

УДК 536.7 (08)

И. А. Андреева, аспирант (БГТУ);
П. М. Клепацкий, кандидат технических наук, доцент (БГТУ);
Т. Ф. Шкарупа, кандидат технических наук (БГТУ)

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ И КАЛОРИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРИРОДНОГО ГАЗА

Рассмотрены четыре метода расчета физических свойств природного газа, представленные в стандарте Российской Федерации, и методика расчета, разработанная в «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси. Показаны ограничения для области применения этих методов и по каждому объекту газовой промышленности определена методика расчета термодинамических свойств, показывающая наиболее достоверные данные. Методика расчета «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси заслуживает доработки до требований стандарта и последующей стандартизации.

Four methods of calculation of physical properties of the natural gas, presented in the standard of the Russian Federation and a method, developed by «Joint Institute for Power and Nuclear Research – Sosny» of National Academy of Sciences of Belarus are briefly examined. Restrictions for a scope of these methods are shown and on each object of the gas industry the most suitable method of calculation of thermodynamic properties is certain. The method, developed by «JIPNR» of National Academy of Sciences of Belarus deserves completion up to requirements of the standard and the subsequent standardization.

Введение. Современная энергетика характеризуется возрастанием потребления природного газа. Для производства электроэнергии ежегодно прирост потребления газа в мире составляет около 15%. По сценариям экспертов, мировая потребность в газе к 2030 г. возрастет по сравнению с нынешним уровнем более чем в два раза, а доля газа в производстве электроэнергии и тепла составит около 60% [1]. В Республике Беларусь доля природного газа в 2008 г. в валовом потреблении топливно-энергетических ресурсов составила 62,3%, а в объеме котельно-печного топлива – 79,7%. Удельный вес природного газа в отечественной электроэнергетической отрасли достиг 95–96%.

При транспортировке природного газа от месторождений к потребителям его параметры по давлению и составу изменяются. Давление газа в магистральных газопроводах – $p_{\text{мг}} \approx 5\text{--}7$ МПа, а в сетях потребителя $p_{\text{сп}} \approx 0,1\text{--}0,3$ МПа. В настоящее время для понижения давления от $p_{\text{мг}}$ до $p_{\text{сп}}$ используется необратимый процесс дросселирования, связанный с потерей энергии потока. В процессе обратимого изэнтропийного расширения потенциальная энергия потока газа может быть использована для производства других видов полезной энергии (электроэнергии) в детандерных установках. Чтобы точно оценить потенциал избыточного давления и выбрать детандерный агрегат максимальной мощности, необходимы достоверные данные о термических и калорических свойствах природного газа.

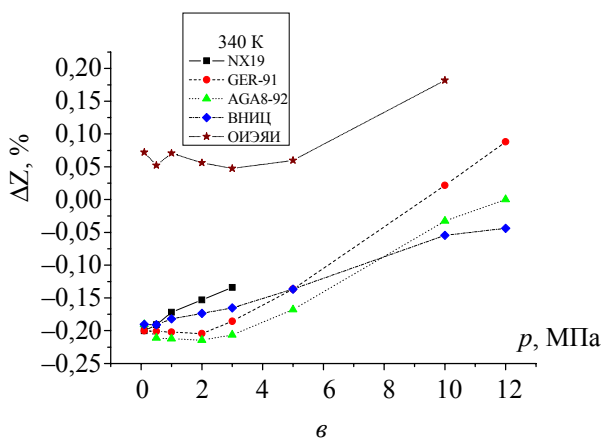
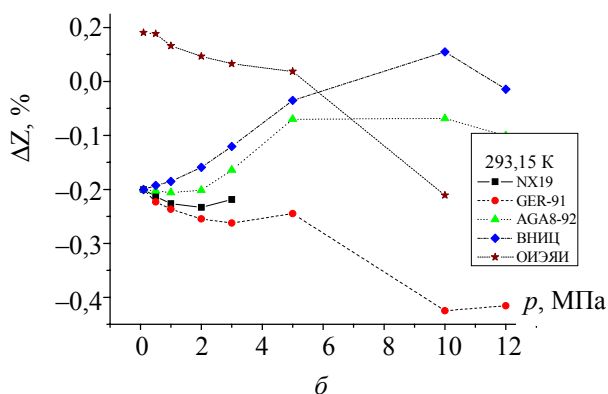
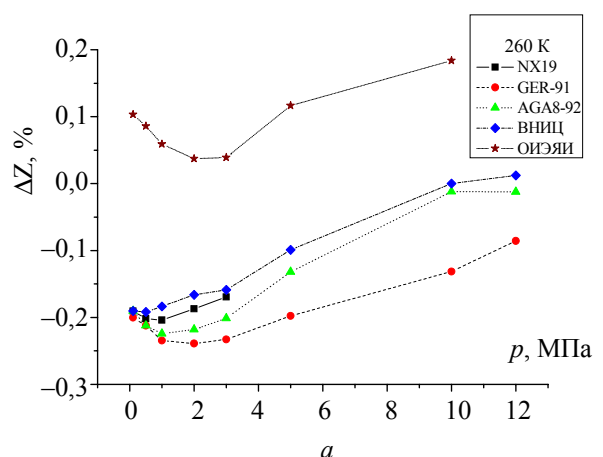
Основной текст. В настоящее время для расчета термических свойств природного газа используются четыре стандартные методики, представленные в стандарте Российской Федерации [2]:

- модифицированный метод NX19 мод.;
- модифицированное уравнение состояния (УС) GERG-91 мод.;
- модифицированное уравнение состояния (УС) AGA8-92DC;
- уравнение состояния ВНИЦ СМВ.

В ходе работы проведено сравнение коэффициента сжимаемости, рассчитанного методами работы [2] от данных работы [3] при разных температурах и давлениях. В работе [3] разработано единое уравнение состояния природного газа, а также проведены расчеты и сравнения термических и калорических свойств для одного состава природного газа. Состав природного газа, рассмотренный в этой работе, близок к составу природного газа, используемого в Республике Беларусь. Поэтому данные работы [3] использовались нами для сравнения с расчетными данными остальных методов.

Результаты сравнения коэффициента сжимаемости представлены на рисунке. Были проанализированы ограничения для области применения методов, а также по каждому объекту газовой промышленности определена наиболее подходящая методика расчета термических свойств.

Погрешность и максимальное отклонение плотности (коэффициента сжимаемости) газа, рассчитанных по уравнению NX 19 при давлении газа до 3 МПа, составляют $\leq 0,2\%$ и $\leq 0,37\%$ (рисунок). При давлениях до 12 МПа и наличии в газе сероводорода – 1,7% и 2,5%. На газораспределительных станциях (ГРС) давление газа достигает 3 МПа, поэтому для расчетов термических свойств на этих объектах целесообразно использовать уравнение NX 19.



Зависимость отклонений коэффициента сжимаемости, рассчитанного по разным методикам, от давления при температурах 260 К (а); 293,15 К (б); 340 К (в)

Погрешность и максимальное отклонение плотности, рассчитанной по уравнению GERG-91 при давлении газа до 12 МПа, составляют $\leq 0,2\%$ и $\leq 0,7\%$ (рисунок), а при том же давлении и наличии в газе сероводорода – $\leq 2,1\%$ и $\leq 3,1\%$ соответственно.

Погрешность и максимальное отклонение плотности (коэффициента сжимаемости), рассчитанные по уравнению AGA8-92DC при давлении газа до 12 МПа составляют $\leq 0,15\%$ и $\leq 0,43\%$ (рисунок), а при том же давлении и на-

личии в газе сероводорода – $\leq 1,3\%$ и $\leq 1,9\%$ соответственно.

Эти два уравнения рекомендуется использовать для расчетов термических свойств на объектах газовой промышленности и газотранспортных предприятий, на которых давление газа не превышает 12 МПа.

Уравнение состояния ВНИЦ СМВ является самым представительным по возможному составу газа (до 35 компонентов, относящихся к различным типам химических соединений), следовательно, его рационально использовать на газодобывающих предприятиях, где состав природного газа весьма разнообразен.

Погрешность и максимальное отклонение плотности (коэффициента сжимаемости), рассчитанные по этому уравнению при давлении газа до 12 МПа составляют $\leq 0,2\%$ и $\leq 0,33\%$, а при том же давлении и наличии в газе сероводорода – $\leq 0,36\%$ и $\leq 0,54\%$ соответственно.

Все уравнения стандарта [2] представляют собой уравнения идеальной газовой смеси, поправка на «неидеальность» которой определяется с использованием псевдокритических параметров смеси, рассчитываемых по правилам комбинаторики и индивидуальным параметрам компонентов.

Недостатком методов работы [2] является то, что все они используют теорию соответственных состояний, которая математически работает только с тремя постоянными, а при расчете свойств природного газа их гораздо больше. А это и далеко не бесспорные методы расчета псевдокритических параметров приводят к тому, что коэффициент сжимаемости при малых плотностях принимает значение большее единицы ($Z > 1$). Указанные в стандарте методики не позволяют рассчитывать calorические свойства. Возможно, уравнение состояния ВНИЦ СМВ и позволяет рассчитывать calorические свойства, но в стандарте об этом не сказано.

В работе также рассмотрена методика расчета ОИЭЯИ НАН Беларуси, в основу которой положена концепция идеального раствора и которая позволяет рассчитывать не только термические, но и calorические свойства природного газа.

Термодинамические свойства компонентов природного газа (метана, этана, пропана, кислорода, азота и двуокиси углерода) рассчитываются по единым уравнениям состояния (1) типа полиномиального ряда от температуры и давления:

$$z = 1 + \sum_i \sum_j b_{i,j} \cdot \omega^i / \tau^j, \quad (1)$$

стандартизованным в Государственной службе стандартных справочных данных [4–9].

Здесь $z = pv/RT$, $\omega = \rho/\rho_{кр}$, $\tau = T/T_{кр}$, где $\rho_{кр}$ и $T_{кр}$ – критические плотность и температура компонентов.

Энтальпия h , энтропия s и изобарная теплоемкость c_p рассчитываются по выражениям (2)–(4):

$$h = h_0 + R \cdot T \cdot \sum_i \sum_j \frac{i+j}{i} b_{i,j} \cdot \omega^i / \tau^i; \quad (2)$$

$$s = s_0 - R \cdot \ln \frac{\omega}{\omega_0} + R \cdot \sum_i \sum_j \frac{j-1}{i} b_{i,j} \cdot \omega^i / \tau^i; \quad (3)$$

$$c_p = c_{v0} - R \cdot \sum_i \sum_j \frac{j \cdot (j-1)}{i} b_{i,j} \cdot \omega^i / \tau^i + \frac{R \cdot [1 - \sum_i \sum_j \frac{j \cdot (j-1)}{i} b_{i,j} \cdot \omega^i / \tau^i]^2}{1 + \sum_i \sum_j (i+1) b_{i,j} \cdot \omega^i}, \quad (4)$$

где h_0 , s_0 , c_{v0} – параметры в идеально-газовом состоянии. Значения h_0 и s_0 находятся из соотношений (5) и (6):

$$h_0 = \int_{T_0}^T c_p^0 dT + h_{00} + h_0^0; \quad (5)$$

$$s_0 = \int_{T_0}^T \frac{c_p^0}{T} dT + s_{00} + s_0^0, \quad (6)$$

где h_{00} и s_{00} – энтальпия и энтропия идеального газа при температуре T_0 ; h_0^0 – теплота сублимации при $T = 0$ К, s_0^0 – константа (принято $s_0^0 = 0$).

Изобарная теплоемкость в идеально-газовом состоянии аппроксимирована обобщенным полиномом:

$$c_p^0 = R \cdot (\sum_j a_j \cdot \theta^j + \sum_j \beta_j \cdot \theta^{-j}), \quad (7)$$

где $\theta = T/100$.

Теплофизические свойства пропана, н-бутана и изобутана, н-пентана и изопентана рассчитываются по уравнению состояния Бенедикта – Вебба – Рубина (БВР) [9]

$$P = R \cdot T \cdot \rho + (B_0 \cdot R \cdot T - A_0 - \frac{C_0}{T}) \cdot \rho^2 - (b \cdot R \cdot T - a) \cdot \rho^3 + a \cdot \alpha \cdot \rho^6 + \frac{c \cdot \rho^3}{T^2} \cdot (1 + \gamma \cdot \rho^2) \cdot \exp(-\gamma \cdot \rho^2). \quad (8)$$

Значения восьми параметров B_0 , A_0 , C_0 , b , a , c , γ , α , являющихся числовыми коэффициентами уравнения БВР, приведены в [10].

Энтальпия компонентов рассчитывается по уравнению

$$H = H_i + (B_0 \cdot R \cdot T - 2 \cdot A_0 - 4 \cdot \frac{C_0}{T^2}) \cdot \rho - (2 \cdot b \cdot R \cdot T - 3 \cdot a) \cdot \rho^2 / 2 + 6 \cdot a \cdot \alpha \cdot \rho^5 + \frac{C \cdot \rho^2}{T^2} \cdot [3 \cdot \frac{1 - \exp(-\gamma \cdot \rho^2)}{\gamma \cdot \rho^2} - \frac{\exp(-\gamma \cdot \rho^2)}{2} + \gamma \cdot \rho^2 \cdot \exp(-\gamma \cdot \rho^2)]. \quad (9)$$

Расчеты термодинамических свойств природного газа как единой газовой смеси проводятся по законам идеального раствора:

$$H_{см} = \sum_i x_i \cdot h_i; \quad (10)$$

$$c_{pсм} = \sum_i x_i \cdot c_{pi}; \quad (11)$$

$$v_{pсм} = \sum_i x_i \cdot v_{pi}, \quad (12)$$

где x_i – мольная доля i -го компонента в растворе; $i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10$ и соответствует компонентам: метану (CH_4), этану (C_2H_6), пропану (C_3H_8), изобутану (C_4H_{10}), н-бутану (C_4H_{10}), изопентану (C_5H_{12}), н-пентану (C_5H_{12}); h_i – энтальпия i -го компонента; c_{pi} – изобарная теплоемкость i -го компонента; v_i – удельный объем i -го компонента.

В работе проведен расчет термических и калорических свойств природного газа с составом газа, такого же, как в работе [3].

Анализ данных расчетов термических свойств показывает их хорошее согласование с данными работы [3] (рисунок), расхождение по приращениям энтальпии в диапазоне температур 250–350 К при давлениях до 12 МПа не превышает 4–6 кДж/кг. Результаты этих сравнений подтвердили достоверность указанной методики для газотранспортной системы Республики Беларусь.

Подводя итог, можно утверждать, что расхождение значений коэффициента сжимаемости ΔZ , рассчитанных по методам работы [2], между собой достигают 0,4% при температуре 340 К; а при $T = 260$ К и 293,15 К – близки к нулю. Расхождения данных, рассчитанных методами работ [2] и [3] при температурах 260 К и 340 К составляют соответственно –0,2 и 0,05%, уменьшаются с ростом температуры и имеют систематический характер. Расхождения коэффициентов сжимаемости, рассчитанных по методикам ОИЭЯИ и работы [3] составляют $\pm 0,15\%$. Расхождения ΔZ данных, рассчитанных по методике ОИЭЯИ, с данными, рассчитанными по работе [4], имеют систематический характер, причем данные работы [4] занижены

на ~0,25%. Систематические расхождения данных этих работ, вероятно, объясняются разными концепциями построения уравнения состояния природного газа – многокомпонентного вещества. На наш взгляд, концепция идеального раствора – предпочтительная.

Заключение. В Республике Беларусь нет стандарта для расчета термодинамических свойств природного газа. Используемые для расчета стандартные методики РФ [2] имеют ряд недостатков.

Необходимо преобразовать методику ОИЭЯИ НАН Беларуси согласно требованиям стандарта и провести ее стандартизацию.

Литература

1. Клименко, А. Н. Термодинамический анализ и опытное исследование расширительной машины в процессах обработки и переработки природного газа: автореф. дис. канд. техн. наук / А. Н. Клименко. – М., 1955. – 20 с.

2. Газ природный, методы расчета физических свойств: ГОСТ 30319.2–96. – Введ. 01.07.1997. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1997. – 53 с.

3. Природный газ расчетный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, коэффициент объемного расширения и показатель адиабаты при температурах 250...450 К и давлений 0,1...12 МПа: ГСССД 81–84. – Введ. 19.12.1984. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1985. – 19 с.

4. Метан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия и изобарная теплоемкость в диапазоне температур 100...1000 К и давлений 0,1...100 МПа: ГСССД 18–81. – Введ. 13.05.1981. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1982. – 11 с.

5. Этан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия и изобарная теплоемкость в диапазоне температур 100...500 К и давлений 0,1...70 МПа: ГСССД 48–83. – Введ. 03.08.1983. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1983. – 15 с.

6. Пропан жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия и изобарная теплоемкость в диапазоне температур 100...700 К и давлений 0,1...100 МПа: ГСССД 147–90. – Введ. 05.06.1990. – М.: Государственный комитет СССР по управлению качеством продукции и стандартам: Изд-во стандартов, 1990. – 17 с.

7. Диоксид углерода жидкий и газообразный. Плотность, фактор сжимаемости, энтальпия, энтропия, изобарная теплоемкость, скорость звука и коэффициент объемного расширения в диапазоне температур 220...1300 К и давлений 0,1...100 МПа: ГСССД 96–86. – Введ. 23.04.1986. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1986. – 29 с.

8. Кислород жидкий и газообразный. Плотность, энтальпия и изобарная теплоемкость в диапазоне температур 700–1000 К и давлений 0,1...100 МПа: ГСССД 19–81. – Введ. 13.05.1981. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1981. – 34 с.

9. Плотность, энтальпия и изобарная теплоемкость жидкого и газообразного азота при температурах 700–1000 К и давлениях 0,1...100 МПа: ГСССД 4–78. – Введ. 25.01.1978. – М.: Государственный комитет СССР по стандартам: Изд-во стандартов, 1978. – 12 с.

10. Шпильрайн, Э. Э. Основы теории теплофизических свойств веществ / Э. Э. Шпильрайн, П. М. Кессельман. – М.: Энергия, 1977. – 248 с.

Поступила 02.03.2011