.526262e-05	1.1949e+02	60.6	363.3	302.7	0.4188	1.1755
500	5.2477e-03	7.526262e-05	3.9482e+00	74.2	373.6	299.4	0.4493	1.0480
600	5.7691e-02	7.526262e-05	4.3026e-01	87.8	383.9	296.0	0.4740	0.9674
700	3.1520e-01	7.526262e-05	9.1405e-02	101.5	393.8	292.3	0.4950	0.9127
800	1.1191e+00	7.526262e-05	2.9103e-02	115.4	403.2	287.8	0.5135	0.8732
900	2.9962e+00	7.526262e-05	1.2008e-02	129.7	411.6	281.9	0.5301	0.8434
1000	6.6092e+00	7.526262e-05	5.8898e-03	144.5	418.8	274.3	0.5455	0.8197
1100	1.2701e+01	7.526262e-05	3.2539e-03	160.1	424.4	264.3	0.5598	0.8001
1200	2.2057e+01	7.526262e-05	1.9542e-03	176.7	428.1	251.4	0.5735	0.7830
1300	3.5493e+01	7.526262e-05	1.2453e-03	194.5	429.6	235.2	0.5867	0.7676
1400	5.3836e+01	7.526262e-05	8.2829e-04	213.7	428.5	214.9	0.5996	0.7531
1500	7.7851e+01	7.526262e-05	5.7019e-04	234.5	424.5	190.1	0.6123	0.7390
1600	1.0793e+02	7.526262e-05	4.0936e-04	257.1	418.3	161.2	0.6249	0.7256

Таблица 4

Термодинамические свойства ртути на линии насыщения

T, K	p, МПа	z''	$c_s'$	$c_p''$	$c_v''$	$a''$ , м/с	$\gamma^*$
			кДж/(кг·К)				
400	1.3875e-04	1.0000	27.4784	0.1036	0.0622	166.2	2.5001e-03
500	5.2477e-03	0.9997	27.2538	0.1037	0.0622	185.8	2.0016e-03
600	5.7691e-02	0.9981	27.2650	0.1040	0.0623	203.4	1.6754e-03
700	3.1520e-01	0.9930	27.5120	0.1050	0.0626	219.1	1.4557e-03
800	1.1191e+00	0.9822	27.9950	0.1070	0.0630	233.0	1.3109e-03
900	2.9962e+00	0.9644	28.7138	0.1104	0.0637	245.1	1.2237e-03
1000	6.6092e+00	0.9391	29.6686	0.1157	0.0646	255.3	1.1845e-03
1100	1.2701e+01	0.9064	30.8592	0.1236	0.0658	263.9	1.1901e-03
1200	2.2057e+01	0.8666	32.2856	0.1351	0.0672	271.2	1.2432e-03
1300	3.5493e+01	0.8203	33.9480	0.1520	0.0688	277.5	1.3542e-03
1400	5.3836e+01	0.7684	35.8463	0.1772	0.0703	284.2	1.5432e-03
1500	7.7851e+01	0.7139	37.9804	0.2147	0.0711	294.0	1.8283e-03

1600	1.0793e+02	0.6662	40.3504	0.2619	0.0701	313.2	2.1365e-03
$\gamma^*=1000 \cdot \alpha''$ , 1/К, где $\alpha''$ – коэффициент термического расширения							

Таблица 5

Погрешности термодинамических свойств ртути на линии насыщения

T, К	$\delta p_s$	$\delta v'$	$\delta v''$	$\delta h'$	$\delta h''$	$\delta r$	$\delta s'$	$\delta s''$
	%							
400	1.0e-01	6.2e-07	1.7e-01	1.7e-01	3.9e-02	3.0e-02	4.2e-02	4.4e-03
500	3.2e-02	7.5e-06	5.3e-02	1.7e-01	3.7e-02	2.0e-02	2.3e-02	1.5e-03
600	1.0e-02	2.6e-05	1.7e-02	1.7e-01	3.6e-02	1.9e-02	1.7e-02	1.7e-03
700	2.9e-02	3.7e-04	3.3e-02	1.8e-01	3.7e-02	4.3e-02	3.0e-02	5.2e-03
800	7.3e-02	2.6e-03	8.6e-02	2.0e-01	4.3e-02	8.5e-02	4.6e-02	1.3e-02
900	1.4e-01	7.7e-03	1.8e-01	2.3e-01	6.2e-02	1.4e-01	6.3e-02	2.4e-02
1000	2.2e-01	8.5e-03	3.2e-01	2.7e-01	9.5e-02	2.3e-01	8.1e-02	3.9e-02
1100	3.5e-01	1.6e-03	5.8e-01	3.4e-01	1.4e-01	3.5e-01	1.0e-01	5.7e-02
1200	5.5e-01	7.4e-02	1.0e+00	4.4e-01	2.0e-01	5.1e-01	1.4e-01	7.9e-02
1300	8.5e-01	3.0e-01	1.8e+00	5.7e-01	2.7e-01	7.6e-01	1.8e-01	1.1e-01
1400	1.3e+00	2.5e-01	3.1e+00	7.4e-01	4.1e-01	1.2e+00	2.3e-01	1.6e-01
1500	1.8e+00	1.3e+00	5.0e+00	9.4e-01	6.6e-01	1.9e+00	2.9e-01	2.5e-01
1600	2.5e+00	4.2e+00	7.5e+00	1.2e+00	1.0e+00	3.2e+00	3.6e-01	3.8e-01

Таблица 6

Погрешности термодинамических свойств ртути на линии насыщения

T, К	$\delta p_s$	$\delta z''$	$\delta c_s'$	$\delta c_p''$	$\delta c_v''$	$\delta a''$	$\delta \gamma^*$
	%						
400	1.0e-01	1.7e-04	3.1e-01	1.2e-03	1.3e-03	1.7e-04	7.8e-04
500	3.2e-02	2.4e-03	3.6e-01	1.4e-02	1.3e-02	1.8e-03	1.0e-02
600	1.0e-02	1.2e-02	4.6e-01	6.7e-02	5.8e-02	6.8e-03	5.3e-02
700	2.9e-02	3.6e-02	5.2e-01	1.9e-01	1.6e-01	1.5e-02	1.6e-01
800	7.3e-02	7.5e-02	6.1e-01	4.2e-01	3.4e-01	2.7e-02	3.5e-01
900	1.4e-01	1.3e-01	7.9e-01	7.7e-01	6.2e-01	4.8e-02	6.3e-01
1000	2.2e-01	2.1e-01	1.1e+00	1.2e+00	9.9e-01	9.4e-02	9.9e-01
1100	3.5e-01	3.5e-01	1.5e+00	1.8e+00	1.5e+00	1.8e-01	1.4e+00
1200	5.5e-01	5.8e-01	2.1e+00	2.5e+00	2.2e+00	3.3e-01	1.9e+00
1300	8.5e-01	1.0e+00	2.6e+00	3.3e+00	3.0e+00	5.4e-01	2.7e+00
1400	1.3e+00	1.8e+00	3.2e+00	4.3e+00	4.2e+00	8.8e-01	4.1e+00
1500	1.8e+00	2.9e+00	3.8e+00	6.7e+00	5.7e+00	1.7e+00	6.7e+00
1600	2.5e+00	4.5e+00	4.4e+00	1.2e+01	7.5e+00	3.6e+00	1.3e+01

Таблица 7

Коэффициент вязкости и теплопроводности ртути и их погрешности при низком давлении

T, К	$\eta$ , мк Па·с	$\lambda$ , мВт/(м ·К)	$\delta\eta=$ $\delta\lambda$ , %	T, К	$\eta$ , мк Па·с	$\lambda$ , мВт/(м ·К)	$\delta\eta=$ $\delta\lambda$ , %
400.00	38.7	6.0	3.8e+00	1100.00	114.3	17.8	7.2e+00
500.00	48.8	7.6	4.5e+00	1200.00	124.8	19.4	7.3e+00
600.00	59.5	9.2	5.4e+00	1300.00	135.1	21.0	7.3e+00
700.00	70.5	11.0	6.1e+00	1400.00	145.1	22.6	7.4e+00
800.00	81.6	12.7	6.6e+00	1500.00	154.9	24.1	7.4e+00
900.00	92.7	14.4	6.9e+00	1600.00	164.4	25.6	7.4e+00
1000.00	103.6	16.1	7.1e+00				

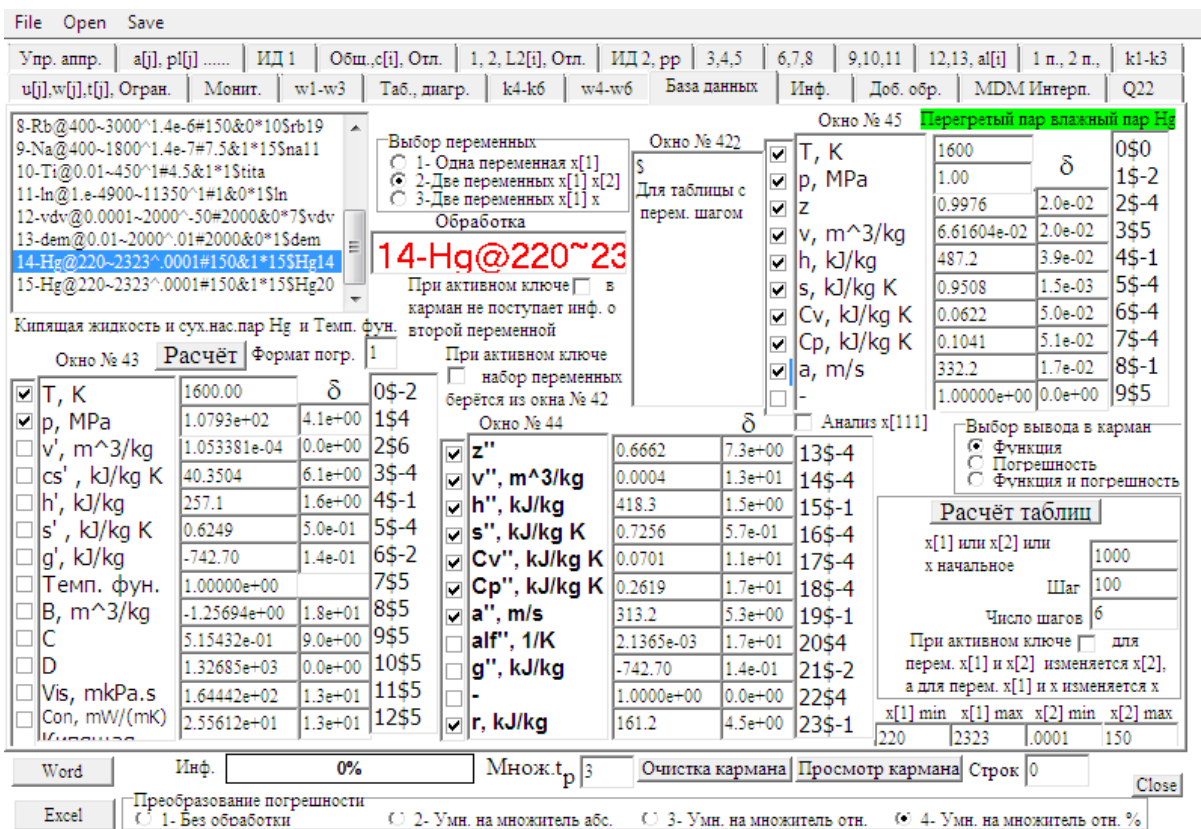


Рис. 1. Работа базы данных приложения

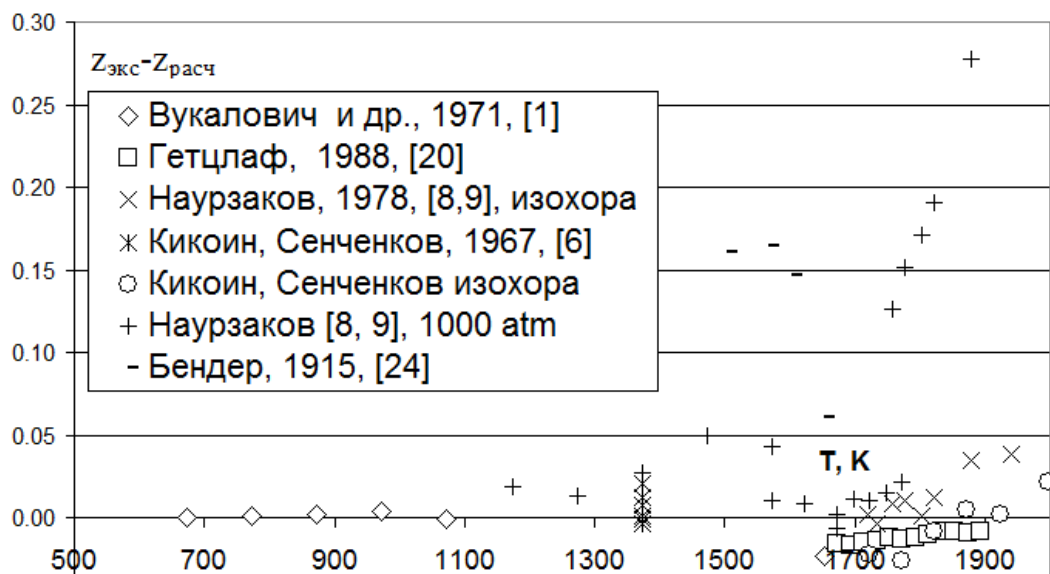


Рис. 2. Отклонения фактора сжимаемости

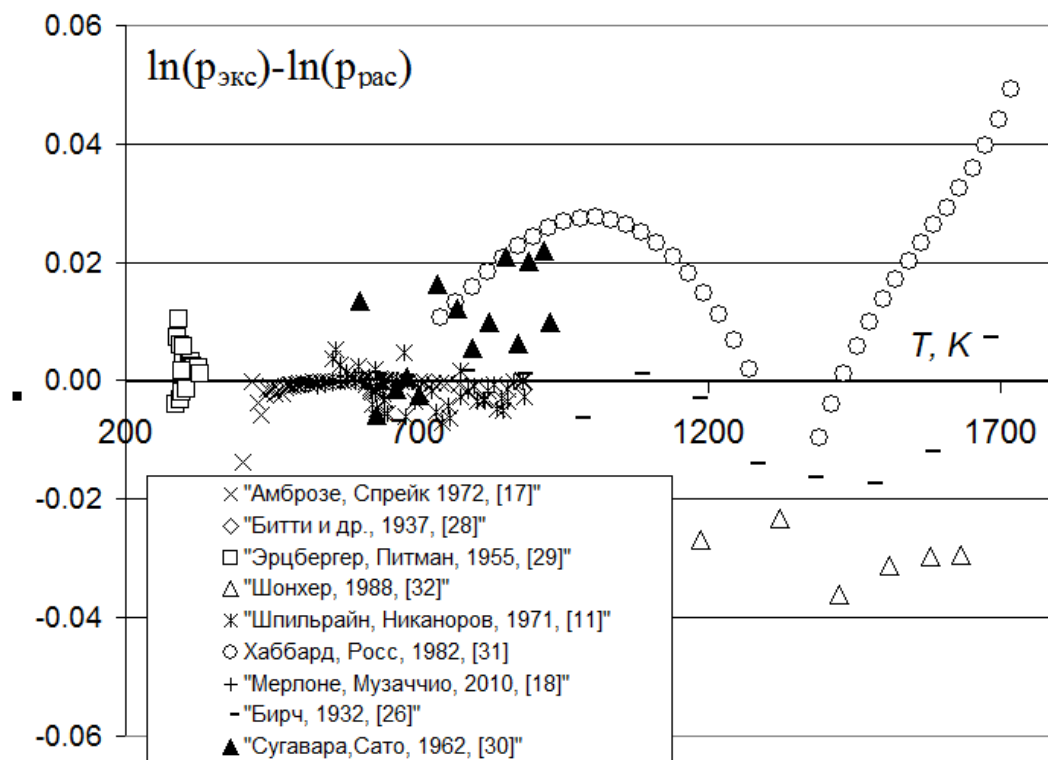


Рис. 3. Отклонения давления насыщения

На Рис. 3  $p$  в барах.

#### Список литературы

1. Теплофизические свойства ртути/ М.П. Вукалович, А.И. Иванов, Л.Р. Фокин, А.Т. Яковлев. М.: изд- во стандартов, 1971(1973).
2. Варгафтик Н.Б. Теплофизические свойства жидкостей и газов. Справочник. М.: Наука, 1973.
3. Vargaftik N.B., Vinogradov Yu. K., Yargin V.S. Handbook of physical properties of liquids and gases. NY: Begell House, 1996. 1359 p.
4. Liley P. Physical properties data for design. NY: P.267-268
5. Двайер О. Теплообмен и кипение жидких металлов./Пер. с англ. М. ИИЛ, 1980.
6. Кикоин И.К., Сенченков А.П. Электропроводность и уравнение состояния ртути в области температур 0 – 2000 С и давлений 200 – 5000 атмосфер// Физика металлов и металловедение. 1967. Т.24. С.843 – 858.
7. Кикоин И.К., Сенченков А.П., Наурзаков С.П., Гельман Э П. Переход металл-неметалл в плотном металлическом паре. Препринт ИАЭ – 2310. М.: Институт атомной энергии, 1973.
8. Наурзаков С.П. Экспериментальное исследование уравнения состояния ртути. Дисс. к.ф.-м.н. М. : Институт атомной энергии, 1978.
9. Kozhevnikov V. F., Naurzakov S.P., Senchenkov A.P. Thermodynamic properties of cesium in the liquid state and in the vicinity of the critical point. Appendix. The experimental values of the density of mercury// J. Moscow. Phys. Soc. 1991. V. 1. P.171-197.
10. Корсунский М.М. Исследование электропроводности ртути в околокритической области// ЖЭТФ. 1985. Т.89. Вып. 3(9). С. 875-883.
11. Шпильрайн Э.Э., Никаноров Э.В. Экспериментальное исследование упругости пара ртути// Теплофиз. высоких температур. 1971. Т.9. С.640-643.
12. Люстерник В.Е. Измерение вязкости пара ртути и анализ полученных данных.// там же. 1979. Т.17. С.50-53.

13. Тимрот Д.Л., Середницкая М.А., Беспалов М. С., Трактуева С.А. // там же. 1979. Т.17. С. 54-57.
14. Варгафтик Н.Б., Якуш Л.В. Экспериментальное исследование теплопроводности паров ртути// там же. 1970. Т.8. С.1182 – 1185.
15. Заркова Л., Стефанов Б. Измерение теплопроводности газов и паров до 2500 К// там же. 1976. Т.14. С. 277 – 284.
16. Kozhevnikov V.F., Arnold D.I., Briggs M.E. et al. A pulsed phase – sensitive technique for acoustical measurements// J. Acoust. Soc. Amer. 1999. V. 106. P. 3424-3433.
17. Ambrose D., Sprake C. The vapor pressure of mercury// J. Chem. Thermod. 1972. V.4. P.603-620.
18. Merlone A., Musaccio C. The mercury vapor pressure vs. temperature relation between (500-665) K// J. Chem. Thermod. 2010. V. 42. P. 38-47.
19. Hensel F., Warren W.W. Jr. Fluid metals. The liquid- vapor transition of metals. Princeton: PUP, 1999. 244 p.
20. Goetzlaf W Zustandgleichung und electrischen transport am kritischen punkt des fluiden quecksilber . Diss. Philipps-Univ. Marburg , 1988
21. Fokin L.R., Kozhevnikov V.F., Naurzakov S.P., Popov V.N. EoS for mercury vapor up to 1650 K and 130 MPa// 15 Symp. Thermophys. Prop. Abstracts. Boulder: NIST, 2003.
22. www.thermophysics.ru (НВ, ch.9)
23. Попов В.Н. Многофункциональный инструмент нелинейной аппроксимации. Анализ матрицы ошибок// Теплофизические свойства веществ и материалов. Труды 12 РКТС. М.: «Интерконтакт Наука». 2009. С. 191-204.
24. Bender J. Ueber die kritische Temperatur des Quecksilber// Phys. Z.1915. Bd 16 . S. 246-247.
25. Pahl E., Figgen D., Thierfelder Ch. et al. A highly accurate potential energy curve for the mercury dimer// J. Chem. Phys. 2010. V. 132. P. 114301(6)
26. Birch F. The electrical resistance and the critical point of mercury//Phys. Rev 1932. V.41. P. 641 – 648.
27. Grosse F. An empirical relationship between the electrical conductivity of mercury and temperature over its entire liquid range //J. Nucl. Inorg. Chem. 1961. V.28. P.803 – 811
28. Beattie J., Blaisdel B., Kaminsky J. An experimental studies of the absolute temperature scale. IV. Reproducibility of the mercury vapor point. Effect of pressure on the boiling point// Proc. Amer. Acad. Arts and Sci. 1937. Bd. 71. P.375-385.
29. Ernsberger F. M., Pitman H.W. New absolute manometer for vapor pressure in the micron range // Rev. Sci. Instr. 1955. V.26. P.584 - 589.
30. Sugawara S., Sato T., Minamiyama T. EoS for mercury vapor// Bull. of the JSME. 1962. Vol.5. S.711 – 718.
31. Hubbard S.R., Ross R.G. Slope anomaly in the vapor pressure curve of Hg//Nature. 1982. V. 295. P.682-683
32. Schoenherr G., Hensel F. Unusual thermodynamic and electrical properties of metallic solutions near the critical point of almost pure solution// Ber. Bunsenges. Phys. Chem. 1988. Bd 85. S.361-366.
33. Koch S. Ueber die Reibungsconstante des Quecksilberdampfs und deren Abhangigkeit fon der Temperatur //Ann. Phys. 1885. Bd 25. S.857 - 872
34. Braune S., Basch R., Wentzel W. Uber die inner Reibung einiger Gase und Dampfe// Z. phys. Chem. 1928. Bd A137. S. 447-457.
35. Schleiermacher A Ueber die Wärmeleitungsfähigkeit des Quecksilber//Ann. Phys. 1889. Bd 36. S. 346 - 357
36. Зайцева Л.С Экспериментальное исследование теплопроводности одноатомных газов в широком интервале температур//ЖТФ.1959 Т.29. С.427 – 505
37. Erginoz H., Bonilla C. Thermal conductivity of mercury vapor// Proc. 5<sup>th</sup> Symp. Thermophys. Prop. NY: ASME, 1970. P.64-76
38. Варгафтик Н.Б., Виноградов Ю.К. О теплопроводности паров ртути//Теплофиз. высоких температур. 1973. Т.11. С. 523-526

39. Levin M., Schmutzler R.W. The specific heat of mercury at sub- and supercritical temperature and pressure // J. Non-Cryst. Solids. 1984. V.61/62. P. 83-86
40. ГСССД 57-83. Ртуть Коэффициенты вязкости, теплопроводности, самодиффузии и второй вириальный коэффициент в диапазоне температур 400 – 2000 К при низки давлениях в газообразном состоянии. М.: изд-во стандартов, 1985. 16 с.
41. Hensel F., Uchtmann H. The metal insulator transition in expanded fluid metal// Ann. Rev. Phys. Chem. 1989. V.40. P.61-83
42. Yao M., Okada K., Aoki T., Endo H. Acoustic properties of expanded fluid mercury//J. Non Cryst. Sci., 1996. Vol. 205. P.274-277.
43. Siegel J., Bonilla C. The thermal conductivity of mercury vapor// Proc. 7<sup>th</sup> Symp. Thermophys. Prop. NY: ASME, 1977. P.917-925
44. Виноградов Ю.К. Теплопроводность паров ртути// ИФЖ. 1981. Т.41. С.265- 268
45. Koperski J. Study of diatomic van der Waals complexes in supersonic beams.// Phys. Rep. 2002. V.369. P.177 - 326
46. Maitland G., Rigby M., Smith E., Wakeham W. Intermolecular forces. Oxford: Clarendon press, 1981.
47. Reipert P. Zustandgleichungen fur die gemishen von gasfomigen He, Ne, und Ar. Diss. Univ. Stuttgart. 1978.
48. Фокин Л.Р. , Попов В.Н., Калашников А.Н. Аналитическое представление интегралов столкновений для потенциалов Леннарда – Джонса  $m - 6$  в базе данных “ЭПИДИФ”// Теплофиз высоких температур. 1999. Т.37. С.49-55
49. Фокин Л.Р. Калашников А.Н. Вязкость и самодиффузия разреженного водяного пара. Уточнение справочных данных.// Теплофиз высоких температур. 2008. Т.46. С. 614-619.
50. Sherwood A.E., DeRocco A.E., Mason E.A. Nonadditivity of intermolecular forces effects on the third virial coefficient// J. Chem. Phys. 1966. V. 44. P. 2984-2994.
51. Попов В.Н., Александров А.А. Пособие для расчета теплофизических свойств веществ М.: МЭИ, 1972. 224 с.
52. ГСССД 25-90 Графит УПВ-1Т. Калорические свойства в интервале температур 298-4000 К / Г. А. Бергман, Л. М. Бучнев, И. И. Петрова и др. 1990.- 22 с.
53. Худсон Д. Статистика для физиков/ Пер. с англ. М.: Мир, 1971. 296 с.
54. Кендалл М.Дж., Стюарт А. Теория распределений/ Пер. с англ. М.: Наука, 1966. – 588 с.
55. Новицкий П.В., Зограф И.А. Оценка погрешностей результатов измерений. Л.: ЛО Энергоатомиздат, 1991. – 303 с.
56. Попов В.Н. База данных по свойствам веществ с инструментом аппроксимации. В сб.: Ультразвук и термодинамические свойства вещества. Вып. 32 / Сборник научных трудов. Курск: КГУ, 2005. С. 87–103.
57. Попов В.Н., Мозговой А.Г. Инструмент аппроксимации разнородных данных. М.: Интерконтакт наука, 2006. 48 с.
58. Гришин В.К., Живописцев Ф.А., Иванов В.А. Иатематическая обработка и интерпретация физического эксперимента. М.: изд-во МГУ, 1988. С.222- 231.

Авторы выражают благодарность Е. Е. Тоцкому, который оказал помощь в первичном анализе  $pVT$  данных.

#### ПРИЛОЖЕНИЕ 1

Уравнение состояния (УС) диэлектрического пара имеет вид

$$Z = pV/(RT) = 1 + B(T)/V + C(T)/V^2 + D(T)/V^3, \quad (\text{П1-1})$$

где  $p$  – давление,  $T$  - температура,  $V$  - мольный объем,  $R = 8314.51$  Дж/(кмоль К)- газовая постоянная,  $Z$  - фактор сжимаемости. Для пересчета к удельным величинам используется величина молекулярной массы ртути  $M = 200.59$  а.е. Вириальные коэффициенты для потенциала Леннарда- Джонса (Л-Дж)  $m-6$   $m-6$  представлены в виде  $B=b_0V^*(T^*,m)$ ,  $C = b_0^2C^*(T^*,m)$ ,  $D= b_0^3D^*(T^*,m)$ , где  $b_0 = 1.263 \cdot 10^{-3}d^3$ ,  $m^3/\text{кмоль}$ ,  $d$ , А – диаметр столкновений потенциала,  $T^* = T/\varepsilon$  - приведенная температура,  $\varepsilon$  - глубина потенциальной ямы. Значения

приведенных вириальных коэффициентов  $Y^*(T^*, m) = \{B^*, C^*, D^*\}$  представлены в виде разложений относительно  $m=9$ :

$$Y^* = Y^*(T^*, m=9) + Y1^*(T^*) (m-9). \quad (\text{П1-2})$$

Таблицы приведенных значений вириальных коэффициентов потенциала Л-Дж  $m=6$ , рассчитанные при  $m=9, 12, 18$  [47], были аппроксимированы по обратным степеням  $T^*$  для  $Y^*(T^*, m=9)$  и  $Y1^*(T^*)$ , например,

$$Y^*(T^*, m=9, c) = \sum_{i=1}^k c_i T^{*1-i} \quad (\text{П1-3})$$

$$Y1^*(T^*, m=9, c1) = \sum_{i=1}^k c1_i T^{*1-i} \quad (\text{П1-4})$$

Необходимые составляющие приведённых производных находятся аналитически средствами приложения, а из них по (П1-2) находятся сами приведённые производные.

$$Y^*_1(T^*, m=9) = T^* d(Y^*(T^*, m=9))/dT^*;$$

$$Y^*_2(T^*, m=9) = T^{*2} d^2(Y^*(T^*, m=9))/dT^{*2}$$

$$Y1^*_1(T^*) = T^* d(Y1^*(T^*))/dT^*;$$

$$Y1^*_2(T^*) = T^{*2} d^2(Y1^*(T^*))/dT^{*2}$$

Параметры этих полиномов приведены в табл. П1.

Таблица П1-1

Коэффициенты полиномов, аппроксимирующих значения  $Y^*(T^*, m=9, c)$  и  $Y1^*(T^*, c1)$

$Y^*$	I	$ci$	$Y1^*$	$c1i$	$Y^*$	i	$ci$	$Y1^*$	$c1i$
$B^*$	1	0.713916	$B1^*$	- 0.018134	$D^*$	1	6.458041	$D1^*$	2.020568
	2	- 2.95901		0.421863		2	-9.250782 $10^1$		-2.761516 $10^1$
	3	-1.05259		- 0.085682		3	5.381713 $10^2$		1.459126 $10^2$
	4	-0.1344		0.067321		4	-1.629088 $10^3$		-3.806103 $10^2$
	5	1.7921 $10^{-3}$				5	2.788452 $10^2$		5.202712 $10^2$
	6	-2.28962 $10^{-2}$				6	-2.717711 $10^3$		-3.593878 $10^2$
$C^*$	1	5.7453507	$C1^*$	- 4.326290 $10^{-2}$		7	1.423846 $10^3$		1.006494 $10^2$
	2	-3.352895 $10^1$		4.912242 $10^{-1}$		8	-3.219194 $10^2$		
	3	8.091119 $10^1$		- 1.666754		8			
	4	-9.338645 $10^1$		1.536605					
	5	5.483416 $10^1$		- 1.004801 $10^{-1}$					
	6	-1.476814 $10^1$							

Интервал аппроксимации коэффициентов  $T^*= 0.3 - 3$  для  $B^*, C^*$  и  $0.5 - 5$  для  $D^*$ .

Расчет термодинамических функций пара для УС [П1] проводится с помощью стандартных выражений в переменных  $V, T$ . [1]. В рассматриваемом интервале температур  $< 2000$  К атомы ртути остаются в основном  $6^1S_0$  состоянии, и термодинамические функции пара в стандартном идеально- газовом состоянии имеют простой вид. Например, для изобарно- изотермического потенциала (энергия Гиббса) имеем

$$- |G^0 - H^0_0|/(RT) = 5/2 \ln T - 3/2 \ln M - 3.664965 \quad (\text{П1-5})$$

и соответственно теплоемкость  $C_p^0 = 5/2 R$ , энтропия  $S^0(T, p=1 \text{ атм})$  и т.д.

За начало отсчета энтальпии и энтропии принимается состояние твердой  $\alpha$ - ртути при 0 К. При этом энтальпия атомарного пара  $H^p(T) = \Delta H^0_0 + |H^p - H^0_0|$ , где  $\Delta H^0_0$  – теплота сублимации пара при 0 К. Эта величина одновременно является одним из параметров аппроксимации  $\Delta H^0_0 = a_8$ , его априорная оценка из [1] с соответствующей погрешностью включена в массив исходных данных (см. таблицу 1).

Идеально-газовые функции определяются с использованием изобарной теплоёмкости. Теплоёмкость постоянна и равна

$$c^0_p = c^0_v + R = 3R/2 + R = 12.471765 + 8.31451 = 20.7863, \quad \text{Дж/(Моль·К)}. \quad (\text{П1-6})$$

Энтальпия и энтропия определяются по соотношениям:



$$h^0 = \Delta h^0 + |h_{298}^0 - h_0^0| + \int_{T=298.15}^T c_p^0 dT, \quad (\text{П1-7})$$

где  $|h_{298}^0 - h_0^0| = 269.55$ ,  $\Delta h^0 = a_8$ ,  $a_8$  – искомый параметр априорное значение 64550 Дж/Моль·К.

$$s^0 = s_{298}^0 + \int_{T=298.15}^T \frac{c_p^0}{T} dT, \quad (\text{П1-8})$$

где  $s_{298}^0 = 6.6815$  Дж/(Моль·К).

Для расчета потенциала Гиббса насыщенной жидкости  $g' = h' - Ts'$  удобно использовать значения теплоемкости вдоль линии насыщения  $c'_s(T)$ . При этом имеют место относительно простые зависимости

$$g' = h' - Ts', \quad (\text{П1-9})$$

$$s' = s'(T_{\text{пл}}) + \int_{T_{\text{пл}}}^T \frac{c'_s}{T} dT, \quad (\text{П1-10})$$

где  $s'(T_{\text{пл}}) = a_7$ ,  $a_7$  – искомый параметр, априорное значение 59.2916 кДж/(кмоль К).

$$v' = 10^{-3} \sum_i^8 u_i p / 200.59, \text{ m}^3/\text{kg}, \text{ p} - \text{МПа}, \quad (\text{П1-11})$$

11)

$$h' = h'(T_{\text{пл}}) + \int_{T_{\text{пл}}}^T c'_s dT + \int_{p_s(T_{\text{пл}})}^{p_s} v' dp, \quad (\text{П1-12})$$

где  $T_{\text{пл}} = 234.28$  К,  $h'(T_{\text{пл}}) = 7540.1273$  кДж/кмоль,

$$c'_s = c'_p - T v' \alpha' (dp_s / dT), \quad (\text{П1-13})$$

где  $\alpha' = v'^{-1} (dv'/dT)_p$ ,

$$c'_s = a_4 + a_5 T + a_6 T^2, \quad (\text{П1-14})$$

где  $a_4 - a_6$  – искомые параметры,  $T$ , К.

Последнее слагаемое уравнения (П1-12) было аппроксимировано уравнением

$$\int_{p_s(T_{\text{пл}})}^{p_s} v' dp = \left( \sum_{i=1}^7 w_i \tau^{i-1} \right) \quad (\text{П1-15})$$

$\tau = T/1000$ ,  $T$  К.

i	$u_i$	$w_i$	i	$u_i$	$w_i$
1	14.84909	-2.5903046e+01	5	-0.00006132238	-5.0232247e+03
2	.6680042	2.9586997e+02	6	6.374525e-7	3.3499618e+03
3	-.06538887	-1.4263736e+03	7	-3.20015e-9	-7.0335712e+02
4	.002931117	3.6391727e+03	8	6.189043e-12	

В двухфазной области искалась такая плотность, при которой:  $g' = g'$ , поиск корня организован средствами приложения.

Термодинамические свойства определялись по соотношениям:

$$h = h_0 + RT[(B-B_1)\rho + (C-C_1/2)\rho^2 + (D-D_1/3)\rho^3], \quad (\text{П1-16})$$

$$s = s^0 + R \{ \ln(z) - [(B+B_1)\rho + (C+C_1)\rho^2/2 + (D+D_1)\rho^3/3] \}, \quad (\text{П1-17})$$

$$C_v = C_v^0 - R[(2B_1+B_2)\rho + (2C_1+C_2)\rho^2/2 + (2D_1+D_2)\rho^3/3], \quad (\text{П1-18})$$

$$C_p = C_v + R[1 + (B+B_1)\rho + (C+C_1)\rho^2 + (D+D_1)\rho^3] / [1 + 2B\rho + 3C\rho^2 + 4D\rho^3], \quad (\text{П1-19})$$

$$a = [(C_p/C_v)RT(1 + 2B\rho + 3C\rho^2 + 4D\rho^3)]^{0.5}, \quad (\text{П1-20})$$

Расчёт коэффициентов вязкости и теплопроводности одноатомных газов проводился в первом приближении по:

$$\eta = 2.669 \frac{\sqrt{TM}}{\Omega^{(2,2)*} * d^2}, [\text{мкПа с}], \lambda = 31.18 \eta / \text{М}. \quad (\text{П1-21})$$

Таблица П1-2

Исходная матрица ошибок

4.811e-04							
-8.188e-01	1.546e+03						
-8.840e-03	1.737e+01	2.027e-01					
2.098e-04	-5.277e-01	-7.237e-03	6.411e-02				
-1.297e-06	3.040e-03	4.147e-05	-2.228e-04	8.091e-07			
1.716e-09	-3.798e-06	-5.264e-08	1.719e-07	-6.492e-10	5.455e-13		
2.888e-06	-6.864e-03	-6.843e-05	-4.886e-03	1.215e-05	-7.145e-09	1.236e-03	
1.034e-03	-8.739e-01	-1.040e-02	1.009e+00	-1.718e-03	5.869e-07	-4.137e-01	1.487e+02

Таблица П1-3

Вариация искоемых параметров матрица ошибок

8.641e-04							
7.116e-01	1.445e+03						
1.650e-02	2.684e+01	5.200e-01					
-1.575e-03	-1.540e+00	-3.342e-02	7.322e-03				
6.265e-06	6.250e-03	1.344e-04	-2.949e-05	1.200e-07			
-4.093e-09	-3.879e-06	-8.370e-08	2.226e-08	-9.208e-11	7.385e-14		
-3.197e-05	-4.980e-02	-9.696e-04	1.944e-04	-8.168e-07	6.242e-10	1.350e-05	
1.860e-02	2.076e+01	4.383e-01	-1.483e-01	5.969e-04	-4.481e-07	-7.410e-03	4.969e+00

## ПРИЛОЖЕНИЕ 2

Таблица П2-1

Термодинамические свойства ртути на линии насыщения

T, K	p, МПа	v'	v''	h'	h''	r	s'	s''
		м <sup>3</sup> /кг		кДж/кг		кДж/(кг·К)		
400	1.3875e-04	7.526262e-05	1.1949e+02	60.6	363.3	302.7	0.4188	1.1755
420	3.3064e-04	7.553518e-05	5.2651e+01	63.4	365.3	302.0	0.4255	1.1445
440	7.2686e-04	7.580903e-05	2.5090e+01	66.1	367.4	301.3	0.4319	1.1167
460	1.4898e-03	7.608435e-05	1.2797e+01	68.8	369.5	300.7	0.4379	1.0916
480	2.8723e-03	7.636131e-05	6.9257e+00	71.5	371.6	300.0	0.4437	1.0688
500	5.2477e-03	7.664011e-05	3.9482e+00	74.2	373.6	299.4	0.4493	1.0480
520	9.1430e-03	7.692095e-05	2.3564e+00	77.0	375.7	298.7	0.4546	1.0290
540	1.5272e-02	7.720403e-05	1.4646e+00	79.7	377.7	298.1	0.4597	1.0117
560	2.4570e-02	7.748956e-05	9.4379e-01	82.4	379.8	297.4	0.4646	0.9957
580	3.8222e-02	7.777774e-05	6.2811e-01	85.1	381.8	296.7	0.4694	0.9810
600	5.7691e-02	7.806878e-05	4.3026e-01	87.8	383.9	296.0	0.4740	0.9674
620	8.4739e-02	7.836286e-05	3.0248e-01	90.6	385.9	295.3	0.4785	0.9548
640	1.2145e-01	7.866020e-05	2.1769e-01	93.3	387.9	294.6	0.4828	0.9431
660	1.7021e-01	7.896097e-05	1.6001e-01	96.0	389.9	293.9	0.4870	0.9323
680	2.3378e-01	7.926538e-05	1.1989e-01	98.7	391.9	293.1	0.4911	0.9221
700	3.1520e-01	7.957361e-05	9.1405e-02	101.5	393.8	292.3	0.4950	0.9127
720	4.1786e-01	7.988585e-05	7.0801e-02	104.3	395.8	291.5	0.4989	0.9038
740	5.4546e-01	8.020232e-05	5.5640e-02	107.0	397.7	290.6	0.5027	0.8954
760	7.0198e-01	8.052322e-05	4.4306e-02	109.8	399.5	289.7	0.5064	0.8876

780	8.9170e-01	8.084876e-05	3.5710e-02	112.6	401.4	288.8	0.5100	0.8802
800	1.1191e+00	8.117919e-05	2.9103e-02	115.4	403.2	287.8	0.5135	0.8732
820	1.3891e+00	8.151475e-05	2.3961e-02	118.2	404.9	286.7	0.5170	0.8666
840	1.7065e+00	8.185573e-05	1.9914e-02	121.0	406.7	285.6	0.5203	0.8604
860	2.0765e+00	8.220241e-05	1.6694e-02	123.9	408.4	284.5	0.5237	0.8544
880	2.5046e+00	8.255511e-05	1.4106e-02	126.8	410.0	283.2	0.5269	0.8488
900	2.9962e+00	8.291417e-05	1.2008e-02	129.7	411.6	281.9	0.5301	0.8434
920	3.5571e+00	8.327996e-05	1.0292e-02	132.6	413.1	280.6	0.5333	0.8383
940	4.1928e+00	8.365285e-05	8.8768e-03	135.5	414.6	279.1	0.5364	0.8333
960	4.9095e+00	8.403327e-05	7.7013e-03	138.5	416.1	277.6	0.5395	0.8286
980	5.7129e+00	8.442163e-05	6.7180e-03	141.5	417.4	276.0	0.5425	0.8241
1000	6.6092e+00	8.481839e-05	5.8898e-03	144.5	418.8	274.3	0.5455	0.8197
1020	7.6046e+00	8.522399e-05	5.1881e-03	147.5	420.0	272.5	0.5484	0.8155
1040	8.7051e+00	8.563892e-05	4.5901e-03	150.6	421.2	270.6	0.5513	0.8115
1060	9.9172e+00	8.606363e-05	4.0776e-03	153.8	422.3	268.6	0.5542	0.8075
1080	1.1247e+01	8.649862e-05	3.6361e-03	156.9	423.4	266.5	0.5570	0.8037
1100	1.2701e+01	8.694436e-05	3.2539e-03	160.1	424.4	264.3	0.5598	0.8001
1120	1.4285e+01	8.740133e-05	2.9215e-03	163.3	425.3	261.9	0.5626	0.7965
1140	1.6007e+01	8.786998e-05	2.6312e-03	166.6	426.1	259.5	0.5654	0.7930
1160	1.7871e+01	8.835081e-05	2.3765e-03	169.9	426.9	256.9	0.5681	0.7896
1180	1.9886e+01	8.884427e-05	2.1523e-03	173.3	427.5	254.2	0.5708	0.7863
1200	2.2057e+01	8.935087e-05	1.9542e-03	176.7	428.1	251.4	0.5735	0.7830
1220	2.4392e+01	8.987110e-05	1.7785e-03	180.1	428.6	248.5	0.5762	0.7798
1240	2.6896e+01	9.040552e-05	1.6221e-03	183.6	429.0	245.4	0.5788	0.7767
1260	2.9576e+01	9.095477e-05	1.4825e-03	187.2	429.3	242.1	0.5815	0.7736
1280	3.2440e+01	9.151958e-05	1.3575e-03	190.8	429.5	238.7	0.5841	0.7706
1300	3.5493e+01	9.210086e-05	1.2453e-03	194.5	429.6	235.2	0.5867	0.7676
1320	3.8743e+01	9.269972e-05	1.1443e-03	198.2	429.6	231.4	0.5893	0.7646
1340	4.2195e+01	9.331759e-05	1.0532e-03	202.0	429.5	227.6	0.5919	0.7617
1360	4.5857e+01	9.395630e-05	9.7080e-04	205.8	429.3	223.5	0.5945	0.7588
1380	4.9736e+01	9.461819e-05	8.9610e-04	209.7	429.0	219.3	0.5970	0.7559
1400	5.3836e+01	9.530632e-05	8.2829e-04	213.7	428.5	214.9	0.5996	0.7531
1420	5.8164e+01	9.602457e-05	7.6663e-04	217.7	428.0	210.3	0.6021	0.7502
1440	6.2725e+01	9.677797e-05	7.1049e-04	221.8	427.3	205.5	0.6047	0.7474
1460	6.7524e+01	9.757291e-05	6.5934e-04	225.9	426.5	200.5	0.6072	0.7446
1480	7.2565e+01	9.841752e-05	6.1270e-04	230.2	425.6	195.4	0.6097	0.7418
1500	7.7851e+01	9.932210e-05	5.7019e-04	234.5	424.5	190.1	0.6123	0.7390
1520	8.3383e+01	1.002996e-04	5.3146e-04	238.8	423.4	184.6	0.6148	0.7362
1540	8.9161e+01	1.013665e-04	4.9625e-04	243.3	422.2	178.9	0.6173	0.7335
1560	9.5183e+01	1.025434e-04	4.6429e-04	247.8	420.9	173.1	0.6198	0.7308
1580	1.0144e+02	1.038563e-04	4.3539e-04	252.4	419.6	167.2	0.6223	0.7282
1600	1.0793e+02	1.053381e-04	4.0936e-04	257.1	418.3	161.2	0.6249	0.7256

Таблица П2-2

Термодинамические свойства ртути на линии насыщения

$T, K$	$p, \text{ МПа}$	$z''$	$c_s'$	$c_p''$	$c_v''$	$a''$	$\gamma^*$
--------	------------------	-------	--------	---------	---------	-------	------------

			κДж/( кг·К)			м/с	
400	1.3875e-04	1.0000	27.4784	0.1036	0.0622	166.2	2.5001e-03
420	3.3064e-04	1.0000	27.4146	0.1036	0.0622	170.3	2.3812e-03
440	7.2686e-04	0.9999	27.3603	0.1036	0.0622	174.3	2.2731e-03
460	1.4898e-03	0.9999	27.3153	0.1037	0.0622	178.3	2.1746e-03
480	2.8723e-03	0.9998	27.2798	0.1037	0.0622	182.1	2.0844e-03
500	5.2477e-03	0.9997	27.2538	0.1037	0.0622	185.8	2.0016e-03
520	9.1430e-03	0.9995	27.2371	0.1037	0.0622	189.5	1.9255e-03
540	1.5272e-02	0.9993	27.2299	0.1038	0.0622	193.1	1.8553e-03
560	2.4570e-02	0.9990	27.2322	0.1038	0.0622	196.6	1.7906e-03
580	3.8222e-02	0.9986	27.2439	0.1039	0.0623	200.0	1.7307e-03
600	5.7691e-02	0.9981	27.2650	0.1040	0.0623	203.4	1.6754e-03
620	8.4739e-02	0.9974	27.2955	0.1042	0.0623	206.7	1.6243e-03
640	1.2145e-01	0.9966	27.3355	0.1043	0.0624	209.9	1.5770e-03
660	1.7021e-01	0.9956	27.3849	0.1045	0.0624	213.0	1.5333e-03
680	2.3378e-01	0.9944	27.4438	0.1047	0.0625	216.1	1.4929e-03
700	3.1520e-01	0.9930	27.5120	0.1050	0.0626	219.1	1.4557e-03
720	4.1786e-01	0.9913	27.5898	0.1053	0.0626	222.0	1.4215e-03
740	5.4546e-01	0.9894	27.6769	0.1056	0.0627	224.9	1.3900e-03
760	7.0198e-01	0.9873	27.7735	0.1060	0.0628	227.7	1.3612e-03
780	8.9170e-01	0.9849	27.8795	0.1065	0.0629	230.4	1.3349e-03
800	1.1191e+00	0.9822	27.9950	0.1070	0.0630	233.0	1.3109e-03
820	1.3891e+00	0.9793	28.1199	0.1075	0.0631	235.6	1.2893e-03
840	1.7065e+00	0.9760	28.2542	0.1082	0.0633	238.0	1.2698e-03
860	2.0765e+00	0.9725	28.3980	0.1088	0.0634	240.5	1.2524e-03
880	2.5046e+00	0.9686	28.5512	0.1096	0.0636	242.8	1.2371e-03
900	2.9962e+00	0.9644	28.7138	0.1104	0.0637	245.1	1.2237e-03
920	3.5571e+00	0.9600	28.8859	0.1113	0.0639	247.3	1.2122e-03
940	4.1928e+00	0.9552	29.0674	0.1123	0.0640	249.4	1.2026e-03
960	4.9095e+00	0.9502	29.2584	0.1133	0.0642	251.4	1.1948e-03
980	5.7129e+00	0.9448	29.4588	0.1145	0.0644	253.4	1.1888e-03
1000	6.6092e+00	0.9391	29.6686	0.1157	0.0646	255.3	1.1845e-03
1020	7.6046e+00	0.9332	29.8878	0.1171	0.0648	257.2	1.1821e-03
1040	8.7051e+00	0.9269	30.1165	0.1185	0.0651	259.0	1.1814e-03
1060	9.9172e+00	0.9204	30.3546	0.1201	0.0653	260.7	1.1825e-03
1080	1.1247e+01	0.9135	30.6022	0.1218	0.0655	262.3	1.1854e-03
1100	1.2701e+01	0.9064	30.8592	0.1236	0.0658	263.9	1.1901e-03
1120	1.4285e+01	0.8990	31.1256	0.1256	0.0661	265.5	1.1967e-03
1140	1.6007e+01	0.8913	31.4015	0.1277	0.0663	267.0	1.2052e-03
1160	1.7871e+01	0.8833	31.6868	0.1300	0.0666	268.4	1.2158e-03
1180	1.9886e+01	0.8751	31.9815	0.1324	0.0669	269.8	1.2284e-03
1200	2.2057e+01	0.8666	32.2856	0.1351	0.0672	271.2	1.2432e-03
1220	2.4392e+01	0.8578	32.5993	0.1380	0.0675	272.5	1.2602e-03
1240	2.6896e+01	0.8488	32.9223	0.1411	0.0678	273.8	1.2797e-03
1260	2.9576e+01	0.8395	33.2548	0.1444	0.0682	275.0	1.3018e-03
1280	3.2440e+01	0.8300	33.5967	0.1480	0.0685	276.3	1.3266e-03
1300	3.5493e+01	0.8203	33.9480	0.1520	0.0688	277.5	1.3542e-03
1320	3.8743e+01	0.8103	34.3088	0.1562	0.0691	278.8	1.3850e-03
1340	4.2195e+01	0.8001	34.6790	0.1608	0.0694	280.0	1.4191e-03
1360	4.5857e+01	0.7897	35.0586	0.1658	0.0698	281.4	1.4567e-03
1380	4.9736e+01	0.7791	35.4477	0.1713	0.0700	282.7	1.4980e-03
1400	5.3836e+01	0.7684	35.8463	0.1772	0.0703	284.2	1.5432e-03

1420	5.8164e+01	0.7576	36.2542	0.1836	0.0706	285.7	1.5925e-03
1440	6.2725e+01	0.7466	36.6716	0.1905	0.0708	287.5	1.6459e-03
1460	6.7524e+01	0.7357	37.0984	0.1980	0.0710	289.4	1.7032e-03
1480	7.2565e+01	0.7247	37.5347	0.2061	0.0711	291.5	1.7642e-03
1500	7.7851e+01	0.7139	37.9804	0.2147	0.0711	294.0	1.8283e-03
1520	8.3383e+01	0.7034	38.4355	0.2238	0.0711	296.8	1.8943e-03
1540	8.9161e+01	0.6931	38.9001	0.2333	0.0710	300.1	1.9607e-03
1560	9.5183e+01	0.6834	39.3741	0.2430	0.0708	303.8	2.0252e-03
1580	1.0144e+02	0.6744	39.8575	0.2526	0.0705	308.2	2.0849e-03
1600	1.0793e+02	0.6662	40.3504	0.2619	0.0701	313.2	2.1365e-03

$\gamma^* = 1000 \cdot \alpha''$ , 1/К, где  $\alpha''$  – коэффициент термического расширения

Таблица П2-3

Термодинамические свойства перегретого пара ртути

T, К	z	v, м <sup>3</sup> /кг	h, кДж/кг	s	c <sub>v</sub>	c <sub>p</sub>	a, м/с
				кДж/(кг·К)			
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>p=0.1МПа</b>							
640	0.9972	2.6453e-01	387.9	0.9512	0.0623	0.1042	210.0
660	0.9974	2.7286e-01	390.0	0.9544	0.0623	0.1041	213.2
680	0.9976	2.8119e-01	392.1	0.9576	0.0623	0.1041	216.5
700	0.9978	2.8951e-01	394.2	0.9606	0.0623	0.1041	219.7
720	0.9979	2.9783e-01	396.3	0.9635	0.0623	0.1040	222.8
740	0.9981	3.0614e-01	398.4	0.9664	0.0623	0.1040	225.9
760	0.9982	3.1446e-01	400.4	0.9691	0.0623	0.1040	228.9
780	0.9983	3.2277e-01	402.5	0.9718	0.0623	0.1039	231.9
800	0.9984	3.3108e-01	404.6	0.9745	0.0622	0.1039	234.9
820	0.9985	3.3940e-01	406.7	0.9770	0.0622	0.1039	237.8
840	0.9986	3.4770e-01	408.7	0.9795	0.0622	0.1039	240.7
860	0.9987	3.5601e-01	410.8	0.9820	0.0622	0.1039	243.6
880	0.9988	3.6432e-01	412.9	0.9844	0.0622	0.1038	246.4
900	0.9989	3.7263e-01	415.0	0.9867	0.0622	0.1038	249.2
920	0.9989	3.8093e-01	417.1	0.9890	0.0622	0.1038	252.0
940	0.9990	3.8923e-01	419.1	0.9912	0.0622	0.1038	254.7
960	0.9990	3.9754e-01	421.2	0.9934	0.0622	0.1038	257.4
980	0.9991	4.0584e-01	423.3	0.9955	0.0622	0.1038	260.1
1000	0.9991	4.1414e-01	425.4	0.9976	0.0622	0.1038	262.7
1020	0.9992	4.2244e-01	427.4	0.9997	0.0622	0.1038	265.4
1040	0.9992	4.3075e-01	429.5	1.0017	0.0622	0.1038	267.9
1060	0.9993	4.3905e-01	431.6	1.0037	0.0622	0.1038	270.5
1080	0.9993	4.4735e-01	433.7	1.0056	0.0622	0.1037	273.1
1100	0.9993	4.5565e-01	435.7	1.0075	0.0622	0.1037	275.6
1120	0.9994	4.6394e-01	437.8	1.0094	0.0622	0.1037	278.1
1140	0.9994	4.7224e-01	439.9	1.0112	0.0622	0.1037	280.6
1160	0.9994	4.8054e-01	442.0	1.0130	0.0622	0.1037	283.0
1180	0.9994	4.8884e-01	444.0	1.0148	0.0622	0.1037	285.4
1200	0.9995	4.9714e-01	446.1	1.0165	0.0622	0.1037	287.9
1220	0.9995	5.0543e-01	448.2	1.0183	0.0622	0.1037	290.3

1240	0.9995	5.1373e-01	450.3	1.0199	0.0622	0.1037	292.6
1260	0.9995	5.2203e-01	452.3	1.0216	0.0622	0.1037	295.0
1280	0.9996	5.3033e-01	454.4	1.0232	0.0622	0.1037	297.3
1300	0.9996	5.3862e-01	456.5	1.0248	0.0622	0.1037	299.6
1320	0.9996	5.4692e-01	458.6	1.0264	0.0622	0.1037	301.9
1340	0.9996	5.5521e-01	460.6	1.0280	0.0622	0.1037	304.2
1360	0.9996	5.6351e-01	462.7	1.0295	0.0622	0.1037	306.5
1380	0.9996	5.7180e-01	464.8	1.0310	0.0622	0.1037	308.7
1400	0.9996	5.8010e-01	466.8	1.0325	0.0622	0.1037	311.0
1420	0.9997	5.8840e-01	468.9	1.0340	0.0622	0.1037	313.2
1440	0.9997	5.9669e-01	471.0	1.0354	0.0622	0.1037	315.4
1460	0.9997	6.0498e-01	473.1	1.0369	0.0622	0.1037	317.6
1480	0.9997	6.1328e-01	475.1	1.0383	0.0622	0.1037	319.7
1500	0.9997	6.2157e-01	477.2	1.0397	0.0622	0.1037	321.9
1520	0.9997	6.2987e-01	479.3	1.0411	0.0622	0.1037	324.0
1540	0.9997	6.3816e-01	481.4	1.0424	0.0622	0.1037	326.1
1560	0.9997	6.4646e-01	483.4	1.0437	0.0622	0.1037	328.3
1580	0.9998	6.5475e-01	485.5	1.0451	0.0622	0.1037	330.4
1600	0.9998	6.6304e-01	487.6	1.0464	0.0622	0.1037	332.4
p=1. MIIa							
800	0.9841	3.2634e-02	403.3	0.8780	0.0629	0.1066	233.3
820	0.9852	3.3485e-02	405.5	0.8807	0.0628	0.1064	236.3
840	0.9861	3.4334e-02	407.6	0.8832	0.0628	0.1062	239.3
860	0.9869	3.5182e-02	409.7	0.8857	0.0627	0.1060	242.2
880	0.9877	3.6028e-02	411.8	0.8882	0.0627	0.1058	245.1
900	0.9884	3.6874e-02	414.0	0.8905	0.0626	0.1057	248.0
920	0.9891	3.7718e-02	416.1	0.8929	0.0626	0.1056	250.8
940	0.9897	3.8562e-02	418.2	0.8951	0.0626	0.1055	253.6
960	0.9903	3.9404e-02	420.3	0.8973	0.0625	0.1053	256.4
980	0.9908	4.0247e-02	422.4	0.8995	0.0625	0.1052	259.1
1000	0.9913	4.1088e-02	424.5	0.9016	0.0625	0.1052	261.8
1020	0.9917	4.1929e-02	426.6	0.9037	0.0625	0.1051	264.4
1040	0.9921	4.2769e-02	428.7	0.9058	0.0625	0.1050	267.1
1060	0.9925	4.3608e-02	430.8	0.9078	0.0624	0.1049	269.7
1080	0.9929	4.4448e-02	432.9	0.9097	0.0624	0.1049	272.3
1100	0.9932	4.5286e-02	435.0	0.9117	0.0624	0.1048	274.8
1120	0.9935	4.6124e-02	437.1	0.9135	0.0624	0.1047	277.4
1140	0.9938	4.6962e-02	439.2	0.9154	0.0624	0.1047	279.9
1160	0.9941	4.7800e-02	441.3	0.9172	0.0624	0.1046	282.4
1180	0.9944	4.8637e-02	443.4	0.9190	0.0624	0.1046	284.8
1200	0.9946	4.9474e-02	445.5	0.9208	0.0623	0.1046	287.3
1220	0.9949	5.0310e-02	447.6	0.9225	0.0623	0.1045	289.7
1240	0.9951	5.1146e-02	449.6	0.9242	0.0623	0.1045	292.1
1260	0.9953	5.1982e-02	451.7	0.9259	0.0623	0.1044	294.5
1280	0.9955	5.2817e-02	453.8	0.9275	0.0623	0.1044	296.8
1300	0.9957	5.3653e-02	455.9	0.9291	0.0623	0.1044	299.2
1320	0.9959	5.4488e-02	458.0	0.9307	0.0623	0.1043	301.5
1340	0.9960	5.5323e-02	460.1	0.9323	0.0623	0.1043	303.8
1360	0.9962	5.6157e-02	462.2	0.9338	0.0623	0.1043	306.1
1380	0.9963	5.6992e-02	464.3	0.9354	0.0623	0.1043	308.3
1400	0.9965	5.7826e-02	466.3	0.9369	0.0623	0.1042	310.6
1420	0.9966	5.8660e-02	468.4	0.9383	0.0623	0.1042	312.8
1440	0.9967	5.9494e-02	470.5	0.9398	0.0623	0.1042	315.0

1460	0.9969	6.0328e-02	472.6	0.9412	0.0623	0.1042	317.2
1480	0.9970	6.1162e-02	474.7	0.9426	0.0623	0.1042	319.4
1500	0.9971	6.1995e-02	476.8	0.9440	0.0623	0.1041	321.6
1520	0.9972	6.2828e-02	478.8	0.9454	0.0623	0.1041	323.7
1540	0.9973	6.3662e-02	480.9	0.9468	0.0622	0.1041	325.9
1560	0.9974	6.4495e-02	483.0	0.9481	0.0622	0.1041	328.0
1580	0.9975	6.5328e-02	485.1	0.9494	0.0622	0.1041	330.1
1600	0.9976	6.6160e-02	487.2	0.9508	0.0622	0.1041	332.2
p=10. МПа							
1080	0.9239	4.1360e-03	424.6	0.8094	0.0648	0.1188	264.0
1100	0.9279	4.2306e-03	427.0	0.8116	0.0646	0.1179	266.9
1120	0.9315	4.3246e-03	429.4	0.8137	0.0644	0.1171	269.9
1140	0.9349	4.4179e-03	431.7	0.8158	0.0643	0.1163	272.7
1160	0.9381	4.5107e-03	434.0	0.8178	0.0642	0.1156	275.6
1180	0.9411	4.6030e-03	436.3	0.8197	0.0641	0.1150	278.3
1200	0.9439	4.6948e-03	438.6	0.8217	0.0640	0.1144	281.1
1220	0.9465	4.7861e-03	440.9	0.8236	0.0639	0.1138	283.8
1240	0.9489	4.8771e-03	443.2	0.8254	0.0638	0.1133	286.5
1260	0.9512	4.9677e-03	445.5	0.8272	0.0637	0.1129	289.1
1280	0.9533	5.0580e-03	447.7	0.8290	0.0636	0.1125	291.7
1300	0.9553	5.1479e-03	450.0	0.8307	0.0635	0.1121	294.3
1320	0.9573	5.2375e-03	452.2	0.8324	0.0635	0.1117	296.8
1340	0.9591	5.3269e-03	454.4	0.8341	0.0634	0.1113	299.3
1360	0.9608	5.4160e-03	456.7	0.8358	0.0633	0.1110	301.8
1380	0.9624	5.5048e-03	458.9	0.8374	0.0633	0.1107	304.3
1400	0.9639	5.5935e-03	461.1	0.8390	0.0632	0.1104	306.7
1420	0.9653	5.6819e-03	463.3	0.8405	0.0632	0.1102	309.1
1440	0.9667	5.7701e-03	465.5	0.8421	0.0631	0.1099	311.5
1460	0.9680	5.8581e-03	467.7	0.8436	0.0631	0.1097	313.8
1480	0.9692	5.9459e-03	469.9	0.8451	0.0630	0.1094	316.2
1500	0.9704	6.0336e-03	472.1	0.8466	0.0630	0.1092	318.5
1520	0.9715	6.1210e-03	474.2	0.8480	0.0630	0.1090	320.8
1540	0.9726	6.2084e-03	476.4	0.8494	0.0629	0.1088	323.1
1560	0.9736	6.2956e-03	478.6	0.8508	0.0629	0.1087	325.3
1580	0.9746	6.3826e-03	480.8	0.8522	0.0629	0.1085	327.5
1600	0.9755	6.4695e-03	482.9	0.8536	0.0628	0.1083	329.8
p=25. МПа							
1240	0.8612	1.7705e-03	430.8	0.7807	0.0666	0.1361	276.1
1260	0.8681	1.8136e-03	433.5	0.7829	0.0663	0.1340	279.3
1280	0.8746	1.8561e-03	436.2	0.7850	0.0661	0.1321	282.4
1300	0.8806	1.8980e-03	438.8	0.7870	0.0659	0.1304	285.5
1320	0.8862	1.9395e-03	441.4	0.7890	0.0657	0.1288	288.5
1340	0.8914	1.9805e-03	444.0	0.7910	0.0655	0.1274	291.4
1360	0.8963	2.0211e-03	446.5	0.7928	0.0653	0.1262	294.3
1380	0.9009	2.0613e-03	449.0	0.7947	0.0651	0.1250	297.1
1400	0.9052	2.1011e-03	451.5	0.7965	0.0650	0.1239	299.9
1420	0.9092	2.1407e-03	454.0	0.7982	0.0648	0.1230	302.6
1440	0.9131	2.1800e-03	456.4	0.7999	0.0647	0.1221	305.3
1460	0.9167	2.2190e-03	458.9	0.8016	0.0646	0.1212	308.0
1480	0.9201	2.2577e-03	461.3	0.8033	0.0645	0.1205	310.6
1500	0.9233	2.2963e-03	463.7	0.8049	0.0644	0.1197	313.2
1520	0.9264	2.3346e-03	466.1	0.8064	0.0643	0.1191	315.8
1540	0.9292	2.3727e-03	468.4	0.8080	0.0642	0.1184	318.3

1560	0.9320	2.4106e-03	470.8	0.8095	0.0641	0.1178	320.8
1580	0.9346	2.4484e-03	473.2	0.8110	0.0640	0.1173	323.3
1600	0.9371	2.4859e-03	475.5	0.8125	0.0639	0.1168	325.7
<b>p=50. МПа</b>							
1400	0.7893	9.1604e-04	432.1	0.7580	0.0687	0.1655	287.3
1420	0.7999	9.4169e-04	435.4	0.7603	0.0683	0.1606	290.9
1440	0.8098	9.6669e-04	438.5	0.7625	0.0680	0.1565	294.3
1460	0.8189	9.9113e-04	441.6	0.7647	0.0676	0.1529	297.7
1480	0.8273	1.0151e-03	444.7	0.7667	0.0673	0.1497	300.9
1500	0.8352	1.0386e-03	447.6	0.7687	0.0671	0.1469	304.1
1520	0.8426	1.0617e-03	450.6	0.7707	0.0668	0.1443	307.3
1540	0.8495	1.0845e-03	453.4	0.7725	0.0666	0.1421	310.3
1560	0.8559	1.1069e-03	456.2	0.7743	0.0664	0.1400	313.3
1580	0.8620	1.1291e-03	459.0	0.7761	0.0662	0.1381	316.2
1600	0.8677	1.1510e-03	461.8	0.7778	0.0660	0.1364	319.1
<b>p=75. МПа</b>							
1500	0.7281	6.0358e-04	427.3	0.7419	0.0706	0.2038	295.0
1520	0.7426	6.2385e-04	431.3	0.7446	0.0701	0.1942	298.9
1540	0.7559	6.4333e-04	435.1	0.7470	0.0696	0.1862	302.6
1560	0.7680	6.6216e-04	438.7	0.7494	0.0692	0.1796	306.3
1580	0.7792	6.8043e-04	442.2	0.7516	0.0688	0.1739	309.8
1600	0.7896	6.9821e-04	445.6	0.7538	0.0684	0.1689	314.3

Таблица П2-4

Оценки доверительных погрешностей  $\Delta_{0.9}(y'')$  ТДФ перегретого пара ртути

<b>T,</b> К	$\delta z$	$\delta v$	$\delta h$	$\delta s$	$\delta c_v$	$\delta c_p$	$\delta a$
	%						
1	2	3	4	5	6	7	8
<b>p=0.1 МПа</b>							
700	1.1e-02	1.1e-02	3.6e-02	1.6e-03	4.9e-02	5.9e-02	4.7e-03
800	6.3e-03	6.3e-03	3.5e-02	9.8e-04	2.8e-02	3.5e-02	2.2e-03
900	3.9e-03	3.9e-03	3.4e-02	6.3e-04	1.8e-02	2.2e-02	1.4e-03
1000	2.7e-03	2.7e-03	3.3e-02	4.2e-04	1.2e-02	1.5e-02	1.3e-03
1100	2.0e-03	2.0e-03	3.2e-02	3.0e-04	9.0e-03	1.1e-02	1.2e-03
1200	1.7e-03	1.7e-03	3.1e-02	2.2e-04	6.9e-03	7.9e-03	1.2e-03
1300	1.5e-03	1.5e-03	3.1e-02	1.6e-04	5.4e-03	6.0e-03	1.1e-03
1400	1.4e-03	1.4e-03	3.0e-02	1.2e-04	4.3e-03	4.6e-03	1.1e-03
1500	1.3e-03	1.3e-03	2.9e-02	9.6e-05	3.5e-03	3.6e-03	1.0e-03
1600	1.2e-03	1.2e-03	2.9e-02	7.8e-05	2.9e-03	2.9e-03	9.7e-04
<b>p=1. МПа</b>							
800	6.7e-02	6.7e-02	4.2e-02	1.1e-02	3.0e-01	3.8e-01	2.4e-02
900	4.0e-02	4.0e-02	3.7e-02	7.2e-03	1.8e-01	2.3e-01	1.5e-02
1000	2.7e-02	2.7e-02	3.4e-02	4.8e-03	1.3e-01	1.6e-01	1.3e-02
1100	2.1e-02	2.1e-02	3.3e-02	3.3e-03	9.1e-02	1.1e-01	1.2e-02
1200	1.7e-02	1.7e-02	3.2e-02	2.4e-03	6.9e-02	8.0e-02	1.2e-02



1300	1.5e-02	1.5e-02	3.1e-02	1.8e-03	5.4e-02	6.0e-02	1.1e-02
1400	1.4e-02	1.4e-02	3.0e-02	1.4e-03	4.4e-02	4.7e-02	1.1e-02
1500	1.3e-02	1.3e-02	2.9e-02	1.1e-03	3.6e-02	3.6e-02	1.0e-02
1600	1.3e-02	1.3e-02	2.9e-02	8.5e-04	3.0e-02	2.9e-02	9.7e-03
p=10. МПа							
1100	2.4e-01	2.4e-01	1.0e-01	4.3e-02	1.1e+00	1.3e+00	1.4e-01
1200	1.9e-01	1.9e-01	7.8e-02	2.9e-02	7.9e-01	9.0e-01	1.3e-01
1300	1.7e-01	1.7e-01	6.2e-02	2.1e-02	6.0e-01	6.5e-01	1.2e-01
1400	1.5e-01	1.5e-01	5.2e-02	1.6e-02	4.7e-01	4.8e-01	1.1e-01
1500	1.4e-01	1.4e-01	4.6e-02	1.2e-02	3.8e-01	3.7e-01	1.1e-01
1600	1.3e-01	1.3e-01	4.3e-02	9.6e-03	3.1e-01	2.9e-01	9.9e-02
p=25. МПа							
1300	5.2e-01	5.2e-01	1.6e-01	6.1e-02	1.8e+00	1.9e+00	3.3e-01
1400	4.6e-01	4.6e-01	1.2e-01	4.3e-02	1.3e+00	1.3e+00	3.1e-01
1500	4.1e-01	4.1e-01	1.0e-01	3.3e-02	1.1e+00	9.4e-01	2.8e-01
1600	3.7e-01	3.7e-01	9.1e-02	2.6e-02	8.6e-01	7.1e-01	2.6e-01
p=50. МПа							
1400	1.3e+00	1.3e+00	3.1e-01	1.1e-01	3.6e+00	3.1e+00	7.5e-01
1500	1.1e+00	1.1e+00	2.4e-01	7.4e-02	2.6e+00	1.9e+00	6.6e-01
1600	9.0e-01	9.0e-01	2.0e-01	5.7e-02	2.0e+00	1.3e+00	6.0e-01
p=75. МПа							
1500	2.3e+00	2.3e+00	4.7e-01	1.4e-01	5.1e+00	3.9e+00	1.5e+00
1600	1.8e+00	1.8e+00	3.7e-01	9.8e-02	3.6e+00	2.1e+00	1.2e+00

ro=f(T/100) 0,1,3,4,6,7,8

h = 1.0000000e-02

И1=5 nn3=0 2S=9.142206e+01 GT=-1.3029e-06

КАР=8.0682e-04 LAMB=1.0000e+00 T1=1.0000e+00 Время итерации = 0.31 с. Время решения = с.0.31

PARAMETERS \_\_\_\_\_ ERRORS \_\_\_\_\_ FACTORS \_\_\_\_\_ FISHER'S

1 2.65094925155085e+02 3.21e+00 7.4e+10 1.4e+04  
2 4.56962776701737e+01 1.36e+00 2.8e+16 2.3e+03  
3 -8.87925823092457e+01 2.64e+00 1.1e+17 2.3e+03  
4 4.31391193245112e+01 1.29e+00 2.7e+16 2.2e+03  
5 -4.73607637350537e-04 2.36e-05 1.8e+15 8.0e+02  
6 9.16005922623415e-04 4.58e-05 7.0e+15 8.0e+02  
7 -4.42922971493761e-04 2.21e-05 1.7e+15 8.0e+02  
8 -2.51016110394497e+02 3.21e+00 7.4e+10 1.2e+04  
9 -7.04398172608958e-02 1.54e-03 7.1e+08 4.2e+03

ITERATION LIMIT IS EXEDED

Время решения в секундах= 0.31

Количество дополн. инф. i1= 0 погр.без обр. С коррекцией dкор=8.96e-01

№ \_\_\_\_\_ X[0] \_\_\_\_\_ ERROR \_\_\_\_\_ И1-2 \_\_\_\_\_ X[3],X[4]..... \_\_\_\_\_ X[1]

Hg ro=f(T), N=15

1 1.37696e+01 6.4e-05 4.427e-01 2.032e+02 1.37696e+01 -4.832e-04 -6.654e-05 1.000e-04  
2 1.37444e+01 4.6e-05 1.191e-02 2.132e+02 1.37444e+01 7.941e-05 1.091e-05 1.000e-04  
3 1.37193e+01 3.6e-05 2.285e-01 2.232e+02 1.37193e+01 3.484e-04 4.780e-05 1.000e-04  
4 1.36942e+01 3.2e-05 2.844e-01 2.332e+02 1.36943e+01 3.894e-04 5.333e-05 1.000e-04  
5 1.36693e+01 3.1e-05 1.772e-01 2.432e+02 1.36694e+01 3.080e-04 4.210e-05 1.000e-04  
6 1.36445e+01 3.1e-05 6.336e-02 2.532e+02 1.36445e+01 1.845e-04 2.517e-05 1.000e-04  
7 1.36197e+01 3.1e-05 7.917e-05 2.631e+02 1.36197e+01 6.533e-06 8.898e-07 1.000e-04  
8 1.35950e+01 3.0e-05 2.091e-02 2.731e+02 1.35950e+01 -1.064e-04 -1.446e-05 1.000e-04  
9 1.35704e+01 2.9e-05 1.305e-01 2.831e+02 1.35704e+01 -2.662e-04 -3.612e-05 1.000e-04  
10 1.35459e+01 2.8e-05 1.635e-01 2.931e+02 1.35458e+01 -2.985e-04 -4.043e-05 1.000e-04  
11 1.35214e+01 2.7e-05 1.982e-01 3.031e+02 1.35213e+01 -3.293e-04 -4.452e-05 1.000e-04  
12 1.34969e+01 2.5e-05 2.120e-01 3.131e+02 1.34969e+01 -3.412e-04 -4.605e-05 1.000e-04  
13 1.34726e+01 2.5e-05 1.845e-01 3.231e+02 1.34725e+01 -3.189e-04 -4.296e-05 1.000e-04

14 1.34482e+01 2.4e-05 1.114e-01 3.331e+02 1.34482e+01 -2.482e-04 -3.338e-05 1.000e-04  
15 1.34239e+01 2.4e-05 2.396e-02 3.431e+02 1.34239e+01 -1.153e-04 -1.548e-05 1.000e-04  
16 1.33997e+01 2.4e-05 5.426e-03 3.531e+02 1.33997e+01 -5.497e-05 -7.366e-06 1.000e-04  
17 1.33755e+01 2.4e-05 8.731e-04 3.631e+02 1.33755e+01 2.209e-05 2.955e-06 1.000e-04  
18 1.33514e+01 2.4e-05 3.111e-02 3.731e+02 1.33514e+01 1.321e-04 1.764e-05 1.000e-04  
19 1.33273e+01 2.4e-05 8.418e-02 3.831e+02 1.33273e+01 2.177e-04 2.901e-05 1.000e-04  
20 1.33033e+01 2.4e-05 1.569e-01 3.931e+02 1.33033e+01 2.978e-04 3.962e-05 1.000e-04  
21 1.32792e+01 2.4e-05 1.779e-01 4.031e+02 1.32793e+01 3.176e-04 4.217e-05 1.000e-04  
22 1.32553e+01 2.4e-05 1.569e-01 4.131e+02 1.32553e+01 2.988e-04 3.961e-05 1.000e-04  
23 1.32313e+01 2.3e-05 2.028e-01 4.231e+02 1.32314e+01 3.404e-04 4.503e-05 1.000e-04  
24 1.32074e+01 2.3e-05 1.741e-01 4.331e+02 1.32074e+01 3.159e-04 4.172e-05 1.000e-04  
25 1.31835e+01 2.3e-05 1.857e-01 4.431e+02 1.31836e+01 3.269e-04 4.309e-05 1.000e-04  
26 1.31596e+01 2.2e-05 1.070e-01 4.531e+02 1.31597e+01 2.486e-04 3.271e-05 1.000e-04  
27 1.31358e+01 2.2e-05 5.872e-02 4.631e+02 1.31358e+01 1.845e-04 2.423e-05 1.000e-04  
28 1.31120e+01 2.2e-05 1.298e-02 4.731e+02 1.31120e+01 8.690e-05 1.139e-05 1.000e-04  
29 1.30881e+01 2.2e-05 6.401e-03 4.831e+02 1.30881e+01 6.113e-05 8.001e-06 1.000e-04  
30 1.30643e+01 2.2e-05 4.452e-04 4.931e+02 1.30643e+01 -1.615e-05 -2.110e-06 1.000e-04  
31 1.30405e+01 2.2e-05 2.275e-02 5.031e+02 1.30405e+01 -1.157e-04 -1.508e-05 1.000e-04  
32 1.30167e+01 2.2e-05 7.328e-02 5.131e+02 1.30167e+01 -2.080e-04 -2.707e-05 1.000e-04  
33 1.29929e+01 2.2e-05 1.173e-01 5.231e+02 1.29928e+01 -2.635e-04 -3.424e-05 1.000e-04  
34 1.29690e+01 2.2e-05 1.833e-01 5.331e+02 1.29690e+01 -3.301e-04 -4.281e-05 1.000e-04  
35 1.29452e+01 2.2e-05 1.524e-01 5.431e+02 1.29451e+01 -3.015e-04 -3.903e-05 1.000e-04  
36 1.29213e+01 2.3e-05 2.425e-01 5.531e+02 1.29213e+01 -3.811e-04 -4.924e-05 1.000e-04  
37 1.28974e+01 2.3e-05 2.484e-01 5.631e+02 1.28974e+01 -3.864e-04 -4.984e-05 1.000e-04  
38 1.28735e+01 2.3e-05 1.392e-01 5.731e+02 1.28735e+01 -2.899e-04 -3.732e-05 1.000e-04  
39 1.28496e+01 2.3e-05 6.788e-03 5.831e+02 1.28496e+01 -6.412e-05 -8.239e-06 1.000e-04  
40 1.28256e+01 2.3e-05 2.428e-01 5.931e+02 1.28256e+01 -3.842e-04 -4.928e-05 1.000e-04  
41 1.28017e+01 2.3e-05 3.271e-01 6.031e+02 1.28016e+01 -4.467e-04 -5.719e-05 1.000e-04  
42 1.27776e+01 2.3e-05 8.310e-02 6.131e+02 1.27776e+01 -2.256e-04 -2.883e-05 1.000e-04  
43 1.27536e+01 2.2e-05 1.511e-01 6.231e+02 1.27536e+01 3.048e-04 3.887e-05 1.000e-04  
44 1.27295e+01 2.3e-05 2.615e-01 6.331e+02 1.27294e+01 -4.017e-04 -5.113e-05 1.000e-04  
45 1.27053e+01 2.3e-05 1.648e-03 6.431e+02 1.27053e+01 3.196e-05 4.060e-06 1.000e-04  
46 1.26811e+01 2.3e-05 5.284e-03 6.531e+02 1.26811e+01 5.732e-05 7.269e-06 1.000e-04  
47 1.26568e+01 2.3e-05 3.751e-01 6.631e+02 1.26569e+01 4.839e-04 6.125e-05 1.000e-04  
48 1.26325e+01 2.3e-05 4.719e-01 6.731e+02 1.26326e+01 5.438e-04 6.870e-05 1.000e-04  
49 1.26082e+01 2.3e-05 1.041e-01 6.831e+02 1.26082e+01 2.559e-04 3.227e-05 1.000e-04  
50 1.25837e+01 2.4e-05 2.981e-01 6.931e+02 1.25838e+01 4.339e-04 5.460e-05 1.000e-04  
51 1.25593e+01 2.5e-05 1.465e-01 7.031e+02 1.25593e+01 3.048e-04 3.828e-05 1.000e-04  
52 1.25347e+01 2.6e-05 7.381e-01 7.131e+02 1.25348e+01 6.854e-04 8.591e-05 1.000e-04  
53 1.25101e+01 2.7e-05 1.008e-06 7.231e+02 1.25101e+01 8.025e-07 1.004e-07 1.000e-04  
54 1.24854e+01 2.9e-05 2.734e-02 7.331e+02 1.24854e+01 -1.324e-04 -1.653e-05 1.000e-04  
55 1.24607e+01 3.2e-05 1.495e-01 7.431e+02 1.24607e+01 3.102e-04 3.866e-05 1.000e-04  
56 1.24358e+01 3.6e-05 1.000e-01 7.531e+02 1.24358e+01 -2.543e-04 -3.162e-05 1.000e-04  
57 1.24109e+01 4.0e-05 6.066e-02 7.631e+02 1.24109e+01 -1.984e-04 -2.463e-05 1.000e-04  
58 1.23859e+01 4.5e-05 3.902e-03 7.731e+02 1.23860e+01 5.043e-04 6.246e-05 1.000e-03  
59 1.23609e+01 5.1e-05 1.757e-02 7.831e+02 1.23610e+01 1.072e-03 1.325e-04 1.000e-03  
60 1.23357e+01 5.7e-05 8.330e-02 7.931e+02 1.23360e+01 2.340e-03 2.886e-04 1.000e-03  
61 1.23105e+01 6.4e-05 2.174e-01 8.031e+02 1.23100e+01 -3.787e-03 -4.663e-04 1.000e-03  
62 1.22851e+01 7.1e-05 1.660e-02 8.131e+02 1.22850e+01 -1.049e-03 -1.289e-04 1.000e-03  
63 1.22597e+01 7.8e-05 4.843e-01 8.231e+02 1.22590e+01 -5.676e-03 -6.959e-04 1.000e-03  
64 1.22342e+01 8.6e-05 2.689e-02 8.331e+02 1.22340e+01 -1.340e-03 -1.640e-04 1.000e-03  
65 1.22085e+01 9.4e-05 2.804e-01 8.431e+02 1.22080e+01 -4.338e-03 -5.295e-04 1.000e-03  
66 1.21828e+01 1.0e-04 6.224e-01 8.531e+02 1.21820e+01 -6.476e-03 -7.889e-04 1.000e-03  
67 1.21569e+01 1.1e-04 8.805e-01 8.631e+02 1.21560e+01 -7.718e-03 -9.383e-04 1.000e-03  
68 1.21310e+01 1.2e-04 9.484e-01 8.731e+02 1.21300e+01 -8.028e-03 -9.739e-04 1.000e-03  
69 1.21049e+01 1.3e-04 7.948e-01 8.831e+02 1.21040e+01 -7.365e-03 -8.915e-04 1.000e-03  
70 1.20787e+01 1.4e-04 4.720e-01 8.931e+02 1.20780e+01 -5.688e-03 -6.871e-04 1.000e-03  
71 1.20524e+01 1.4e-04 1.840e+00 9.031e+02 1.20510e+01 -1.125e-02 -1.356e-03 1.000e-03  
72 1.20259e+01 1.5e-04 8.009e-01 9.131e+02 1.20250e+01 -7.441e-03 -8.949e-04 1.000e-03  
73 1.19993e+01 1.6e-04 1.686e+00 9.231e+02 1.19980e+01 -1.082e-02 -1.298e-03 1.000e-03

74 1.19726e+01 1.6e-04 3.160e-01 9.331e+02 1.19720e+01 -4.696e-03 -5.622e-04 1.000e-03  
75 1.19457e+01 1.7e-04 4.647e-01 9.431e+02 1.19450e+01 -5.707e-03 -6.817e-04 1.000e-03  
76 1.19187e+01 1.8e-04 4.256e-01 9.531e+02 1.19180e+01 -5.473e-03 -6.523e-04 1.000e-03  
77 1.18915e+01 1.8e-04 2.203e-01 9.631e+02 1.18910e+01 -3.947e-03 -4.693e-04 1.000e-03  
78 1.18641e+01 1.9e-04 1.272e+00 9.731e+02 1.18630e+01 -9.508e-03 -1.128e-03 1.000e-03  
79 1.18366e+01 1.9e-04 3.888e-01 9.831e+02 1.18360e+01 -5.268e-03 -6.236e-04 1.000e-03  
80 1.18090e+01 2.0e-04 2.370e-03 9.931e+02 1.18090e+01 4.122e-04 4.868e-05 1.000e-03  
81 1.17811e+01 2.1e-04 1.136e-02 1.003e+03 1.17810e+01 -9.046e-04 -1.066e-04 1.000e-03  
82 1.17531e+01 2.2e-04 7.167e-03 1.013e+03 1.17530e+01 -7.203e-04 -8.466e-05 1.000e-03  
83 1.17249e+01 2.4e-04 1.416e-02 1.023e+03 1.17250e+01 1.015e-03 1.190e-04 1.000e-03  
84 1.16965e+01 2.5e-04 2.589e-01 1.033e+03 1.16970e+01 4.351e-03 5.089e-04 1.000e-03  
85 1.16679e+01 2.7e-04 1.187e+00 1.043e+03 1.16690e+01 9.337e-03 1.089e-03 1.000e-03  
86 1.16391e+01 3.0e-04 3.478e+00 1.053e+03 1.16410e+01 1.602e-02 1.865e-03 1.000e-03  
87 1.16102e+01 3.3e-04 3.383e+00 1.063e+03 1.16120e+01 1.584e-02 1.839e-03 1.000e-03  
88 1.15810e+01 3.6e-04 9.101e+00 1.073e+03 1.15840e+01 2.605e-02 3.017e-03 1.000e-03  
89 1.16965e+01 2.5e-04 7.018e+00 1.033e+03 1.16700e+01 -2.265e-01 -2.649e-02 1.000e-02  
90 1.15810e+01 3.6e-04 4.403e+00 1.073e+03 1.15600e+01 -1.812e-01 -2.098e-02 1.000e-02  
91 1.15220e+01 4.4e-04 4.842e+00 1.093e+03 1.15000e+01 -1.910e-01 -2.200e-02 1.000e-02  
92 1.14622e+01 5.3e-04 4.915e+00 1.113e+03 1.14400e+01 -1.934e-01 -2.217e-02 1.000e-02  
93 1.14015e+01 6.4e-04 4.602e+00 1.133e+03 1.13800e+01 -1.882e-01 -2.145e-02 1.000e-02  
94 1.13398e+01 7.6e-04 3.933e+00 1.153e+03 1.13200e+01 -1.749e-01 -1.983e-02 1.000e-02  
95 1.12773e+01 8.9e-04 2.988e+00 1.173e+03 1.12600e+01 -1.533e-01 -1.729e-02 1.000e-02  
96 1.12138e+01 1.0e-03 1.904e+00 1.193e+03 1.12000e+01 -1.230e-01 -1.380e-02 1.000e-02  
97 1.11493e+01 1.2e-03 3.743e+00 1.213e+03 1.11300e+01 -1.735e-01 -1.935e-02 1.000e-02  
98 1.10839e+01 1.3e-03 1.936e+00 1.233e+03 1.10700e+01 -1.255e-01 -1.391e-02 1.000e-02  
99 1.10175e+01 1.5e-03 5.580e-01 1.253e+03 1.10100e+01 -6.780e-02 -7.470e-03 1.000e-02  
100 1.09500e+01 1.6e-03 9.969e-01 1.273e+03 1.09400e+01 -9.118e-02 -9.984e-03 1.000e-02  
101 1.08814e+01 1.7e-03 1.302e+00 1.293e+03 1.08700e+01 -1.049e-01 -1.141e-02 1.000e-02  
102 1.08117e+01 1.8e-03 2.828e-02 1.313e+03 1.08100e+01 -1.555e-02 -1.682e-03 1.000e-02  
103 1.07407e+01 1.9e-03 5.022e-03 1.333e+03 1.07400e+01 -6.598e-03 -7.087e-04 1.000e-02  
104 1.06684e+01 2.0e-03 7.000e-01 1.353e+03 1.06600e+01 -7.843e-02 -8.367e-03 1.000e-02  
105 1.05945e+01 2.1e-03 2.014e-01 1.373e+03 1.05900e+01 -4.236e-02 -4.487e-03 1.000e-02  
106 1.05188e+01 2.2e-03 7.826e-01 1.393e+03 1.05100e+01 -8.410e-02 -8.846e-03 1.000e-02  
107 1.04411e+01 2.3e-03 1.322e-02 1.413e+03 1.04400e+01 -1.101e-02 -1.150e-03 1.000e-02  
108 1.03610e+01 2.4e-03 1.037e-02 1.433e+03 1.03600e+01 -9.826e-03 -1.018e-03 1.000e-02  
109 1.02780e+01 2.5e-03 6.348e-01 1.453e+03 1.02700e+01 -7.752e-02 -7.967e-03 1.000e-02  
110 1.01914e+01 2.6e-03 1.927e-02 1.473e+03 1.01900e+01 -1.362e-02 -1.388e-03 1.000e-02  
111 1.01005e+01 2.7e-03 2.727e-03 1.493e+03 1.01000e+01 -5.170e-03 -5.222e-04 1.000e-02  
112 1.00044e+01 2.8e-03 1.966e-01 1.513e+03 1.00000e+01 -4.432e-02 -4.434e-03 1.000e-02  
113 9.90198e+00 2.9e-03 3.926e-02 1.533e+03 9.90000e+00 -2.001e-02 -1.981e-03 1.000e-02  
114 9.79178e+00 2.9e-03 6.757e-01 1.553e+03 9.80000e+00 8.395e-02 8.220e-03 1.000e-02  
115 9.67216e+00 2.8e-03 6.139e-01 1.573e+03 9.68000e+00 8.101e-02 7.835e-03 1.000e-02  
116 9.60822e+00 2.7e-03 3.168e-02 1.583e+03 9.61000e+00 1.853e-02 1.780e-03 1.000e-02  
117 9.54115e+00 2.7e-03 7.834e-01 1.593e+03 9.55000e+00 9.277e-02 8.851e-03 1.000e-02  
118 9.47065e+00 2.7e-03 8.751e-01 1.603e+03 9.48000e+00 9.878e-02 9.355e-03 1.000e-02  
119 9.39638e+00 2.8e-03 1.856e+00 1.613e+03 9.41000e+00 1.450e-01 1.362e-02 1.000e-02  
120 9.31798e+00 3.0e-03 4.088e-02 1.623e+03 9.32000e+00 2.170e-02 2.022e-03 1.000e-02  
121 9.23506e+00 3.5e-03 2.563e-01 1.633e+03 9.23000e+00 -5.482e-02 -5.063e-03 1.000e-02  
122 9.14721e+00 4.3e-03 5.193e-01 1.643e+03 9.14000e+00 -7.878e-02 -7.206e-03 1.000e-02  
123 9.05395e+00 5.3e-03 1.946e+00 1.653e+03 9.04000e+00 -1.541e-01 -1.395e-02 1.000e-02

2.65094925155085e+02

4.56962776701737e+01

-8.87925823092457e+01

4.31391193245112e+01

-4.73607637350537e-04

9.16005922623415e-04

-4.42922971493761e-04

-2.51016110394497e+02

-7.04398172608958e-02

81\$0.

82\$3.98

83\$3.99  
84\$4  
85\$7.98  
86\$7.99  
87\$8  
88\$0.001  
89\$2.99

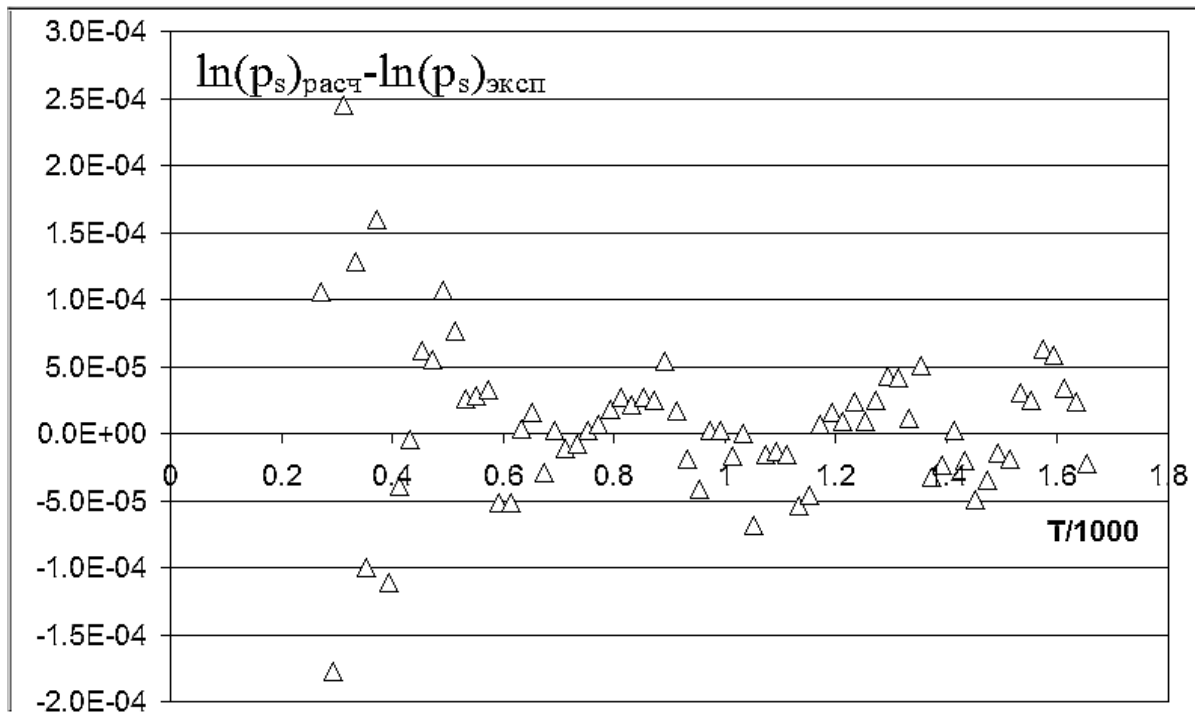
$$b=x[1]/100$$

$$y=pp(b,a,0,1,9,81,0,44)$$

p=-1.5000000e+00 -7.5000000e-01 0.0000000e+00 1.5000000e+00 3.7500000e+00 4.5000000e+00  
5.2500000e+00 6.0000000e+00  
i=1 tbb1= 3.38151e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 1.50000e+00 3.75000e+00 4.50000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=2 tbb1= 3.89009e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 2.25000e+00 3.00000e+00 4.50000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=3 tbb1= 3.94166e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 2.25000e+00 3.00000e+00 3.75000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=4 tbb1= 4.67705e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 1.50000e+00 3.00000e+00 4.50000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=5 tbb1= 5.20603e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 2.25000e+00 3.00000e+00 3.75000e+00  
4.50000e+00 6.00000e+00  
i=6 tbb1= 6.70296e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 2.25000e+00 3.75000e+00 4.50000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=7 tbb1= 6.88095e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 7.50000e-01 1.50000e+00 2.25000e+00 3.00000e+00  
3.75000e+00 6.00000e+00  
i=8 tbb1= 6.90744e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 1.50000e+00 3.00000e+00 3.75000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=9 tbb1= 7.08274e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 7.50000e-01 3.75000e+00 4.50000e+00  
5.25000e+00 6.00000e+00  
i=10 tbb1= 7.11488e-03 -1.50000e+00 -7.50000e-01 0.00000e+00 2.25000e+00 3.00000e+00 3.75000e+00  
4.50000e+00 5.25000e+00

-1.5000000e+00  
-7.5000000e-01  
0.0000000e+00  
1.5000000e+00  
3.7500000e+00  
4.5000000e+00  
5.2500000e+00  
6.0000000e+00

Старый вариант аппроксимации давлений насыщения



Аппроксимация давления насыщения ртути

i	a <sub>i</sub>	δ a <sub>i</sub>
1	2.75347409248352e+01	1.27e+01
2	5.25482553057373e-02	1.32e-02
3	-1.03714790940285e+00	2.91e-01
4	3.23869526386261e+00	3.65e+00
5	2.69467520713806e+01	1.28e+01
6	-3.50559320449829e+01	2.75e+01
7	2.57267713546753e+00	1.89e+01
8	1.29497838020325e+01	1.11e+01
9	-1.15838965177536e+01	4.53e+00
10	4.49793797731400e+00	1.11e+00
11	-6.92934397608042e-01	1.21e-01

$$\ln(p_s) = a_1 \ln(\tau) + \sum_{i=-3}^6 a_{i+5} \tau^i, \tau = T/1000$$

Π=5 nn3=1 2S=2.464365e-01 GT=-3.7725e-02

КАР=3.0711e-06 LAMB=1.0000e+00 T1=1.0000e+00 Время итерации = 0.08 с. Время решения = с.0.17

PARAMETERS \_\_\_\_\_ ERRORS \_\_\_\_ FACTORS \_\_\_\_ FISHER'S

1 2.75347409248352e+01 1.27e+01 1.5e+12 4.5e+00  
 2 5.25482553057373e-02 1.32e-02 6.8e+08 1.5e+01  
 3 -1.03714790940285e+00 2.91e-01 3.8e+10 1.2e+01  
 4 3.23869526386261e+00 3.65e+00 1.0e+12 7.7e-01  
 5 2.69467520713806e+01 1.28e+01 5.6e+12 4.4e+00  
 6 -3.50559320449829e+01 2.75e+01 2.8e+13 1.6e+00  
 7 2.57267713546753e+00 1.89e+01 2.2e+13 1.8e-02  
 8 1.29497838020325e+01 1.11e+01 1.5e+13 1.3e+00

9 -1.15838965177536e+01 4.53e+00 5.4e+12 6.4e+00  
10 4.49793797731400e+00 1.11e+00 7.4e+11 1.6e+01  
11 -6.92934397608042e-01 1.21e-01 2.1e+10 3.2e+01

Время решения в секундах= 0.17

Количество дополн.инф. i1= 0 погр.в % умн.на bb=3 С коррекцией dкор=4.51e-02

№ X[0] ERROR HI-2 X[3],X[4],..... X[1]

lnPs, bar, N=15

1	-1.74291e+01	7.7e-04	1.113e-02	2.732e-01	-1.74290e+01	-6.054e-04	1.055e-04	1.000e-03
2	-1.55808e+01	6.9e-04	3.157e-02	2.932e-01	-1.55810e+01	1.140e-03	-1.777e-04	1.000e-03
3	-1.39722e+01	6.0e-04	6.027e-02	3.131e-01	-1.39720e+01	-1.757e-03	2.455e-04	1.000e-03
4	-1.25601e+01	5.9e-04	1.654e-02	3.332e-01	-1.25600e+01	-1.024e-03	1.286e-04	1.000e-03
5	-1.13109e+01	6.5e-04	1.001e-02	3.532e-01	-1.13110e+01	8.845e-04	-1.000e-04	1.000e-03
6	-1.01982e+01	6.6e-04	2.535e-02	3.731e-01	-1.01980e+01	-1.561e-03	1.592e-04	1.000e-03
7	-9.20089e+00	6.7e-04	1.241e-02	3.931e-01	-9.20100e+00	1.211e-03	-1.114e-04	1.000e-03
8	-8.30216e+00	7.1e-04	1.536e-03	4.132e-01	-8.30220e+00	4.720e-04	-3.919e-05	1.000e-03
9	-7.48820e+00	7.9e-04	2.113e-05	4.331e-01	-7.48820e+00	6.139e-05	-4.597e-06	1.000e-03
10	-6.74766e+00	8.6e-04	3.758e-03	4.531e-01	-6.74760e+00	-9.085e-04	6.130e-05	1.000e-03
11	-6.07116e+00	9.1e-04	3.038e-03	4.732e-01	-6.07110e+00	-9.079e-04	5.512e-05	1.000e-03
12	-5.45081e+00	9.6e-04	1.137e-02	4.931e-01	-5.45070e+00	-1.956e-03	1.066e-04	1.000e-03
13	-4.87998e+00	1.0e-03	5.920e-03	5.131e-01	-4.87990e+00	-1.577e-03	7.694e-05	1.000e-03
14	-4.35303e+00	1.1e-03	6.503e-04	5.332e-01	-4.35300e+00	-5.858e-04	2.550e-05	1.000e-03
15	-3.86513e+00	1.3e-03	7.833e-04	5.532e-01	-3.86510e+00	-7.241e-04	2.799e-05	1.000e-03
16	-3.41213e+00	1.5e-03	1.090e-03	5.732e-01	-3.41210e+00	-9.675e-04	3.301e-05	1.000e-03
17	-2.99045e+00	1.6e-03	2.687e-03	5.931e-01	-2.99050e+00	1.733e-03	-5.184e-05	1.000e-03
18	-2.59695e+00	1.8e-03	2.636e-03	6.131e-01	-2.59700e+00	1.977e-03	-5.135e-05	1.000e-03
19	-2.22890e+00	2.1e-03	1.218e-05	6.331e-01	-2.22890e+00	-1.566e-04	3.489e-06	1.000e-03
20	-1.88392e+00	2.4e-03	2.359e-04	6.532e-01	-1.88390e+00	-8.153e-04	1.536e-05	1.000e-03
21	-1.55987e+00	2.8e-03	8.221e-04	6.732e-01	-1.55990e+00	1.838e-03	-2.867e-05	1.000e-03
22	-1.25490e+00	3.5e-03	4.466e-06	6.932e-01	-1.25490e+00	-1.684e-04	2.113e-06	1.000e-03
23	-9.67348e-01	4.5e-03	1.383e-04	7.131e-01	-9.67360e-01	1.216e-03	-1.176e-05	1.000e-03
24	-6.95732e-01	6.4e-03	6.829e-05	7.331e-01	-6.95740e-01	1.188e-03	-8.263e-06	1.000e-03
25	-4.38732e-01	1.0e-02	5.347e-06	7.531e-01	-4.38730e-01	-5.271e-04	2.312e-06	1.000e-03
26	-1.95167e-01	2.3e-02	5.215e-05	7.732e-01	-1.95160e-01	-3.700e-03	7.221e-06	1.000e-03
27	3.60259e-02	1.2e-01	3.287e-04	7.932e-01	3.60440e-02	5.032e-02	1.813e-05	1.000e-03
28	2.55804e-01	1.7e-02	7.010e-04	8.132e-01	2.55830e-01	1.035e-02	2.648e-05	1.000e-03
29	4.65029e-01	8.9e-03	4.374e-04	8.331e-01	4.65050e-01	4.497e-03	2.091e-05	1.000e-03
30	6.64484e-01	6.2e-03	7.006e-04	8.531e-01	6.64510e-01	3.983e-03	2.647e-05	1.000e-03
31	8.54875e-01	4.7e-03	6.333e-04	8.731e-01	8.54900e-01	2.944e-03	2.516e-05	1.000e-03
32	1.03685e+00	3.9e-03	2.902e-03	8.931e-01	1.03690e+00	5.196e-03	5.387e-05	1.000e-03
33	1.21098e+00	3.4e-03	2.960e-04	9.132e-01	1.21100e+00	1.421e-03	1.720e-05	1.000e-03
34	1.37782e+00	3.0e-03	3.499e-04	9.332e-01	1.37780e+00	-1.358e-03	-1.871e-05	1.000e-03
35	1.53784e+00	2.7e-03	1.735e-03	9.532e-01	1.53780e+00	-2.708e-03	-4.165e-05	1.000e-03
36	1.69150e+00	2.5e-03	3.463e-06	9.731e-01	1.69150e+00	1.100e-04	1.861e-06	1.000e-03
37	1.83920e+00	2.3e-03	5.549e-06	9.931e-01	1.83920e+00	1.281e-04	2.356e-06	1.000e-03
38	1.98132e+00	2.1e-03	2.661e-04	1.013e+00	1.98130e+00	-8.233e-04	-1.631e-05	1.000e-03
39	2.11820e+00	1.9e-03	7.209e-08	1.033e+00	2.11820e+00	-1.268e-05	-2.685e-07	1.000e-03
40	2.25017e+00	1.8e-03	4.699e-03	1.053e+00	2.25010e+00	-3.046e-03	-6.855e-05	1.000e-03
41	2.37752e+00	1.7e-03	2.454e-04	1.073e+00	2.37750e+00	-6.588e-04	-1.566e-05	1.000e-03
42	2.50051e+00	1.6e-03	1.938e-04	1.093e+00	2.50050e+00	-5.567e-04	-1.392e-05	1.000e-03
43	2.61942e+00	1.5e-03	2.378e-04	1.113e+00	2.61940e+00	-5.887e-04	-1.542e-05	1.000e-03
44	2.73445e+00	1.5e-03	2.902e-03	1.133e+00	2.73440e+00	-1.970e-03	-5.387e-05	1.000e-03
45	2.84585e+00	1.4e-03	2.131e-03	1.153e+00	2.84580e+00	-1.622e-03	-4.616e-05	1.000e-03
46	2.95379e+00	1.4e-03	3.876e-05	1.173e+00	2.95380e+00	2.108e-04	6.226e-06	1.000e-03
47	3.05848e+00	1.4e-03	2.569e-04	1.193e+00	3.05850e+00	5.241e-04	1.603e-05	1.000e-03
48	3.16009e+00	1.3e-03	8.285e-05	1.213e+00	3.16010e+00	2.880e-04	9.102e-06	1.000e-03
49	3.25878e+00	1.3e-03	5.527e-04	1.233e+00	3.25880e+00	7.214e-04	2.351e-05	1.000e-03
50	3.35469e+00	1.2e-03	7.615e-05	1.253e+00	3.35470e+00	2.601e-04	8.727e-06	1.000e-03
51	3.44798e+00	1.2e-03	6.230e-04	1.273e+00	3.44800e+00	7.239e-04	2.496e-05	1.000e-03
52	3.53876e+00	1.2e-03	1.814e-03	1.293e+00	3.53880e+00	1.203e-03	4.259e-05	1.000e-03
53	3.62716e+00	1.1e-03	1.738e-03	1.313e+00	3.62720e+00	1.149e-03	4.168e-05	1.000e-03

54 3.71329e+00 1.1e-03 1.363e-04 1.333e+00 3.71330e+00 3.144e-04 1.167e-05 1.000e-03  
55 3.79725e+00 1.1e-03 2.603e-03 1.353e+00 3.79730e+00 1.344e-03 5.102e-05 1.000e-03  
56 3.87913e+00 1.1e-03 1.085e-03 1.373e+00 3.87910e+00 -8.492e-04 -3.294e-05 1.000e-03  
57 3.95902e+00 1.1e-03 5.830e-04 1.393e+00 3.95900e+00 -6.099e-04 -2.415e-05 1.000e-03  
58 4.03700e+00 1.1e-03 4.720e-06 1.413e+00 4.03700e+00 5.382e-05 2.173e-06 1.000e-03  
59 4.11312e+00 1.1e-03 4.203e-04 1.433e+00 4.11310e+00 -4.985e-04 -2.050e-05 1.000e-03  
60 4.18745e+00 1.1e-03 2.488e-03 1.453e+00 4.18740e+00 -1.191e-03 -4.987e-05 1.000e-03  
61 4.26003e+00 1.1e-03 1.203e-03 1.473e+00 4.26000e+00 -8.142e-04 -3.468e-05 1.000e-03  
62 4.33091e+00 1.1e-03 2.098e-04 1.493e+00 4.33090e+00 -3.345e-04 -1.449e-05 1.000e-03  
63 4.40012e+00 1.1e-03 3.757e-04 1.513e+00 4.40010e+00 -4.405e-04 -1.938e-05 1.000e-03  
64 4.46767e+00 1.1e-03 9.187e-04 1.533e+00 4.46770e+00 6.784e-04 3.031e-05 1.000e-03  
65 4.53358e+00 1.2e-03 5.973e-04 1.553e+00 4.53360e+00 5.391e-04 2.444e-05 1.000e-03  
66 4.59784e+00 1.3e-03 4.027e-03 1.573e+00 4.59790e+00 1.380e-03 6.346e-05 1.000e-03  
67 4.66044e+00 1.3e-03 3.470e-03 1.593e+00 4.66050e+00 1.264e-03 5.891e-05 1.000e-03  
68 4.72137e+00 1.2e-03 1.152e-03 1.613e+00 4.72140e+00 7.190e-04 3.394e-05 1.000e-03  
69 4.78058e+00 1.5e-03 5.727e-04 1.633e+00 4.78060e+00 5.006e-04 2.393e-05 1.000e-03  
70 4.83802e+00 2.3e-03 5.262e-04 1.653e+00 4.83800e+00 -4.741e-04 -2.294e-05 1.000e-03  
ss=0.24644

b=x[1]  
g=ln(b)  
y=a[1]\*g  
q=pp(b,a,0,2,11,21,0,44)  
y=y+q

20\$-4  
21\$-3.  
22\$-2  
23\$-1  
24\$0  
25\$1  
26\$2  
27\$3  
28\$4  
29\$5  
30\$6  
31\$7  
32\$8