

Н. В. Кравченко, С. Д. Солод

## РАСЧЕТ ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГАЗООБРАЗНОГО КСЕНОНА

Даны сведения по расчету термодинамических и переносных свойств газообразного ксенона в объеме, достаточном для большинства технических приложений. Получено уравнение состояния ксенона в безразмерном виде, позволяющее выполнять расчеты термодинамических величин по уже известным методам, разработанным для воздуха и других широко используемых газов. Приведен пример реализации метода на базе указанного уравнения для расчета плотности, энтальпии и энтропии газообразного ксенона. Точность расчета этих свойств в диапазоне температуры от 300 до 3000 К при давлении от 0,1 до 120 МПа составила от 0,2 до 1,6 %. Получены достаточно точные и простые зависимости для расчета энтальпии и теплоты парообразования на линии насыщения. Точность расчета энтальпии жидкого ксенона на линии насыщения – не хуже 0,2%, точность расчета теплоты парообразования – не хуже 0,5%. Предложен новый, более простой по сравнению со стандартными справочными данными метод расчета переносных свойств (теплопроводность, вязкость) ксенона при атмосферном давлении. Показано, что теплопроводность и вязкость могут рассчитываться по выражению одного вида с различными коэффициентами. Точность расчета этих свойств по предложенному методу не хуже 2,2%. С учетом неудовлетворительных результатов тестирования известных методов расчета переносных свойств при высоких давлениях предложен эффективный метод аппроксимации табличных значений этих свойств. При этом вначале выполняется аппроксимация данных по температуре при фиксированных давлениях, затем с использованием этих аппроксимаций вычисляются значения свойства при заданной температуре и различных давлениях. После этого интерполированием вычисляется значение свойства при заданном высоком давлении. В качестве примера реализации этого метода расчета приведена программа Mathcad для расчета теплопроводности газообразного ксенона при высоком давлении. Материалы статьи ориентированы на специалистов, занимающихся процессами теплообмена.

**Ключевые слова:** газ, уравнение состояния, термодинамические свойства, теплопроводность, вязкость.

Дано відомості про розрахунок термодинамічних і переносних властивостей газоподібного ксенону в обсязі, достатньому для більшості технічних додатків. Одержано рівняння стану ксенону в безрозмірному вигляді, що дозволяє виконувати розрахунки термодинамічних величин за допомогою вже відомих методів, розроблених для повітря та інших широко використовуваних газів. Наведено приклад реалізації методу на базі вказаного рівняння для розрахунку густини, ентальпії і ентропії газоподібного ксенону. Точність розрахунку цих властивостей у діапазоні температури від 300 до 3000 К за тиску від 0,1 до 120 МПа становила від 0,2 до 1,6%. Одержано досить точні і прості залежності для розрахунку ентальпії й теплоти пароутворення на лінії насичення. Точність розрахунку ентальпії рідкого ксенону на лінії насичення – не гірше 0,2%, точність розрахунку теплоти пароутворення – не гірше 0,5%. Запропоновано новий, більш простий у порівнянні зі стандартними довідковими даними метод розрахунку переносних властивостей (теплопровідність, в'язкість) ксенону за атмосферного тиску. Показано, що теплопровідність і в'язкість можна розраховувати за виразом одного виду з різними коефіцієнтами. Точність розрахунку цих властивостей за допомогою запропонованого методу не гірше 2,2%. З огляду на незадовільні результати тестування відомих методів розрахунку переносних властивостей за високих тисків, запропоновано ефективний метод апроксимації табличних значень цих властивостей. При цьому спочатку виконують апроксимацію даних щодо температури за фіксованих тисків, потім з використанням цих апроксимацій обчислюють значення властивості за заданої температури і різних тисків. Після цього інтерполюванням обчислюють значення властивості за заданого високого тиску. Як приклад реалізації цього методу розрахунку наведено програму Mathcad для розрахунку теплопровідності газоподібного ксенону за високого тиску. Матеріали статті орієнтовані на фахівців, що вивчають процеси теплообміну.

**Ключові слова:** газ, рівняння стану, термодинамічні властивості, теплопровідність, в'язкість.

This article contains information on the calculation of the thermodynamic and translational properties of the gaseous xenon in the amount sufficient for the most engineering applications. The equation of state of xenon was obtained in dimensionless form, enabling calculations of the thermodynamic values using already known methods, developed for the air and other extensively used gases. An example is made on the imple-

mentation of the method based on this equation for calculation of the density, enthalpy and entropy of the gaseous xenon. The accuracy of calculation of these properties in the temperature range from 300 to 3000 K from 0,1 up to 120 MPa pressure was from 0,2 to 1,6%. Sufficiently accurate and simple dependencies were obtained for calculation of the enthalpy and heat of vaporization at the saturation line. Accuracy of the enthalpy calculation of the liquid xenon at the saturation line is not below 0,2%, the accuracy of the calculation of the heat of vaporization is not below 0,5%. New, simpler method, as compared to standard reference data, to calculate the translational properties (thermal conductivity, viscosity) of xenon at atmospheric pressure has been proposed. It is shown that thermal conductivity and viscosity can be calculated from the expression of the same type with different coefficients. Accuracy of the calculation of these properties using the proposed method is not below 2,2%. Considering the unsatisfactory test results of the well-known methods of calculation of the translational properties at high pressures, the effective method for approximating the table values of these properties has been proposed. In this case, at first, the temperature data at fixed pressures are approximated, then using these approximations, the values of the properties are calculated at the given temperature and various pressure values. After this, the value of the property is interpolated at the given high pressure. As an example of the implementation of this method, the Mathcad software for calculations of the thermal conductivity of gaseous xenon at high pressure is given. The materials of the article are intended for the specialists dealing with heat exchange processes.

**Keywords:** gas, equation of state, thermodynamic properties, thermophysical properties, thermal conductivity, viscosity.

## Введение

Несмотря на высокую стоимость (около 14 дол. за 1 л жидкого ксенона), ксенон незаменим в ряде случаев. В частности, его используют в мощных газоразрядных и импульсных источниках света, в которых высокая атомная масса газа препятствует испарению вольфрама с поверхности нити накаливания, а также в качестве рабочего тела в электрических ракетных двигателях, проектирование которых невозможно без разработки эффективных методов расчета теплофизических свойств этого вещества.

## Постановка задачи

Целью данной работы являются поиск рекомендаций по расчету теплофизических свойств газообразного ксенона, которые могут быть использованы при разработке сложных технических приложений, требующих математического моделирования процессов, а также оценка точности расчета.

## Расчет теплофизических свойств

В монографии [1] в качестве уравнения состояния предлагается использовать уравнение

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{j_{\max}} b_{ij} \tau^{-j} \rho^i, \quad (1)$$

где  $Z = pV/(RT)$  – сжимаемость ксенона;  $\rho$  – плотность, г/см<sup>3</sup>;  $T$  – абсолютная температура;  $m = 8$ ;  $j_{\max} = 5$ ;  $b_{ij}$  – коэффици-

енты, которые определены методом наименьших квадратов по экспериментальным данным о сжимаемости ксенона;  $\tau = T/T_c$ ;  $p$  – давление, Па;  $V$  – удельный объем;  $R = 63,328$  Дж/(кг·К) – газовая постоянная ксенона;  $T_c = 289,74$  К – критическая температура.

Такая форма уравнения состояния соответствует теоретически обоснованному уравнению Боголюбова-Майера при замене бесконечного разложения в ряд по степеням плотности полиномом степени  $m$ .

Недостатком этого уравнения является наличие размерного параметра  $\rho$  и, как следствие, несоответствие этого уравнения общепринятому в отечественной литературе, например [2], что не позволяет использовать его для расчета других термодинамических свойств по известным методам, разработанным для воздуха и других газов.

Поэтому авторами после эквивалентных преобразований из уравнения (1) получено новое уравнение состояния, вид которого соответствует общепринятому:

$$Z = 1 + \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{j_{\max}} b_{ij} \tau^{-j} \omega^i, \quad (2)$$

где  $b_{ij}$  – безразмерные коэффициенты, значения которых приведены в табл. 1;  $\omega = \rho/\rho_c$  – относительная плотность;  $\rho_c = 1100$  кг/м<sup>3</sup> – критическая плотность согласно [1].

На основе уравнения (2) можно получить следующие уравнения для расчета энтальпии и энтропии [2]:

$$h = h_o + RT \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{j_{\max}} \frac{i+j}{i} \cdot \frac{b_{ij} \omega^i}{\tau^j};$$

$$s = s_o - R \cdot \ln \left( \frac{\omega}{\omega_o} \right) + R \sum_{i=1}^m \sum_{j=0}^{j_{\max}} \frac{i+j}{i} \cdot \frac{b_{ij} \omega^i}{\tau^j},$$

где  $h_o, s_o$  – энтальпия и энтропия в состоянии идеального газа (при давлении 1 бар);  $\omega_o = p_{cm} / (p_c RT)$ ;  $p_{cm} = 101325$  Па.

Таблица 1

Коэффициенты  $b_{ij}$  уравнения (2) состояния ксенона

i	Значение $b_{ij}$ при j					
	0	1	2	3	4	5
1	0,311432	-0,124048	-0,286506·10	0,298409·10	-0,169010·10	0,331464
2	0,499096·10 <sup>-1</sup>	0,660246·10 <sup>-1</sup>	-0,863325	0,354419·10	-0,358471·10	0,119122·10
3	0,21636	0,43829	-0,975566	0,766205·10 <sup>-1</sup>	0,126497·10 <sup>-1</sup>	-0,386903·10 <sup>-1</sup>
4	-0,433867	0,123217	-0,519648	0,141667·10	0,944493·10 <sup>-2</sup>	0
5	0,363104	-0,281127·10 <sup>-1</sup>	-0,195138	-0,653019	0	0
6	-0,120343	0,171534	0,114723	0	0	0
7	-0,385342·10 <sup>-1</sup>	-0,521881·10 <sup>-1</sup>	0,831912·10 <sup>-1</sup>	0	0	0
8	0,275103·10 <sup>-1</sup>	-0,305918·10 <sup>-1</sup>	0	0	0	0

Выражения для расчета  $h_o$  и  $s_o$ , полученные из уравнений [3], выглядят так:

$$h_o = (2,5 + 1907,186/T)RT;$$

$$s_o = \left[ 20,353718 + 2,5 \ln \left( \frac{T}{293,15} \right) \right] R.$$

Другие термодинамические свойства ксенона могут быть определены с помощью единых по структуре комплексов, приведенных в [2, с. 15, 16]. Приведенная методика расчета термодинамических свойств ксенона достаточно просто реализуется с помощью любого языка программирования. Вариант реализации такой методики

на языке Fortran практически не будет отличаться от программ расчета теплофизических свойств сухого воздуха, приведенных в [2]. Программа расчета основных термодинамических свойств ксенона в терминах Mathcad приведена на рис. 1. В этой программе давление приведено в паскалях, температура – в кельвинах, плотность – в килограммах на кубический метр. При вычислении плотности  $\rho_{xe}$  как функции температуры  $T$  и давления  $p$  используется вспомогательная функция  $f(T, p, \rho)$ .

Атомный вес, кг/кмоль:	$\mu := 131.29$
Универсальная газовая постоянная, кДж/(кмоль·К):	$R_0 := 8.3143$
Удельная газовая постоянная, Дж/(кг·К):	$R := R_0 \cdot 10^3 \cdot \mu^{-1} = 63.328$
Критическая температура, К:	$T_c := 289.74$
Критическая плотность, кг/м <sup>3</sup> :	$\rho_c := 1100$

Коэффициенты уравнения состояния в безразмерной форме:

$$b := \begin{pmatrix} 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.342575200 & -0.136452800 & -3.151566000 & 3.282499000 & -1.859110000 & 0.364610400 \\ 0.060390616 & 0.079889766 & -1.044623250 & 4.288469900 & -4.337499100 & 1.441376200 \\ 0.287975160 & 0.583363990 & -1.298478346 & 0.101981886 & 0.016836751 & -0.051496789 \\ -0.635224675 & 0.180402010 & -0.760816637 & 2.074146547 & 0.013828322 & 0.0 \\ 0.584782623 & -0.045275784 & -0.314271700 & -1.051693630 & 0.0 & 0.0 \\ -0.213194965 & 0.303882945 & 0.203238793 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ -0.075092254 & -0.101699843 & 0.162116114 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \\ 0.058970771 & -0.065576240 & 0.0 & 0.0 & 0.0 & 0.0 \end{pmatrix}$$

Уравнение состояния в безразмерной форме:  $z(\omega, \tau) := 1 + \sum_{i=1}^8 \sum_{j=0}^5 \left( b_{i,j} \cdot \tau^{-j} \cdot \omega^i \right)$

Давление  $P_{Xe}$  как функция температуры  $T$  и плотности  $\rho$ :  $P_{Xe}(T, \rho) := R \cdot T \cdot \rho \cdot z\left(\frac{\rho}{\rho_c}, \frac{T}{T_c}\right)$

Критическое давление  $p_c$  и сжимаемость  $z_c$ :  $p_c := P_{Xe}(T_c, \rho_c) = 5.8383623 \times 10^6$        $z_c := z(1, 1) = 0.289$

Вспомогательная функция:  $f(T, p, \rho) := \frac{p}{\rho c} - \frac{\rho}{\rho c} \cdot \frac{T}{T_c} \cdot \frac{1}{z_c} \cdot z\left(\frac{\rho}{\rho_c}, \frac{T}{T_c}\right)$

Плотность  $\rho_{Xe}$  как функция давления  $p$  и температуры  $T$ :  $\rho_{Xe}(T, p) := \text{root}(f(T, p, \rho), \rho, 0.3, 3200)$

Энтальпия в идеальном газе и энтальпия как функция давления и температуры

$$h_{oXe}(T) := \left( 2.5 + \frac{1907.186}{T} \right) \cdot R \cdot T \quad h_{Xe}(T, p) := h_{oXe}(T) + R \cdot T \cdot \sum_{i=1}^8 \sum_{j=0}^5 \left[ \frac{i+j}{i} \cdot \frac{b_{i,j} \cdot \left( \frac{\rho_{Xe}(T, p)}{\rho_c} \right)^i}{\left( \frac{T}{T_c} \right)^j} \right]$$

Энтропия в идеальном газе и энтропия как функция давления и температуры:

$$s_{oXe}(T) := R \cdot \left( 20.353718 + 2.5 \cdot \ln\left(\frac{T}{293.15}\right) \right) \quad p_{st} := 101325 \quad \omega_o(T) := \frac{p_{st}}{\rho_c \cdot R \cdot T}$$

$$s_{Xe}(T, p) := s_{oXe}(T) - R \cdot \ln\left(\frac{\rho_{Xe}(T, p)}{\omega_o(T)}\right) + R \cdot \sum_{i=1}^8 \sum_{j=0}^5 \left[ \frac{j-1}{i} \cdot \frac{b_{i,j} \cdot \left( \frac{\rho_{Xe}(T, p)}{\rho_c} \right)^i}{\left( \frac{T}{T_c} \right)^j} \right]$$

Рис. 1. Программа Mathcad расчета давления  $P_{Xe}(T, \rho)$ , плотности  $\rho_{Xe}(T, p)$ , энтальпии  $h_{Xe}(T, p)$  и энтропии  $s_{Xe}(T, p)$  ксенона



Корень этой функции при известных значениях температуры и давления определяет плотность. Этот корень ищут в диапазоне плотности от 0,3 до 3200 кг/м<sup>3</sup>. Энтальпия имеет размерность джоуль на килограмм, энтропия – джоуль на килограмм-кельвин.

Выполнены расчеты и проведено сравнение полученных значений плотности, энтальпии и энтропии с табличными значениями, приведенными в [1, 3]. Результаты сравнения показали, что значения удельного объема в диапазоне температуры от 300 до 1300 К и давления от 0,1 до 50 МПа отличаются не более чем на 0,2%. При температуре, близкой к нижнему диапазону, и давлении 50 МПа отличие возрастает. Наибольшее отличие имеет место при температуре 300 К и давлении 100 МПа, где оно составляет минус 3%. Точность экспериментальных данных, на основании которых получены уравнения (1) и (2), – до 0,2% [1, с. 80]. Сравнение расчетных значений плотности с данными справочника [3, с. 62–66] показывает, что расчетные значения плотности могут отличаться от табличных на ~1% в диапазоне температуры от 500 до 3000 К при давлении от 0,1 до 120 МПа.

Расчетные значения энтальпии отличаются от табличных [1] не более чем на 0,1 кДж/кг (не более 0,1%) в диапазоне температуры от 300 до 1300 К и давлении от 0,1 до 50 МПа. При повышении давления до 100 МПа и температуре 300 К отличие увеличивается до минус 1,8 кДж/кг (до 1,6%). При температурах более 500 К и любом давлении расчетное значение совпадает с табличным, за исключением отдельных точек, в которых оно не превышает 0,1 кДж/кг. Необходимо отметить, что табличные значения [1] часто отличаются от данных широко используемого справочника Н. Б. Варгафтика [4]. Например, значение энтальпии при температуре 1200 К и давлении 100 МПа по данным [1] составляет 314,6 кДж/кг, а по данным [4] – 313,3 кДж/кг (отличие – 1,3 кДж/кг). Имеет место также взаимное несоответствие табличных данных по энтальпии в работах [1, 3], которое достигает в некоторых точках 0,3 кДж/кг. В диапазоне температуры от 300 до 1300 К и давлений от 0,1 до 50 МПа отличие расчетных значений энтропии от

табличных не превышает 0,001 кДж/(кг·К), что меньше 0,1%. При давлении более 50 МПа это отличие возрастает и при давлении 100 МПа и температуре 300 К увеличивается до ~0,003 кДж/(кг·К).

При температуре более 500 К и давлении до 100 МПа отличие расчетных и табличных значений энтропии также не превышает 0,001 кДж/(кг·К). В указанных пределах отличаются данные по энтропии [1, 4]. Аналогичные отличия имеются в табличных данных [1, 3].

Приведенные выше уравнения для расчета термодинамических величин не претендуют на точное описание этих параметров на линии насыщения и в районе критической точки. Для расчета энтальпии на линии насыщения от тройной точки до критической можно использовать аппроксимации, полученные по табличным данным работы [1]. Для энтальпии жидкости  $h'$  эта аппроксимация имеет вид

$$h' = 86,45809 \tau + 11,47043 \tau^{2,5} + 8,677343 \cdot \exp(\tau^{11,5}) + 5,126070 \tau^{29,3}.$$

Абсолютная погрешность этой аппроксимации не превышает 0,1 кДж (~0,2%) практически во всем диапазоне температур (от тройной до критической). При температуре, близкой к критической, погрешность возрастает до 0,4 кДж/кг. Теплота парообразования  $r$  в килоджоулях на килограмм на линии насыщения может быть рассчитана по формуле

$$r = 11,8662(T_c - T)^{0,3} + 3,972277 \times (T_c - T)^{0,6} - 0,10417(T_c - T)^{1,25}.$$

Точность расчета теплоты парообразования – не хуже 0,35 кДж/кг (0,5%).

Энтальпию газообразного ксенона  $h''$  на линии насыщения можно определить, используя известное термодинамическое выражение  $h'' = h' + r$ .

Для расчета давления  $P_s$  в паскалях на линии насыщения рекомендуется использовать уравнение [5]

$$\log(P_s / 10^5) = \sum_{i=1}^7 a_{i+1} T^i, \quad (3)$$

которое согласовывается с уравнением (2). Критическое давление  $P_c = 5,838$  МПа, рассчитанное по уравнениям (2) и (3), совпадает до четырех значащих цифр.

Коэффициенты уравнения (3) линии насыщения:

$$a_0 = -8,48583984 \cdot 10^3; a_1 = 2,696183136 \cdot 10^2; \\ a_2 = -3,94126562; a_3 = 3,332691 \cdot 10^{-2}; \\ a_4 = -1,75307022 \cdot 10^{-4}; a_5 = 5,86334808 \cdot 10^{-7}; \\ a_6 = -1,215310816 \cdot 10^{-9}; a_7 = 1,424073676 \cdot 10^{-12}; \\ a_8 = -7,2009907 \cdot 10^{-16}.$$

Совпадают с табличными данными [5] также значения давления насыщения, вычисленные по формуле (3). Имеют место небольшие отличия по табличным данным на линии насыщения в [1] и [5], причем точность представления данных в [5] выше. В частности, данные по давлению насыщения в [1] имеют четыре значащие цифры, в [5] – шесть.

Расчет теплопроводности  $\lambda_0$  ксенона при атмосферном давлении регламентирован стандартными справочными данными [6]. Он заключается в определении вначале переносных свойств наиболее исследованного одноатомного газа аргона, а затем в пересчете полученных значений на ксенон. Теоретической основой пересчета является теория соответственных состояний [7]. Более простым способом расчета свойств является аппроксимация табличных данных [6]. В частности, для расчета теплопроводности авторами получено выражение

$$\lambda_0 = a_1 + a_2 T^{-0,59} + a_3 T^{0,5}, \quad (4)$$

где  $a_1 = -10,403215 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_2 = 73,479574 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_3 = 0,776454 \cdot 10^{-3}$ .

Уравнение (4) можно использовать и для расчета динамической вязкости в паскалях на секунду при атмосферном давлении, но в этом случае коэффициенты будут иметь следующие значения:

$$a_1 = -43,796299 \cdot 10^{-6}; a_2 = 309,358223 \cdot 10^{-6}; \\ a_3 = 3,269356 \cdot 10^{-6}.$$

Коэффициенты для расчета вязкости могут быть получены путем умножения соответствующих коэффициентов для тепло-

проводности на  $4,21 \cdot 10^{-3}$ , что подтверждает пропорциональность коэффициентов теплопроводности и вязкости для одноатомных газов [8].

При температуре от 165,03 до 500 К рассчитанные по формуле (4) значения теплопроводности совпадают с табличными значениями стандартных справочных данных [6]. При больших температурах имеют место незначительные отличия, которые приводят к возрастанию заявленной в [6] максимальной погрешности с 2 до 2,2%. Аналогично при расчете динамической вязкости использование аппроксимации (4) приводит к возрастанию погрешности расчета этого свойства ориентировочно с 1 до 2,2%.

С повышением давления теплопроводность и вязкость газов растут. Зависимости теплопроводности и вязкости от давления достаточно сложные. Проведено тестирование методик расчета переносных свойств ксенона, приведенных в [1, 3], а также формул для расчета этих свойств [9]. Для оценки точности расчета использовались табличные данные по переносным свойствам ксенона [1]. Во многих случаях погрешность расчета была более 50%. Кроме этого, в упомянутых работах не в полной мере определены границы применимости методик. Поэтому результаты тестирования этих методик следует считать неудовлетворительными. В создавшейся ситуации в расчетах при высоких давлениях, по видимому, следует использовать аппроксимации или интерполяции таблиц переносных свойств [1] в той области, в которой выполняется расчет. Для расчета переносных свойств при малых давлениях (до 1 МПа) можно использовать уравнения для атмосферного давления. При этом погрешность расчета переносных свойств не превысит 6%.

Теплопроводность ксенона при высоких давлениях представим в виде

$$\lambda = \lambda_0 + \lambda_0 k_p,$$

где второе слагаемое с коэффициентом  $k_p$  определяет увеличение теплопроводности за счет давления.

При фиксированной температуре значения  $k_p$  удовлетворительно аппроксимируются выражением

$$k_p = a(p-1) + b(p-1)^{1,8} + c(p-1)^2, \quad (5)$$

где  $p$  – давление, бар.

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  в выражении (5) и рекомендуемая область использования приведены в табл. 3. При использовании выражения (5) в этой области погрешность расчета теплопроводности относительно табличных данных монографии [1] не превысит 1%. Для расчета коэффициента теплопроводности при температурах, отличных от значений, приведенных в табл. 2, необходимо использовать интерполяцию. Пример расчета в Mathcad с использованием линейной интерполяции приведен на рис. 2. Тестовые расчеты в приведенной программе показывают, что удовлетвори-

тельные результаты получаются также при температурах ниже 260 К. Однако в этом случае погрешность расчета теплопроводности несколько увеличится. Например, при температуре 220 К и давлении 10 бар эта погрешность составит 1,3%. При давлении 1 бар и температуре от 170 до 1300 К отличие расчетных значений от табличных данных [1] не превысит 0,5%.

Необходимо отметить, что использование кубической сплайн-интерполяции, как показали результаты тестовых расчетов теплопроводности в программе Mathcad, при высоких температурах и давлениях приводит к существенному ухудшению точности расчета в промежуточных точках из-за склонности такой интерполяции к осцилляции. Поэтому использование линейной интерполяции в рассматриваемом случае является лучшим решением.

Таблица 2

Коэффициенты  $a$ ,  $b$ ,  $c$  аппроксимации (5)

Температура, К	$a$	$b$	$c$	Рекомендуемая область использования
260	0,01221413178647	-0,0031784513058	0,0016251803801	от 1 бар до $P_s$ при 260 К
280	0,01059351767539	-0,00247170811249	0,00121322123738	от 1 бар до $P_s$ при 280 К
310	0,00894262611561	-0,00165918849541	0,00076303103011	от 1 до 60 бар
360	0,00469570799222	-0,00035371025872	0,00017449686449	от 1 до 100 бар
420	0,00238656218258	0,0000266636685	0,00001073266307	от 1 до 200 бар
550	0,00119965044238	0,00005575688073	-0,00001226259416	от 1 до 400 бар
800	0,00069644781527	0,0000141762057	-0,00000305548733	от 1 до 800 бар
1050	0,00046312413967	0,00000522994369	-0,00000106866998	от 1 до 1000 бар
1300	0,00031693718776	0,00000291888935	-0,00000057763662	от 1 до 1000 бар

Коэффициенты для расчета увеличения теплопроводности за счет давления  $p$  в барах при фиксированных температурах:

$$\begin{aligned}
 k_{260}(p) &:= 0.01221413178647 \cdot (p - 1) + -0.0031784513058 \cdot (p - 1)^{1.8} + 0.0016251803801 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{280}(p) &:= 0.01059351767539 \cdot (p - 1) + -0.00247170811249 \cdot (p - 1)^{1.8} + 0.00121322123738 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{310}(p) &:= 0.00894262611561 \cdot (p - 1) + -0.00165918849541 \cdot (p - 1)^{1.8} + 0.00076303103011 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{360}(p) &:= 0.00469570799222 \cdot (p - 1) + -0.00035371025872 \cdot (p - 1)^{1.8} + 0.00017449686449 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{420}(p) &:= 0.00238656218258 \cdot (p - 1) + 0.0000266636685 \cdot (p - 1)^{1.8} + 0.00001073266307 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{550}(p) &:= 0.00119965044238 \cdot (p - 1) + 0.00005575688073 \cdot (p - 1)^{1.8} + -0.00001226259416 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{800}(p) &:= 0.00069644781527 \cdot (p - 1) + 0.0000141762057 \cdot (p - 1)^{1.8} + -0.00000305548733 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{1050}(p) &:= 0.00046312413967 \cdot (p - 1) + 0.00000522994369 \cdot (p - 1)^{1.8} + -0.00000106866998 \cdot (p - 1)^2 \\
 k_{1300}(p) &:= 0.00031693718776 \cdot (p - 1) + 0.00000291888935 \cdot (p - 1)^{1.8} + -0.00000057763662 \cdot (p - 1)^2
 \end{aligned}$$

$$X := \begin{pmatrix} 260 \\ 280 \\ 310 \\ 360 \\ 420 \\ 550 \\ 800 \\ 1050 \\ 1300 \end{pmatrix} \quad Y(p) := \begin{pmatrix} k_{260}(p) \\ k_{280}(p) \\ k_{310}(p) \\ k_{360}(p) \\ k_{420}(p) \\ k_{550}(p) \\ k_{800}(p) \\ k_{1050}(p) \\ k_{1300}(p) \end{pmatrix}$$

Теплопроводность ксенона Вт/(м·К) при давлении 1 бар:

$$\lambda_t(T) := (-10.403215 + 73.479574 \cdot T^{-0.59} + 0.776454 \cdot T^{0.5}) \cdot 10^{-3}$$

Интерполированные значения коэффициента увеличения теплопроводности:

$$k_p(T, p) := \text{linterp}(X, Y(p), T)$$

Теплопроводность ксенона Вт/(м·К) как функция температуры  $T$  в К и давления  $p$  в барах:

$$\lambda_{xe}(T, p) := \lambda_t(T) \cdot (1 + k_p(T, p))$$

Пример расчета теплопроводности при температуре 300 К и давлении 30 бар:

$$\lambda_{xe}(300, 30) = 6.788 \times 10^{-3}$$

Рис. 2. Расчет теплопроводности ксенона с использованием линейной интерполяции в программе Mathcad

## Выводы

Как следует из данного краткого анализа методов расчетов теплофизических свойств газообразного ксенона, эти свойства могут быть вычислены с достаточной для инженерной практики точностью до 3 %. Полученное уравнение состояния в безразмерном виде позволяет выполнить расчет термодинамических величин по уже известным методам, разработанным для воздуха и других газов. Получены достаточно точные и простые зависимости для расчета термодинамических параметров (энтальпия, теплота парообразования) на линии насыщения. Предложен более простой метод расчета переносных свойств (теплопроводности и вязкости) при атмосферном давлении. Приведены рекомендации по их расчету при высоких давлениях.

## Список использованной литературы

1. Теплофизические свойства неона, аргона, криптона и ксенона / Под ред. В. А. Рабиновича. – М.: Изд-во стандартов, 1976. – 636 с.
2. Солод С. Д. Расчеты теплофизических свойств сухого воздуха. – К.: Наук. думка, 2006. – 49 с.
3. Теплофизические свойства технически важных газов при высоких температурах и давлениях: Справочник / В. Н. Зубарев, А. Д. Козлов, В. М. Кузнецов и др. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 232 с.
4. Теплофизические свойства газов и жидкостей: Справочник / Н. Б. Варгафтик. – М.: Наука, 1972. – 721 с.
5. Sifner O., Klomfar J. Thermodynamic Properties of Xenon from the Triple Point to 800 K with Pressures up to 350 MPa //



J. Phys. Ref. Data. – Vol. 23, №1. – 1994. – P. 63-118.

6. ГСССД 17-81, Динамическая вязкость и теплопроводность гелия, неона, аргона, криптона и ксенона при атмосферном давлении в интервале температур от нормальных точек кипения до 2500 К: Офиц. изд. – М.: Изд-во стандартов, 1982.

7. Вязкость газов и газовых смесей: Справочное руководство / И. Ф. Голубев. – М.: Физматлит, 1959. – 375 с.

8. Свойский В. З. Вязкость и теплопроводность газов в диапазоне температур от 100 до 2000 К // Ученые записки ЦАГИ. – Т. IV, №1. – 1973. – С. 126-132.

9. База данных по теплофизическим свойствам газов и их смесей, используемых в ЯЭУ / НИЯУ МИФИ "Росатом". – Режим доступа: <http://www.gsssd-rosatom.mephi.ru/DB-tp-02/xe.php> .

Статья поступила 21.01.2019