



$$s_2'' - s_2' = \frac{r}{T_2}, \quad (3)$$

то

$$xr = T_2 (s_1' - s_2'),$$

откуда после подстановки в (1) получим

$$i_1 - i_2 = i_1' - i_2' - T_2 (s_1' - s_2') \frac{\text{ккал}}{\text{кг}}. \quad (4)$$

Здесь  $i_1', i_2'$  — энтальпия кипящей воды соответственно при начальном  $p_1$ , конечном  $p_2$  давлениях, *ата*; <sup>1)</sup>

$x$  — сухость пара, *кг/кг*;

$r$  — теплота парообразования, *ккал/кг*; <sup>1)</sup>

$s_1', s_2', s_2''$  — соответственно энтропия кипящей воды пара, *ккал/кг·°К*; <sup>1)</sup>

$T_2$  — температура кипения при  $p_2$ , *°К*.

Уравнение (4) удобно тем, что в правой его части находятся только табличные величины тепловых параметров кипящей воды.

В таблице термодинамических свойств воды и водяного пара [2] значения тепловых параметров приведены с небольшими интервалами изменения аргумента (давления, температуры). Это дает возможность при расчете процесса истечения кипящей воды с малой разностью давлений использовать табличные значения параметров  $i', s'$  без интерполяции.

На рис. 2, *а* представлены значения величин теплового перепада  $i_1 - i_2$ , которые получаются при расчете из (4) по данным таблиц [2].

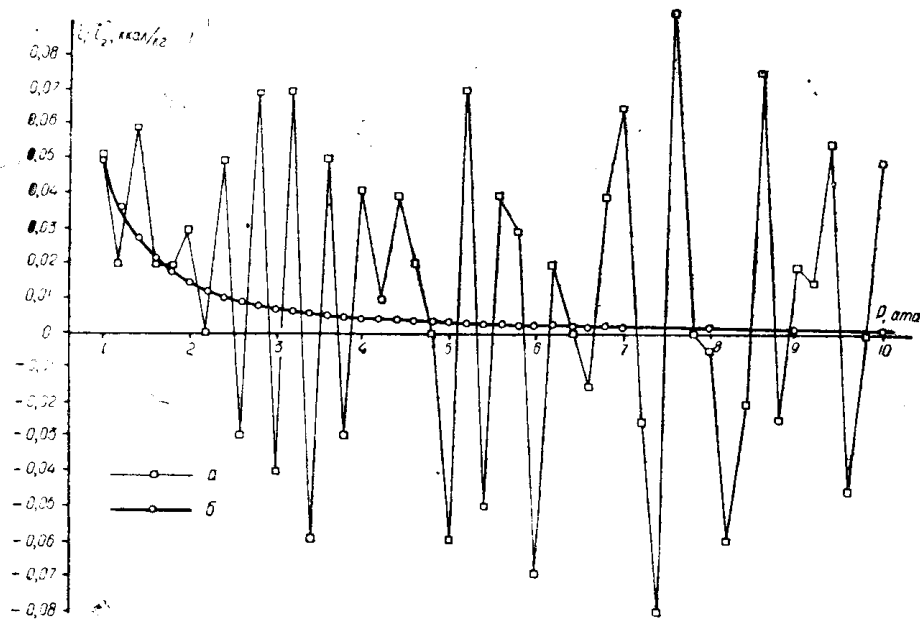


Рис. 2.

Рассчитывались примеры истечения кипящей воды при разности давлений  $0,2 \text{ кг/см}^2$ . Для примеров с начальным давлением  $1-5 \text{ ата}$  эта разность была в два раза больше табличной разности, а при  $5-10 \text{ ата}$  — равна табличной разности. Из рис. 2, *а* видно, что в 19

<sup>1)</sup> Коэффициенты пересчета в систему СИ: давление —  $\text{ат} \times 0,981 = \text{бар}$ , тепловые единицы —  $\text{ккал} \times 4,19 = \text{кдж}$ .

случаях из 45 значение  $i_1 - i_2$  получается равным нулю или отрицательной величине, в остальных случаях — величина  $i_1 - i_2$  положительная, но численные значения ее дают широкий разброс точек на поле  $i_1 - i_2 = f(p_1)$ . Аналогичная картина получается для примеров с начальными давлениями 20—200 *ата* (табл. 1).

Таблица 1

Разность давлений при истечении  $p_1 - p_2 = 2 \text{ кг/см}^2$

$p_1, \text{ ата}$	20	22	60	62	80	82	120	122	160	162	180	182
из (4)	1,0	0,6	0,8	1,3	1,0	-0,1	0,5	0,2	0,7	0,0	1,1	1,21
$(i_1 - i_2) \cdot 10^6$ (6)	0,31	0,26	0,06	0,05	0,034	0,033	0,02	0,02	0,015	0,015	0,014	0,014
$\frac{\text{ккал}}{\text{кг}}$ (8)	0,31	0,26	0,05	0,05	0,035	0,033	0,02	0,02	0,015	0,015	0,015	0,015

Величина разности давлений в  $2 \text{ кг/см}^2$  (табл. 1) превосходит для примеров с  $p_1 = 20 - 22 \text{ ата}$  в 4 раза, а для примеров с  $p_1 = 60 - 80 \text{ ата}$  в 2 раза величину табличной разности давлений. Из табл. 1 видно, что в двух примерах величина  $i_1 - i_2$  оказалась равной нулю или отрицательной величине в остальных случаях значение  $i_1 - i_2$  положительное, но численные значения ее колеблются в широком диапазоне.

Из приведенных примеров на рис. 2, *a* и табл. 1 видно, что из расчета по (4) величины теплового перепада  $i_1 - i_2$  при истечении кипящей воды при разности давлений, близкой к табличной разности аргумента, получаются либо явно ошибочные результаты, либо результаты с малой достоверностью по точности (поле „кривой“ 2, *a*).

Причиной получения указанных результатов из расчета по (4) является то, что величина теплового перепада  $i_1 - i_2$  в рассмотренных примерах будет по абсолютной величине меньшей, чем точность значений энтальпий кипящей воды, с которой приводится эта величина в таблицах. Наличие явно ошибочных результатов ( $i_1 - i_2$  равно нулю или отрицательной величине) показывает, что табличные значения энтальпий и энтропии кипящей воды даны в таблицах без требуемой увязки между собой.

Для проверки высказанного положения автором была составлена таблица первых и вторых разностей энтальпий и энтропии при шаге разности аргумента (давления) в  $0,2 \text{ кг/см}^2$  для всего интервала начальных давлений 1—10 *ата* [3]. В результате оказалось, что в значениях вторых разностей наблюдаются неверные результаты. По энтальпиям значения вторых разностей в 19 случаях из 45 равны нулю или отрицательные. То же наблюдается в 11 случаях по энтропиям.

Характерно заметить, что неверные значения вторых разностей получены в 15 примерах из 19 по энтальпиям и в 7 примерах из 11 по энтропиям для тех же значений аргумента, для которых получены ошибочные величины значений теплового перепада (рис. 2, *a*).

В табл. 2 приведены значения первых разностей, полученных автором статьи путем сглаживания данных таблиц при помощи графической интерполяции. Там же представлены значения величин теплового перепада  $i_1 - i_2$ , которые получаются при расчете из (4) по сглаженным данным. Из табл. 2 видно, что явно ошибочные результаты получены всего в трех примерах. Однако численные результаты опять-таки содержат большие погрешности.

Таблица 2

$P_1$ ата	$(i_1' - i_2') \cdot 10^2,$ ккал/кг	$(S_1' - S_2') \cdot 10^4$ ккал/кг $^\circ$ К	$(i_1 - i_2) 10^2,$ ккал/кг
1,2	519	139	2
1,4	451	119	2
1,6	403	105	3
1,8	366	94	3
2,0	335	85	4
2,2	309	78	3
2,4	287	71,8	2
2,6	269	66,3	4
2,8	253	62	4
3,0	238	58,6	2
3,2	227	55,5	2
3,4	218	52,5	2
3,6	208	49,8	2
3,8	196	47,4	1
4,0	189	45	1
4,2	181	43,2	1
4,4	173	41,4	5
4,6	167	34,3	2
4,8	164	38,5	2
5,0	158	37,2	3
5,2	153	35,7	2
5,4	149	34,5	2
5,6	145	33,4	2
5,8	140	32,2	2
6,0	136	31,3	2
6,2	133	30,5	2
6,4	130	29,7	2
6,6	126	29,0	0
6,8	123	28,2	1
7,0	120	27,5	0
7,2	118	26,8	1
7,4	116	26,2	1
7,6	113	25,6	0
7,8	111	25,0	1
8,0	109	24,4	1
8,2	107	23,9	1
8,4	105	23,4	2
8,6	103	22,9	3
8,8	101	22,5	2
9,0	99	22,1	2
9,2	98	21,7	1
9,4	97	21,3	1
9,6	96	21,0	1
9,8	95	20,7	2
10,0	94	20,4	2

Для устранения погрешностей был испробован путь проведения серии расчетов величины  $i_1 - i_2$  из уравнения (4) при разных значениях разности давлений  $p_1 - p_2$  для заданной величины противодавления  $p_2$  с графической обработкой результатов (рис. 3).

Из графиков наглядно видна степень отклонения получаемых из расчета по (4) значений  $i_1 - i_2$  от средних значений. Однако для примеров истечения с малой разностью давлений средние значения получены ненадежно. Для этих случаев лучшим оказался следующий графоаналитический способ с помощью  $T-S$  диаграммы.

Известно, что если состояние кипящей воды в начале процесса характеризуется точкой 1 (рис. 1), то площадь 12'041 соответствует

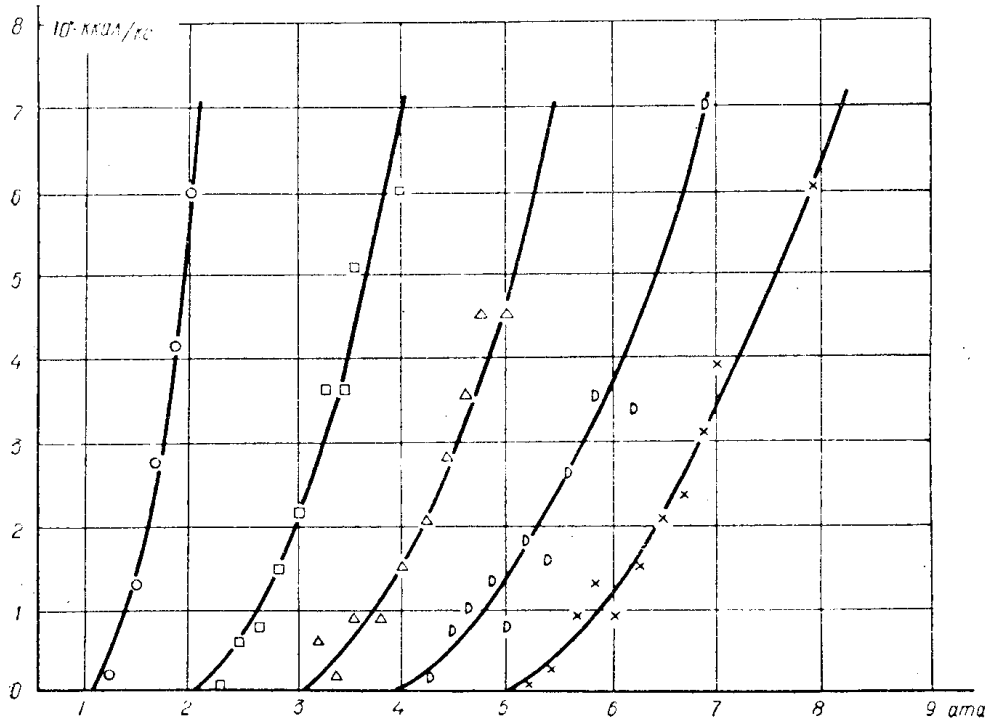


Рис. 3.

в масштабе численному значению величины энтальпии  $i_1$ , площадь 22'0432—величине энтальпии в конце процесса  $i_2$  [4]. Величина разности энтальпий  $i_1 - i_2$  соответственно оказывается равной площади фигуры 123.

Для примеров истечения при малой разности давлений можно допустить, что участок пограничной кривой 1—3 есть прямая. Тогда можно записать

$$F_{пл123} = \frac{1}{2} (T_1 - T_2) (s'_1 - s''_2), \quad (5)$$

откуда

$$i_1 - i_2 = \frac{1}{2} (T_1 - T_2) (s_1^1 - s_2^1). \quad (6)$$

Аналогично, из пл. 3'312'1 получим

$$i'_1 - i'_2 = \frac{1}{2} (T_1 + T_2) (s'_1 - s'_2). \quad (7)$$

С учетом (7) выражение (6) переписывается в виде

$$i_1 - i_2 = \frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} (i'_1 - i'_2). \quad (8)$$

На рис. 2, б приведены значения  $i_1 - i_2$ , полученные расчетом из (6) для тех же примеров, что и для кривой рис. 2, а. Те же самые результаты (в пределах точности данных рис. 2) получены из (8).

Из рис. 2, б видно, что значения  $i_1 - i_2$  укладываются во всех примерах на одну кривую на поле зависимости  $i_1 - i_2 = f(p_1)$ . Аналогичные результаты расчетов из (6) и (8) приведены в табл. 1.

### Выводы

1. В таблицах термодинамических свойств воды и водяного пара значения параметров кипящей воды приводятся с меньшей точностью, чем величина их разности в пределах шага разности значения аргумента.

2. Для определения теплового перепада при адиабатном расширении (истечении) кипящей воды по существующим таблицам наиболее удобными являются: при малых разностях давлений—расчет по уравнению (6) или (8), при больших—путем серии расчетов по уравнению (4) с графической обработкой результатов.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Гурченко А. А. К расчету параметров в потоке при истечении кипящей воды. Изв. ТПИ, т. 110, 1962.
  2. Вукалович М. П. Термодинамические свойства воды и водяного пара. Машгиз, 1958.
  3. Безикович Я. С. Приближенные вычисления. ГИТЛ, 1941.
  4. Литвин А. М. Техническая термодинамика. ГЭИ, 1956.
-