

3. При обработке экспериментов на трубчатой поверхности удельный тепловой поток  $q$  определялся по отношению ко всей смачиваемой поверхности. На фиг. 2 (б) приведены результаты экспериментов при  $s = 0$ . В диапазоне чисел Рейнольдса  $R_x$  от  $5 \cdot 10^4$  до  $2 \cdot 10^6$  экспериментальные данные описываются формулой (кривая 1)

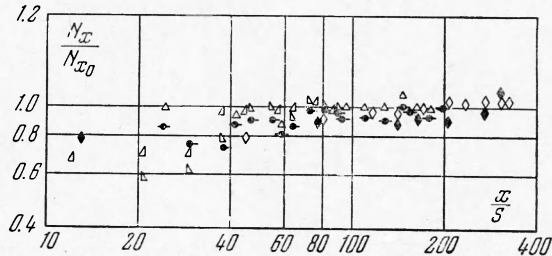
$$N_x^* = 0.0026R_x \quad (3.1)$$

т. е. коэффициент теплообмена  $\alpha^*$  не зависит от линейного размера. Точки, для которых выполняется зависимость (3.1), расположены на расстояниях от начала панели  $x / \Delta > 6$ . Для первых трубок выполняется соотношение  $N_x^* =$

$= 0.0263R_x^{0.8}$  (кривая 2). Аналогичный вид шероховатости исследовался Нуннером [5] в круглой трубе. В условиях развитого турбулентного течения им также получена очень слабая зависимость коэффициента теплообмена от линейного размера ( $\sim d^{-0.07}$ ). Число Стэнтона  $S = \alpha^* / \gamma C_p W$  в его экспериментах с точностью до 10% составляло  $3.7 \cdot 10^{-3}$ , что совпадает со значением числа Стэнтона в описываемых опытах. Вероятно, начиная с некоторого отношения толщины пограничного слоя к радиусу трубки (характерному размеру шероховатости), процесс теплообмена определяется исключительно характером течения вблизи трубок и становится автомодельным по отношению к толщине пограничного слоя. Область автомодельности устанавливается очень быстро на первых трубках.

На фиг. 2 (в) приведены экспериментальные данные по теплообмену на трубчатой поверхности при наличии пристеночной струи с  $m \leq 1$ . Режимные параметры проведенных экспериментов даны в таблице. Коэффициент теплообмена, как и для гладкой поверхности, определялся по формуле (2.1). Значения  $t_{aw}$  брались из фиг. 8 работы [1]. Нанесены точки для  $x / s > 30$ . Сплошная линия — зависимость (3.1). Как видно, и для поверхности с крупномасштабной шероховатостью коэффициент теплообмена при наличии пристеночной струи, определяемый по формуле (2.1), практически совпадает с коэффициентом теплообмена при отсутствии вдува.

Фиг. 3



Поступила 23 IX 1964

## ЛИТЕРАТУРА

1. Seban R. A. Heat Transfer and Effectiveness for a Turbulent Boundary Layer with Tangential Fluid Injection. Trans. ASME, C, 1960, vol. 82, No. 4.
2. К у т а т е л а д з е С. С., Л е о н т ь е в А. И. Тепловая завеса при турбулентном пограничном слое газа. Теплофиз. высоких температур, 1963, т. 1, № 2.
3. Г а р т н е т т, Э к к е р т, Б и р к е б а к. Анализ основных характеристик турбулентного пограничного слоя с подачей воздуха через тангенциальные щели. Тр. Америк. об-ва инж.-мех. (русск. перев.), Теплопередача, сер. С, 1961, т. 83, № 3.
4. N u n n e r W. Wärmeübergang and Druckabfall in rauhen Röhren. VDI-Forschungsheft, 455, Düsseldorf, 1956.

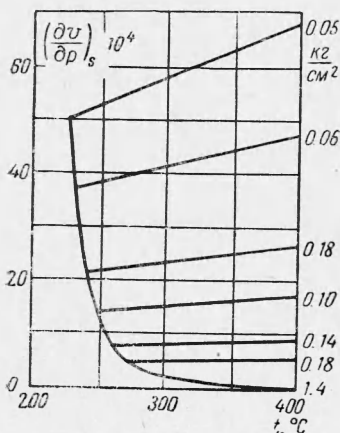
ТЕРМОДИНАМИЧЕСКАЯ ДИАГРАММА  $t, S$  ДЛЯ РТУТИ,  
ПОСТРОЕННАЯ ПО ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫМ ДАННЫМ  
О СКОРОСТИ ЗВУКА

И. И. Новиков, Е. П. Шелудяков  
(Новосибирск)

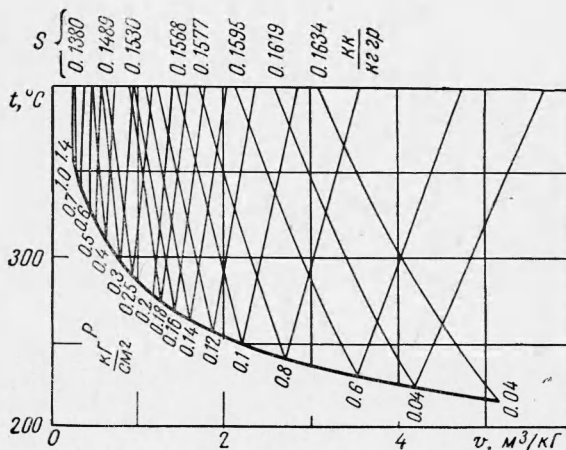
В последнее время ртуть привлекает все большее внимание. Это связано, в первую очередь, с наметившейся перспективой использования ее жидкой и паровой фаз в качестве теплоносителя и рабочего вещества в целом ряде энергетических установок. Поэтому ясно, что исследование термодинамических свойств ртути приобретает особое значение. Попытки создания таблиц термодинамических свойств ртути предприни-

мались неоднократно. Можно указать на таблицы Шелдона [1], Экка [2], на результаты М. П. Вукаловича и Л. Р. Фокина<sup>1</sup> и т. д.

Для построения энтропийной диаграммы ртути  $t, S$  авторами использован метод [3], основывающийся на использовании экспериментальных данных по скорости зву-



Фиг. 1



Фиг. 2

Фиг. 1. Значения производной  $(dv/dp)_s$  для ртути по изобарам и линии насыщения

Фиг. 2. Изоэнтропы для ртути в координатах  $t, v$ , построенные по данным о скорости звука

ка, сущность которого заключается в следующем. Как известно, скорость звука  $c$  выражается через удельный объем  $v$  и производную  $(\partial p / \partial v)_s$  при помощи уравнения

$$c = \sqrt{-gv^2(\partial p / \partial v)_s} \tag{1}$$

Располагая данными о зависимости  $p-v-t$ , можно по значению скорости звука вычислить производную  $(\partial p / \partial v)_s$  в данном состоянии. Затем, используя выраже-

Таблица 1

Изобары в координатах  $t$  [°C],  $S$  [ккал/кг гр] ( $p$  [кг/см<sup>2</sup>])

| $t$        | $S$    | $t$        | $S$     | $t$        | $S$    | $t$        | $S$    | $t$        | $S$     | $t$       | $S$     |
|------------|--------|------------|---------|------------|--------|------------|--------|------------|---------|-----------|---------|
| $p = 0.05$ |        | 320        | 0.1600  | 400        | 0.1604 | 360        | 0.1557 | 380        | 0.1497  | 400       | 0.1447  |
| 224.5      | 0.1634 | 320        | 0.1609  | $p = 0.16$ |        | 380        | 0.1565 | 400        | 0.1504  | $p = 0.8$ |         |
| 240        | 0.1643 | 340        | 0.1618  | 268        | 0.1539 | 400        | 0.1573 | $p = 0.5$  |         | 341.5     | 0.1412  |
| 260        | 0.1654 | 360        | 0.1626  | 280        | 0.1545 | $p = 0.25$ |        | 318.8      | 0.1448  | 360       | 0.1419  |
| $p = 0.06$ |        | 330        | 0.1634  | 300        | 0.1554 | 286.7      | 0.1504 | 340        | 0.1457  | 380       | 0.1427  |
| 230.9      | 0.1619 | 400        | 0.1642  | 320        | 0.1563 | 300        | 0.1510 | 360        | 0.1465  | 400       | 0.1434  |
| 240        | 0.1623 | $p = 0.12$ |         | 340        | 0.1570 | 320        | 0.1518 | 380        | 0.1474  | $p = 0.9$ |         |
| 360        | 0.1633 | 256.7      | 0.1563  | 360        | 0.1578 | 340        | 0.1526 | 400        | 0.1482  | 349.2     | 0.1403  |
| 280        | 0.1644 | 260        | 0.1564  | 380        | 0.1585 | 360        | 0.1534 | $p = 0.55$ |         | 360       | 0.1407  |
| 300        | 0.1654 | 280        | 0.1573  | 400        | 0.1593 | 380        | 0.1542 | 322.5      | 0.1444  | 380       | 0.1415  |
| $p = 0.08$ |        | 300        | 0.1582  | $p = 0.18$ |        | 400        | 0.1550 | 340        | 0.1448  | 400       | 0.1422  |
| 241.0      | 0.1595 | 320        | 0.1591  | 272.9      | 0.1530 | $p = 0.3$  |        | 360        | 0.1456  | $p = 1.0$ |         |
| 260        | 0.1604 | 340        | 0.1599  | 280        | 0.1533 | 294.4      | 0.1489 | 380        | 0.1464  | 355.0     | 0.1394  |
| 280        | 0.1614 | 260        | 0.16075 | 300        | 0.1542 | 300        | 0.1492 | 400        | 0.1471  | 360       | 0.1396  |
| 300        | 0.1623 | 380        | 0.1616  | 320        | 0.1551 | 320        | 0.1501 | $p = 0.6$  |         | 380       | 0.1405  |
| 320        | 0.1632 | 400        | 0.1624  | 340        | 0.1559 | 340        | 0.1509 | 327.0      | 0.1434  | 401       | 0.1413  |
| 340        | 0.1641 | $p = 0.14$ |         | 360        | 0.1567 | 360        | 0.1517 | 340        | 0.1439  | $p = 1.2$ |         |
| 360        | 0.1650 | 262.7      | 0.1550  | 380        | 0.1574 | 380        | 0.1525 | 360        | 0.1447  | 364.0     | 0.1380  |
| 380        | 0.1659 | 280        | 0.1558  | 400        | 0.1583 | 400        | 0.1532 | 380        | 0.14555 | 380       | 0.1386  |
| 400        | 0.1668 | 300        | 0.1566  | $p = 0.4$  |        | $p = 0.4$  |        | 400        | 0.14625 | 400       | 0.1394  |
| $p = 0.1$  |        | 320        | 0.1574  | 277.3      | 0.1521 | 308.0      | 0.1466 | $p = 0.7$  |         | $p = 1.5$ |         |
| 249.0      | 0.1577 | 340        | 0.1581  | 300        | 0.1532 | 320        | 0.1471 | 335.9      | 0.1422  | 373.0     | 0.1368  |
| 260        | 0.1582 | 360        | 0.1589  | 320        | 0.1540 | 340        | 0.1480 | 360        | 0.1432  | 380       | 0.13705 |
| 280        | 0.1591 | 380        | 0.1597  | 340        | 0.1548 | 360        | 0.1489 | 380        | 0.1440  | 400       | 0.13775 |

<sup>1</sup> Вукалович М. П., Фокин Л. Р. Термодинамические свойства ртути. Отчет МЭИ, 1963

ние для полного дифференциала объема

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s dp + \left(\frac{\partial v}{\partial s}\right)_p ds$$

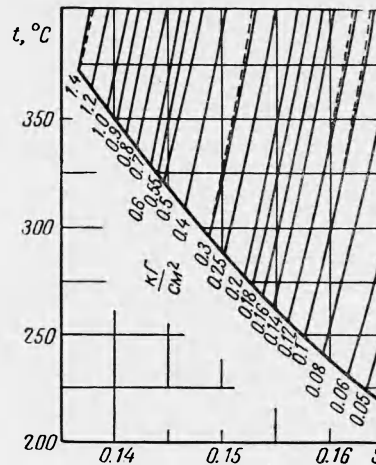
для процесса  $s = \text{const}$  имеем

$$dv = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s dp, \text{ или } \Delta v = \left(\frac{\partial v}{\partial p}\right)_s \Delta p \quad (2)$$

Соотношение (2) позволяет рассчитывать изменение удельного объема  $v$  по выбранной изоэнтропе  $s = \text{const}$  при заданном изменении давления  $\Delta p$ .

Таким образом, можно осуществить непосредственно по экспериментальным данным построение энтропийной диаграммы.

Фиг. 3. Изобары для ртути в координатах  $t, S$



Ранее авторами была измерена скорость звука в насыщенных и перегретых парах ртути в интервале температур 225—400° С и давлений 0.05—2.2 кг / см<sup>2</sup>. Погрешность в определении скорости звука не превышала 0.5%.

Для увязки результатов расчет удельных объемов пара производился по такому же уравнению, как и в работе М. П. Вукаловича и Л. Р. Фокина. Кроме того, была

принята та же зависимость  $p_s - S$  (давление-энтропия) на линии насыщения.

По формуле (1) были определены значения производной  $(\partial v / \partial p)_s$  (фиг. 1), при помощи которых произведен расчет изоэнтроп в координатах  $v - t$  (фиг. 2) с шагом, обеспечивающим достаточную точность построения диаграммы  $t - S$ . Расчет  $v$  и  $t$  в каждой точке изоэнтропы производился по параметрам предшествующей точки методом последовательных приближений. Начальные точки всех изоэнтроп лежат на линии насыщения. Результаты расчета изобар и изоэнтроп в координатах  $v - t$  были использованы для построения изобар и изохор в координатах  $t[^\circ\text{C}]$  и  $S[\text{ккал/кг гр}]$  (фиг. 3 и табл. 1 и 2).

На фиг. 3 приведены пунктиром также изобары для значений  $p = 0.1, 0.12, 0.3, 1.4$  кг / см<sup>2</sup> по данным М. П. Вукаловича и Л. Р. Фокина. Вблизи линии насыщения изобары

практически совпадают с результатами авторов (сплошные линии), при повышении температуры несколько расходятся; однако максимальное расхождение по температуре во всех случаях не превышает 1%.

Поступила 16 III 1965

ЛИТЕРАТУРА

- Scheldon L. A. Properties of mercury vapor. Trans. ASME, 1924, 46.
- Eck H. Zahlentafel und Diagramme für Quecksilberdampf. Forschung, 1933, No. 1, 4.
- Новиков И. И., Трелин Ю. С. Построение энтропийных диаграмм по экспериментальным данным о скорости звука. Атомная энергия, 1961, т. 10, № 5.

Таблица 2  
Изохоры в координатах  $t, S$  ( $v, \text{м}^3/\text{кг}$ )  $t^\circ, C, S$  ккал/кг гр

| $t$     | $S$     | $t$     | $S$     | $t$     | $S$     |
|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| $v=0.2$ |         |         |         |         |         |
| 371.7   | 0.1370  | 360     | 0.1494  | 340     | 0.1590  |
| 380     | 0.1372  | 380     | 0.1500  | 360     | 0.1595  |
| 400     | 0.1376  | 400     | 0.1506  | 380     | 0.1600  |
| $v=1.0$ |         |         |         |         |         |
| $v=0.3$ |         |         |         |         |         |
| 347.2   | 0.1404  | 284.3   | 0.1508  | 237.5   | 0.1604  |
| 360     | 0.14075 | 300     | 0.1512  | 260     | 0.1611  |
| 380     | 0.1414  | 320     | 0.15175 | 280     | 0.16165 |
| 400     | 0.1420  | 340     | 0.15225 | 300     | 0.1622  |
| $v=0.4$ |         |         |         |         |         |
| 330.3   | 0.1430  | 360     | 0.1528  | 320     | 0.1627  |
| 340     | 0.1432  | 380     | 0.1533  | 340     | 0.1632  |
| 360     | 0.1436  | 400     | 0.1538  | 360     | 0.1638  |
| 380     | 0.1441  | $v=1.5$ |         |         |         |
| 400     | 0.1446  | 226     | 0.1544  | 380     | 0.1643  |
| $v=0.5$ |         |         |         |         |         |
| 318.7   | 0.1448  | 280     | 0.1547  | 400     | 0.1649  |
| 340     | 0.1453  | 300     | 0.1553  | $v=3.5$ |         |
| 370     | 0.1458  | 320     | 0.1558  | 231.6   | 0.1617  |
| 380     | 0.1463  | 340     | 0.1564  | 260     | 0.1626  |
| 400     | 0.1468  | 360     | 0.1569  | 280     | 0.1632  |
| $v=0.7$ |         |         |         |         |         |
| 301.8   | 0.1476  | 380     | 0.15745 | 300     | 0.1636  |
| 320     | 0.1482  | 400     | 0.1580  | 320     | 0.1643  |
| 340     | 0.1488  | $v=2.0$ |         |         |         |
| $v=0.8$ |         |         |         |         |         |
| $v=0.9$ |         |         |         |         |         |
| $v=1.0$ |         |         |         |         |         |
| $v=1.2$ |         |         |         |         |         |
| $v=1.5$ |         |         |         |         |         |
| $v=2.0$ |         |         |         |         |         |
| $v=3.0$ |         |         |         |         |         |
| $v=3.5$ |         |         |         |         |         |
| $v=4.0$ |         |         |         |         |         |