**МЕЖГОСУДАРСТВЕННАЯ СИСТЕМА ДАННЫХ**

**О ФИЗИЧЕСКИХ КОНСТАНТАХ И СВОЙСТВАХ**

**ВЕЩЕСТВ И МАТЕРИАЛОВ**

УДК 536.71

**СТАНДАРТНЫЕ СПРАВОЧНЫЕ ДАННЫЕ**

ХЛОР ЖИДКИЙ И ГАЗООБРАЗНЫЙ.
ПЛОТНОСТЬ ПРИ ТЕМПЕРАТУРАХ ОТ 172,17 К ДО 440 К И ДАВЛЕНИЯХ ДО 20 МПА

**ССД СНГ 400 – 2025 (ГСССД 400 – 2022)**

(**ОКОНЧАТЕЛЬНАЯ РЕДАКЦИЯ, ШИФР ТЕМЫ: RU.3.003-2025)**

Москва – 2025

РАЗРАБОТАНЫ Межгосударственным техническим комитетом по стандартизации МТК 180 «Межгосударственная служба стандартных справочных данных»

ВНЕСЕНЫ Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии

АВТОРЫ д.т.н. А. Д. Козлов, К. В. Матвеев, Е. Ю. Скотаренко

СОГЛАСОВАНЫ С национальными органами по стандартизации стран СНГ

РЕКОМЕНДОВАНЫ Научно-технической комиссией по метрологии Межгосударственного Совета по стандартизации, метрологии и сертификации

ПРИНЯТЫ Евразийским советом по стандартизации, метрологии и сертификации (протокол от 2025 г., № –2025)

УДК 536.71

ГОСУДАРСТВЕННАЯ СЛУЖБА

СТАНДАРТНЫХ СПРАВОЧНЫХ ДАННЫХ

|  |  |
| --- | --- |
| **Стандартные справочные данные** |  |
| Хлор жидкий и газообразный. Плотность при температурах от 172,17 К до 440 К и давлениях до 20 МПа | **ССД СНГ****400 – 2025****ГСССД****400 – 2022** |
| **Standard Reference Data** |  |
| Chlorine, Liquid and Gaseous. Density at temperatures from 172.17 K to 440 K and pressures up to 20 MPa | **SSD CNG****400 – 2025****GSSSD****400 – 2022** |

**СОДЕРЖАНИЕ**

[Методика расчета 5](#_Toc103348829)

[1 Фундаментальное уравнение состояния 5](#_Toc103348830)

[2 Расчёт плотности и давления насыщенных паров 6](#_Toc103348831)

[3 Неопределённости рассчитанных значений плотности и давления насыщенных паров 7](#_Toc103348832)

[4 Таблицы с данными, необходимыми для расчёта 8](#_Toc103348833)

[Таблицы значений плотности хлора в однофазных областях со значениями относительной неопределённости 10](#_Toc103348834)

[Таблицы значений плотности и давления хлора на линии насыщения со значениями относительной неопределённости 20](#_Toc103348835)

[Приложение А 22](#_Toc103348836)

[Характеристика уравнения состояния 22](#_Toc103348837)

[Приложение Б 23](#_Toc103348838)

[Вычисление плотности в однофазных областях итерационным методом 23](#_Toc103348839)

[Список литературы 25](#_Toc103348840)

# **Методика расчета**

## **1 Фундаментальное уравнение состояния**

Настоящие стандартные справочные данные содержат значения плотности ρ хлора (Cl) как в однофазных областях (газ, жидкость, сверхкритический флюид), так и на линии фазового перехода газ-жидкость (линии насыщения), приводятся также значения давления насыщения *ps*. Таблицы охватывают область температур от тройной точки 172,17 К до 440 К и давлений от 0,0014 до 20 МПа за исключением околокритической области:
0,98 ≤ T/Tкр ≤ 1,1 и 0,7 ≤ ρ/ρкр ≤ 1,4. Значения плотности ρкр и температуры Tкр в критической точке приведены в таблице 1.

Приведённые далее значения плотности ρ и давления насыщения *ps* рассчитаны по фундаментальному уравнению состояния (ФУС), описывающему свободную энергию Гельмгольца в зависимости от температуры *Т* и плотности ρ; уравнение взято из работы [1]. Разработка данного уравнения обусловлена тем, что уравнение, приведённое в текущем стандарте ИЮПАК [2] не отвечает современным стандартам, применяемым к фундаментальным уравнениям, и даёт недостоверные результаты при экстраполяции в области, для которых нет экспериментальных данных.

Безразмерная свободная энергия Гельмгольца представлена в виде суммы идеально-газовой части и неидеальной части :

|  |  |
| --- | --- |
|  | (1) |

Здесь – относительная плотность; – относительная температура.

Уравнение для идеально-газовой составляющей свободной энергии имеет вид:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (2) |

Коэффициенты уравнения (2) приведены в таблице 2.

Уравнение для неидеальной составляющей свободной энергии представлено в виде разложения в ряд по степеням относительной температуры и относительной плотности с полиномиальными экспоненциальными членами:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (3) |

В формуле (3) – коэффициенты уравнения состояния, значения которых вместе с показателями степеней и параметрами { приведены в таблице 3.

Плотность *ω* в однофазных областях при заданных значениях давления *p* и температуры *T* определяются из решения уравнения для относительного давления π:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (4) |

Здесь значения давления *pкр* и фактора сжимаемости *zкр* в критической точке, а также индивидуальной газовой постоянной *R* хлора приведены в таблице 1. Вид комплекса , а также алгоритм расчёта плотности *ω* в однофазных областях приведён в Приложении Б.

## **2** **Расчёт плотности на линии насыщения и давления насыщенных паров**

Плотности газовой *ωʺ* и жидкой *ωʹ* фаз на линии насыщения при заданной температуре *T*, а также давление насыщенных паров *ps* рассчитываются по выражениям, полученным авторами работы [1] в результате аппроксимации значений соответствующих величин, рассчитанных по ФУС (1). Для расчёта относительной плотности жидкости *ωʹ* и пара *ωʺ* на линии насыщения используются уравнения:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (5) |
|  | (6) |

Параметры и в (5) и (6) представлены в таблицах 4 и 5 cоответственно.

Давление на линии насыщения *ps* определяется по формуле:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (7) |

Коэффициенты в уравнении (7) приведены в таблице 6.

## **3 Неопределённости рассчитанных значений плотности и давления насыщенных паров**

Неопределённость вычисленных значений давления насыщенных паров составила 1 % в диапазоне температур *T* < 205 К, 0,5 % в диапазоне от 205 К до 270 К и 3 % для более высоких температур.

Значения плотности в жидком однофазном состоянии установлены с точностью 0,15 %, в газообразном состоянии – 0,25 %, во флюидной области – 0,20 %.

Неопределённость расчёта значений плотности насыщенной жидкости принята равной 1 %. Неопределённость значений плотности насыщенного пара однозначно не установлена. В силу недостаточности знаний о неопределённостях имеющихся экспериментальных данных о свойствах на линии насыщения авторы работы [1] утверждают, что полученные с помощью ФУС значения плотности на линии насыщения следует использовать до тех пор, пока не появятся более надёжные измерения.

## **4 Таблицы с данными, необходимыми для расчёта**

Таблица 1 – Свойства и критические параметры хлора

|  |  |
| --- | --- |
| Молярная масса M, г/моль | 70,906 |
| Индивидуальная газовая постоянная R, кДж/(кг\*К) | 0,177260 |
| Критическая плотность ρкр, кг/м3 | 571,50236 |
| Критическая температура Tкр, K | 416,8654 |
| Критическое давление pкр, МПа | 7,635 |
| Критический коэффициент сжимаемости zкр | 0,27330273 |

Количество цифр после запятой в значениях R, ρкр и zкр получены в ходе численного машинного расчёта и не отображают реальную точность.

Таблица 2 – Коэффициенты для расчёта формулы (2) [1]

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| ***i*** | ***mi*** | ***ui*** | ***CI*** | ***CII*** |
| 1 | 1,0256 | 800 | 3,839904988 | -3,953901622 |
| 2 | 0,067756 | 3000 | - | - |
| 3 | 0,14068 | 8200 | - | - |

Таблица 3 – Коэффициенты для расчёта формулы (3) [1]

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| ***i*** | ***bi*** | ***ti*** | ***di*** | ***li*** | ***ηi*** | ***βi*** | ***γi*** | ***εi*** |
| 1 | 0,0245017 | 1,0 | 4 | - | - | - | - | - |
| 2 | 0,9132904 | 0,196 | 1 | - | - | - | - | - |
| 3 | -1,72309 | 1,0 | 1 | - | - | - | - | - |
| 4 | -0,3359344 | 1,08 | 2 | - | - | - | - | - |
| 5 | 0,1200495 | 0,39 | 3 | - | - | - | - | - |
| 6 | -1,214889 | 1,64 | 1 | 2 | - | - | - | - |
| 7 | -0,10167 | 3,2 | 3 | 2 | - | - | - | - |
| 8 | 0,6196819 | 1,32 | 2 | 1 | - | - | - | - |
| 9 | -0,6578512 | 2,163 | 2 | 2 | - | - | - | - |
| 10 | -0,009159452 | 0,93 | 7 | 1 | - | - | - | - |
| 11 | 1,909418 | 0,872 | 1 | - | 0,969 | 1,22 | 1,142 | 0,88 |
| 12 | -0,07163412 | 2,08 | 1 | - | 1,89 | 6,8 | 1,22 | 0,73 |
| 13 | -0,1893345 | 1,6 | 3 | - | 1,32 | 3,5 | 1,552 | 0,28 |
| 14 | -0,5698469 | 1,37 | 2 | - | 1,012 | 1,276 | 1,135 | 0,863 |
| 15 | -0,8964496 | 1,05 | 2 | - | 0,98 | 1,6 | 0,754 | 0,554 |

Таблица 4 – Коэффициенты для расчёта формулы (5) [1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***i*** | ***ni*** | ***ti*** |
| 1 | 0,9662 | 0,234 |
| 2 | 1,7744 | 0,68 |
| 3 | -0,23081 | 1,3 |
| 4 | 0,47213 | 3,35 |

Таблица 5 – Коэффициенты для расчёта формулы (6) [1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***i*** | ***ni*** | ***ti*** |
| 1 | -1,7673 | 0,3 |
| 2 | -5,173 | 0,994 |
| 3 | -12,539 | 2,7 |
| 4 | -37,552 | 6,155 |
| 5 | -64,404 | 12,4 |
| 6 | -151,49 | 24,0 |

Таблица 6 – Коэффициенты для расчёта формулы (7) [1]

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ***i*** | ***ni*** | ***ti*** |
| 1 | -6,1289 | 1,0 |
| 2 | 1,5112 | 1,5 |
| 3 | -1,4523 | 2,0 |
| 4 | -5,6038 | 5,94 |
| 5 | 3,9923 | 7,0 |
| 6 | -1,2651 | 14,8 |

# **Таблицы значений плотности хлора в однофазных областях со значениями относительной неопределённости**

Ниже приведены таблицы рассчитанных с помощью ФУС значений плотности. Для каждого значения указана неопределённость, выраженная в процентах, %.

Таблица 7 - Плотность хлора в однофазной среде в диапазоне давлений от 0,1 до 0,8 МПа

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **0,1** | **0,2** | **0,4** | **0,6** | **0,8** |
| 172,17 | 1744,51 | 1744,61 | 1744,81 | 1745,01 | 1745,21 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 175 | 1736,91 | 1737,02 | 1737,22 | 1737,42 | 1737,63 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 180 | 1723,51 | 1723,62 | 1723,83 | 1724,04 | 1724,25 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 190 | 1696,74 | 1696,85 | 1697,08 | 1697,31 | 1697,53 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 200 | 1669,95 | 1670,07 | 1670,32 | 1670,56 | 1670,81 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 210 | 1643,09 | 1643,22 | 1643,48 | 1643,75 | 1644,01 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 220 | 1616,08 | 1616,23 | 1616,51 | 1616,80 | 1617,08 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 230 | 1588,88 | 1589,03 | 1589,34 | 1589,65 | 1589,96 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 240 | 3,6477 | 1561,56 | 1561,90 | 1562,24 | 1562,58 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 250 | 3,4899 | 1533,74 | 1534,11 | 1534,48 | 1534,85 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 260 | 3,3461 | 6,8362 | 1505,88 | 1506,28 | 1506,68 |
| 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 270 | 3,2145 | 6,5495 | 1477,08 | 1477,52 | 1477,97 |
| 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 280 | 3,0934 | 6,2885 | 13,029 | 1448,07 | 1448,56 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 |
| 290 | 2,9816 | 6,0497 | 12,479 | 19,369 | 1418,29 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 7*

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **0,1** | **0,2** | **0,4** | **0,6** | **0,8** |
| 300 | 2,8779 | 5,8299 | 11,981 | 18,513 | 25,505 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 310 | 2,7815 | 5,6269 | 11,5281 | 17,747 | 24,341 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 320 | 2,6916 | 5,4386 | 11,1130 | 17,056 | 23,309 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 330 | 2,6075 | 5,2634 | 10,7307 | 16,427 | 22,382 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 340 | 2,5287 | 5,0997 | 10,3770 | 15,851 | 21,544 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 350 | 2,4547 | 4,9465 | 10,0484 | 15,321 | 20,780 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 360 | 2,3849 | 4,8027 | 9,7421 | 14,830 | 20,079 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 370 | 2,3191 | 4,6674 | 9,4556 | 14,374 | 19,432 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 380 | 2,2569 | 4,5398 | 9,1868 | 13,948 | 18,832 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 390 | 2,1981 | 4,4193 | 8,9341 | 13,550 | 18,274 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 400 | 2,1422 | 4,3053 | 8,6959 | 13,176 | 17,752 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 410 | 2,0893 | 4,1971 | 8,4708 | 12,825 | 17,263 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 420 | 2,0388 | 4,0945 | 8,2578 | 12,493 | 16,804 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 430 | 1,9908 | 3,9968 | 8,0558 | 12,179 | 16,370 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 440 | 1,9450 | 3,9039 | 7,8640 | 11,882 | 15,961 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |

Таблица 8 - Плотность хлора в однофазной среде в диапазоне давлений от 1 до 5 МПа

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| 172,17 | 1745,40 | 1746,40 | 1747,38 | 1748,37 | 1749,34 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 175 | 1737,83 | 1738,84 | 1739,89 | 1740,85 | 1741,85 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 180 | 1724,46 | 1725,51 | 1726,55 | 1727,59 | 1728,62 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 190 | 1697,76 | 1698,89 | 1700,01 | 1701,12 | 1702,23 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 200 | 1671,05 | 1672,27 | 1673,47 | 1674,67 | 1675,87 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 210 | 1644,27 | 1645,59 | 1646,89 | 1648,18 | 1649,47 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 220 | 1617,37 | 1618,79 | 1620,19 | 1621,59 | 1622,98 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 230 | 1590,27 | 1591,81 | 1593,34 | 1594,85 | 1596,35 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 240 | 1562,91 | 1564,59 | 1566,25 | 1567,89 | 1569,52 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 250 | 1535,22 | 1537,05 | 1538,85 | 1540,65 | 1542,42 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 260 | 1507,09 | 1509,09 | 1511,07 | 1513,03 | 1514,97 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 270 | 1478,41 | 1480,62 | 1482,80 | 1484,95 | 1487,08 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 280 | 1449,06 | 1451,50 | 1453,92 | 1456,29 | 1458,64 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 290 | 1418,84 | 1421,58 | 1424,27 | 1426,91 | 1429,51 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 300 | 1387,56 | 1390,64 | 1393,67 | 1396,63 | 1399,54 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 310 | 31,386 | 1358,45 | 1361,89 | 1365,24 | 1368,52 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 320 | 29,924 | 1324,68 | 1328,63 | 1332,48 | 1336,23 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 330 | 28,635 | 1288,87 | 1293,51 | 1298,00 | 1302,34 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 340 | 27,485 | 62,447 | 1255,95 | 1261,30 | 1266,43 |
| 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 8*

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **1** | **2** | **3** | **4** | **5** |
| 350 | 26,448 | 58,977 | 1215,13 | 1221,68 | 1227,90 |
| 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 360 | 25,505 | 56,052 | 96,280 | 1178,03 | 1185,85 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 |
| 370 | 24,642 | 53,528 | 89,718 | 1128,35 | 1138,77 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 | 0,15 |
| 380 | 23,847 | 51,311 | 84,507 | 128,96 | 1083,69 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,15 |
| 390 | 23,112 | 49,336 | 80,188 | 118,99 | 176,65 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 400 | 22,428 | 47,559 | 76,503 | 111,413 | 157,56 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 410 | 21,790 | 45,944 | 73,294 | 105,306 | 144,98 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 420 | 21,193 | 44,466 | 70,454 | 100,193 | 135,56 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 430 | 20,632 | 43,104 | 67,909 | 95,798 | 128,01 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |
| 440 | 20,103 | 41,844 | 65,605 | 91,947 | 121,73 |
| 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 | 0,25 |

Таблица 9 – Плотность хлора в однофазной среде в диапазоне давлений от 6 до 10 МПа

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| 172,17 | 1750,32 | 1751,29 | 1752,25 | 1753,21 | 1754,17 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 175 | 1742,84 | 1743,83 | 1744,81 | 1745,79 | 1746,77 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 180 | 1729,65 | 1730,68 | 1731,69 | 1732,71 | 1733,72 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 190 | 1703,34 | 1704,43 | 1705,53 | 1706,61 | 1707,69 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 200 | 1677,05 | 1678,23 | 1679,40 | 1680,57 | 1681,73 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 210 | 1650,74 | 1652,01 | 1653,27 | 1654,52 | 1655,77 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 220 | 1624,36 | 1625,73 | 1627,08 | 1628,43 | 1629,77 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 230 | 1597,84 | 1599,32 | 1600,78 | 1602,24 | 1603,68 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 240 | 1571,14 | 1572,74 | 1574,32 | 1575,90 | 1577,46 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 250 | 1544,18 | 1545,91 | 1547,64 | 1549,34 | 1551,03 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 260 | 1516,86 | 1518,78 | 1520,66 | 1522,51 | 1524,35 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 270 | 1489,18 | 1491,25 | 1493,30 | 1495,32 | 1497,33 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 280 | 1460,95 | 1463,23 | 1465,47 | 1467,69 | 1469,88 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 290 | 1432,07 | 1434,59 | 1437,07 | 1439,51 | 1441,92 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 300 | 1402,39 | 1405,19 | 1407,95 | 1410,65 | 1413,32 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 310 | 1371,74 | 1374,88 | 1377,96 | 1380,98 | 1383,94 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 320 | 1339,88 | 1343,44 | 1346,92 | 1350,32 | 1353,65 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 330 | 1306,55 | 1310,63 | 1314,60 | 1318,47 | 1322,23 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 340 | 1271,36 | 1276,12 | 1280,71 | 1285,16 | 1289,47 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 9*

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **6** | **7** | **8** | **9** | **10** |
| 350 | 1233,81 | 1239,47 | 1244,88 | 1250,08 | 1255,08 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 360 | 1193,17 | 1200,06 | 1206,58 | 1212,78 | 1218,69 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 370 | 1148,25 | 1156,98 | 1165,08 | 1172,67 | 1179,80 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 380 | 1096,97 | 1108,68 | 1119,22 | 1128,84 | 1137,71 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 390 | 1034,76 | 1052,23 | 1066,98 | 1079,85 | 1091,35 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 400 | 946,16 | 980,32 | 1004,20 | 1023,10 | 1038,97 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 410 | 200,59 | 854,74 | 918,80 | 952,73 | 977,23 |
| 0,25 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 420 | 180,56 | 247,30 | - | 848,89 | 898,23 |
| 0,25 | 0,25 | - | 0,20 | 0,20 |
| 430 | 166,83 | 217,21 | 294,23 | - | - |
| 0,25 | 0,25 | 0,20 | - | - |
| 440 | 156,35 | 198,39 | 253,28 | 335,78 | - |
| 0,25 | 0,25 | 0,20 | 0,20 | - |

Таблица 10 – Плотность хлора в однофазной среде в диапазоне давлений от 11 до 15 МПа

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **11** | **12** | **13** | **14** | **15** |
| 172,17 | 1755,12 | 1756,07 | 1757,01 | 1757,95 | 1758,89 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 175 | 1747,74 | 1748,70 | 1749,67 | 1750,62 | 1751,58 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 180 | 1734,72 | 1735,72 | 1736,71 | 1737,70 | 1738,69 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 190 | 1708,77 | 1709,84 | 1710,90 | 1711,96 | 1713,01 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 200 | 1682,88 | 1684,02 | 1685,16 | 1686,30 | 1687,42 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 210 | 1657,01 | 1658,24 | 1659,46 | 1660,67 | 1661,88 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 220 | 1631,10 | 1632,42 | 1633,74 | 1635,04 | 1636,34 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 230 | 1605,12 | 1606,54 | 1607,95 | 1609,36 | 1610,75 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 240 | 1579,01 | 1580,54 | 1582,06 | 1583,57 | 1585,07 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 250 | 1552,71 | 1554,37 | 1556,01 | 1557,65 | 1559,26 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 260 | 1526,17 | 1527,97 | 1529,75 | 1531,51 | 1533,26 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 270 | 1499,31 | 1501,26 | 1503,20 | 1505,11 | 1507,01 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 280 | 1472,05 | 1474,18 | 1476,29 | 1478,38 | 1480,44 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 290 | 1444,29 | 1446,63 | 1448,94 | 1451,22 | 1453,47 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 300 | 1415,94 | 1418,52 | 1421,06 | 1423,56 | 1426,02 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 310 | 1386,85 | 1389,71 | 1392,52 | 1395,28 | 1397,99 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 320 | 1356,90 | 1360,09 | 1363,21 | 1366,27 | 1369,28 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 330 | 1325,90 | 1329,48 | 1332,99 | 1336,41 | 1339,76 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 340 | 1293,66 | 1297,72 | 1301,68 | 1305,54 | 1309,29 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 10*

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **11** | **12** | **13** | **14** | **15** |
| 350 | 1259,91 | 1264,58 | 1269,10 | 1273,48 | 1277,73 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 360 | 1224,35 | 1229,78 | 1235,00 | 1240,03 | 1244,90 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 370 | 1186,56 | 1192,97 | 1199,09 | 1204,94 | 1210,56 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 380 | 1145,97 | 1153,71 | 1161,00 | 1167,91 | 1174,47 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 390 | 1101,78 | 1111,36 | 1120,24 | 1128,53 | 1136,32 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 400 | 1052,76 | 1065,04 | 1076,14 | 1086,32 | 1095,72 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 410 | 996,83 | 1013,35 | 1027,75 | 1040,57 | 1052,16 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 420 | 929,93 | 953,951 | 973,57 | 990,30 | 1004,97 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 430 | 842,20 | 882,22 | 911,10 | 934,01 | 953,17 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 440 | - | - | 835,55 | 869,19 | 895,33 |
| - | - | 0,20 | 0,20 | 0,20 |

Таблица 11 – Плотность хлора в однофазной среде в диапазоне давлений от 16 до 20 МПа

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
| 172,17 | 1759,82 | 1760,75 | 1761,67 | 1762,59 | 1763,51 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 175 | 1752,53 | 1753,47 | 1754,41 | 1755,35 | 1756,28 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 180 | 1739,67 | 1740,65 | 1741,62 | 1742,59 | 1743,55 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 190 | 1714,06 | 1715,10 | 1716,14 | 1717,17 | 1718,20 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 200 | 1688,55 | 1689,66 | 1690,77 | 1691,87 | 1692,97 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 210 | 1663,08 | 1664,28 | 1665,46 | 1666,64 | 1667,82 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 220 | 1637,63 | 1638,90 | 1640,18 | 1641,44 | 1642,69 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 230 | 1612,13 | 1613,51 | 1614,87 | 1616,22 | 1617,57 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 240 | 1586,56 | 1588,04 | 1589,50 | 1590,96 | 1592,40 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 250 | 1560,87 | 1562,46 | 1564,03 | 1565,60 | 1567,15 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 260 | 1534,99 | 1536,71 | 1538,41 | 1540,10 | 1541,77 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 270 | 1508,89 | 1510,74 | 1512,58 | 1514,40 | 1516,20 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 280 | 1482,48 | 1484,49 | 1486,48 | 1488,45 | 1490,40 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 290 | 1455,69 | 1457,88 | 1460,05 | 1462,19 | 1464,30 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 300 | 1428,45 | 1430,85 | 1433,21 | 1435,54 | 1437,84 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 310 | 1400,66 | 1403,29 | 1405,88 | 1408,43 | 1410,94 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 320 | 1372,23 | 1375,12 | 1377,97 | 1380,77 | 1383,52 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 330 | 1343,04 | 1346,25 | 1349,40 | 1352,49 | 1355,52 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 340 | 1312,96 | 1316,55 | 1320,05 | 1323,47 | 1326,83 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |

*Продолжение таблицы 11*

|  |  |
| --- | --- |
| **T, К** | **p, МПа** |
| **16** | **17** | **18** | **19** | **20** |
| 350 | 1281,87 | 1285,89 | 1289,81 | 1293,64 | 1297,37 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 360 | 1249,59 | 1254,15 | 1258,57 | 1262,86 | 1267,04 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 370 | 1215,95 | 1221,15 | 1226,17 | 1231,03 | 1235,73 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 380 | 1180,73 | 1186,73 | 1192,47 | 1198,00 | 1203,33 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 390 | 1143,68 | 1150,66 | 1157,30 | 1163,65 | 1169,72 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 400 | 1104,49 | 1112,71 | 1120,46 | 1127,81 | 1134,79 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 410 | 1062,78 | 1072,60 | 1081,74 | 1090,31 | 1098,40 |
| 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 | 0,15 |
| 420 | 1018,07 | 1029,97 | 1040,88 | 1050,98 | 1060,40 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 430 | 969,74 | 984,40 | 997,59 | 1009,60 | 1020,66 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |
| 440 | 916,88 | 935,31 | 951,48 | 965,92 | 979,01 |
| 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 | 0,20 |

# **Таблицы значений плотности и давления хлора на линии насыщения со значениями относительной неопределённости**

Ниже приведены таблицы рассчитанных с помощью уравнений (5) – (7) значений плотности на линии насыщения со стороны жидкости и газовой фазы, а также значения давления насыщенных паров при заданной температуре. Околокритическая область параметров исключена. Для каждого значения указана неопределённость, выраженная в процентах, %. Значения плотности насыщенного пара не являются стандартными данными и носят информационный характер.

Таблица 12 – Давление насыщения и плотность хлора на линии насыщения

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **T, К** | **psat, МПа** | **ρ'', кг/м3** | **ρ', кг/м3** |
| **δpsat,%** | **δρ'', %** | **δρ', %** |
| 172,17 | 0,0013795 | 0,06846 | 1744,16 |
| 1,0 | - | 1,0 |
| 175 | 0,0017852 | 0,08718 | 1736,53 |
| 1,0 | - | 1,0 |
| 180 | 0,0027532 | 0,1308 | 1723,08 |
| 1,0 | - | 1,0 |
| 190 | 0,0060620 | 0,2732 | 1696,25 |
| 1,0 | - | 1,0 |
| 200 | 0,012210 | 0,5241 | 1669,46 |
| 1,0 | - | 1,0 |
| 210 | 0,022810 | 0,9357 | 1642,65 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 220 | 0,039967 | 1,5722 | 1615,74 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 230 | 0,06629 | 2,509 | 1588,68 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 240 | 0,10485 | 3,834 | 1561,37 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 250 | 0,15920 | 5,641 | 1533,74 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 260 | 0,23325 | 8,039 | 1505,70 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 270 | 0,33124 | 11,144 | 1477,15 |
| 0,5 | - | 1,0 |
| 280 | 0,4577 | 15,08 | 1447,96 |
| 3,0 | - | 1,0 |

*Продолжение таблицы 12*

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **T, К** | **psat, МПа** | **ρ'', кг/м3** | **ρ', кг/м3** |
| **δpsat,%** | **δρ'', %** | **δρ', %** |
| 290 | 0,6172 | 20,01 | 1418,03 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 300 | 0,8146 | 26,07 | 1387,19 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 310 | 1,0549 | 33,45 | 1355,28 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 320 | 1,343 | 42,37 | 1322,08 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 330 | 1,683 | 53,10 | 1287,35 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 340 | 2,081 | 65,94 | 1250,75 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 350 | 2,542 | 81,34 | 1211,86 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 360 | 3,069 | 99,87 | 1170,07 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 370 | 3,669 | 122,39 | 1124,53 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 380 | 4,346 | 150,27 | 1073,87 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 390 | 5,107 | 185,93 | 1015,64 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 400 | 5,958 | 234,53 | 944,67 |
| 3,0 | - | 1,0 |
| 410 | 6,910 | 312,67 | 844,26 |
| 3,0 | - | 1,0 |

# **ПРИЛОЖЕНИЕ А**

## **Характеристика уравнения состояния**

Для описания плотности в широкой области фазовых состояний (газ, жидкость, сверхкритический флюид и граница сосуществования газовой и жидкой фаз - линия насыщения) принято фундаментальное уравнение состояния (ФУС), которое получено авторами работы [1].

Для построения уравнения состояния авторы указанной работы использовали массив наиболее точных экспериментальных данных о следующих основных свойствах хлора:

1. Термические свойства (*p*, ρ, *T*) в однофазной области. Массив включает 636 экспериментальных точек (263 К ≤ *T* ≤ 424 К; 0,1 ≤ *p* ≤ 21 МПа).
2. Термические свойства (*ps*, ρ′, ρ″) на линии насыщения. Массив включает 227 экспериментальных точек (172 К ≤ *Ts* ≤ 418 К).
3. Второй (*B*) вириальный коэффициент – 17 экспериментальных точек (244 К ≤ *T* ≤ 1080 К).
4. Изобарная теплоемкость *cp* – 20 экспериментальных
(179 К ≤ *T* ≤ 304 К; 0,0 ≤ *p* ≤ 1 МПа).
5. Изобарная идеально-газовая теплоемкость *cp0* – 92 экспериментальные точки (250 К ≤ *T* ≤ 5013 К; *p* → 0).
6. Скорость звука *w* – 230 экспериментальных точек (248 К ≤ *T* ≤ 441 К; 0,1 ≤ *p* ≤ 2 МПа).
7. Энтальпия парообразования *hvap –* 4 экспериментальные точки
 (*T =* 239,08К; *p = ps*).

# **ПРИЛОЖЕНИЕ Б**

## **Вычисление плотности в однофазных областях итерационным методом**

Относительная плотность ω в однофазных областях существования вещества определяется в результате решения уравнения

|  |  |
| --- | --- |
|  | (Б.1) |

по методу Ньютона в следующем итерационном процессе:

1. *ω* на *k*-м итерационном шаге (начиная с *k* = 1) определяется из выражений:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (Б.2)(Б.3) |

Здесь комплексы *A0*(k-1) и *A1*(k-1) рассчитывают по формулам (Б.7) и (Б.8) при плотности на итерационном шаге (*k*-1), т.е. при *ω*(k-1):

|  |  |
| --- | --- |
|  | (Б.4) |
|  | (Б.5) |
|  | (Б.6) |
|  | (Б.7) |
|  | (Б.8) |

Показатели степеней и параметры { приведены в таблице 3.

1. Критерий завершения итерационного процесса:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (Б.9) |

Если критерий (Б.9) не выполняется, то необходимо продолжить итерационный процесс, начиная с пункта 1), в обратном случае перейти к пункту 3).

1. Вычисляется плотность ρ в кг/м3:

|  |  |
| --- | --- |
|  | (Б.10) |

# **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. M. Thol, S. Herrig, R. Span, E. W. Lemmon. A fundamental equation of state for the calculation of thermodynamic properties of chlorine. AIChE J. 2021; e17326.
2. Angus S., Armstrong B., de Reuck K. M. Chlorine: International Thermodynamic Tables of the Fluid State. Butlingron: Elsevier Science; 1985.
3. Якименко Л. М. Производство хлора, каустической соды и неорганических хлорпродуктов. М., «Химия», 1974 г. 600 с., 107 табл., 221 рис., список литературы 1440 ссылок.
4. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. М., «Наука», 1972 г. 720 стр. с илл.