Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

УДК 631.171

Математическая модель для исследования коэффициента сжимаемости биогазового топлива

Петров Н.В., Друзьянова В.П., Татарникова П.А., Степанов С.П.

Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова

Аннотация

В статье авторами рассматривается вопрос зависимости степени сжатия биогаза от таких компонентов как метан и углекислый газ. Для теоретического расчета было использовано равенство Редлиха – Квонга, при этом предлагается вычисление путем решения кубического уравнения. В результате получено уравнение коэффициента сжимаемости для биогазового топлива, на основе которого были определены теоретические коэффициенты сжимаемости биогазового топлива для разного состава. Для определения коэффициентов сжимаемости предложено проведение цикла экспериментов с использованием биогазовой смеси разного состава, а из экспериментальных данных методом аппроксимации - получить зависимость, учитывающую двухкомпонентный состав топлива. С учетом коэффициента сжимаемости получена формула объема заправляемого биогаза путем преобразования объединенного газового закона.

Ключевые слова: МОТОРНОЕ ТОПЛИВО, БИОГАЗ, КОЭФФИЦИЕНТ СЖИМАЕМОСТИ, УРАВНЕНИЕ РЕДЛИХА-КВОНГА, МЕТАН, УГЛЕКИСЛЫЙ ГАЗ

Введение

В автотракторной технике в качестве моторного топлива используется компримированный биогаз, сжатый до 20 Мпа. Степень сжатия биогаза зависит от двух основных компонентов –метана (CH_4) и углекислого газа (CO_2), их степень воздействия на сжатие зависит, в свою очередь, от значения коэффициента сжимаемости (Z) [1].

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

Материалы и методы исследования

Для теоретического расчета коэффициента сжимаемости биогазового топлива примем формулу Редлиха-Квонга [2-4]:

$$P = \frac{RT}{V-b} - \frac{a}{T^{0,5} \cdot V(V+b)}, \quad (1)$$

где: P – давление, Па; T – абсолютная температура, К; V – мольный объем, м^3/моль; R=8,31441±0,00026 – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль*К); a и b – некоторые константы, зависящие от конкретного вещества.

Результаты исследований

В случае значения коэффициента сжимаемости Z=PV/RT уравнение примет вид кубического [5, 6]:

$$Z^3 - (1+B)Z^2 + (A - 2B - 3B^2)Z - (AB - B^2 - B^3) = 0 \quad (2)$$

Предложенное уравнение решается через кубическое уравнение, общий вид которого следующий:

$$y^3 + py^2 + qy + r = 0 \quad (3)$$

Кубическое уравнение общего вида может быть переведено на:

$$x^3 + ax + b = 0 \quad (4)$$

Заменив $y \to x - \frac{p}{3}$,

где: $a = \frac{1}{3}(3q - p^2)$ и $b = \frac{1}{27}(2p^3 - 9pq + 27r)$

Условия для коэффициентов p, q и r будут определяться следующим образом:

- если $\frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27} > 0,$ то в уравнении будет один корень, являющийся действительным и два сопряженных корня, являющихся мнимыми;

- если $\frac{b^2}{4} + \frac{a^3}{27} = 0,$ то уравнение имеет 3 действительных корня, при этом хотя бы 2 из них равны;

- если $\frac{b^2}{4}+\frac{a^3}{27}<0,$ то в уравнении три корня, являющихся действительными и не равными между собой.

Для насыщенных жидкостей и паров верен последний случай. Поэтому тригонометрическое решение может быть использовано в решении уравнений состояния газов. Для этого нужно вычислить значения угла φ, где:

$$\cos\varphi=\frac{\frac{-b}{2}}{\sqrt{\frac{-a^3}{27}}}, \tag{5}$$

отсюда:

$$x_1=2\sqrt{\frac{-a}{3}}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right) \text{ и } y_1=-\frac{p}{3}+x_1, \tag{6}$$

$$x_2=2\sqrt{\frac{-a}{3}}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+120^\circ\right) \text{ и } y_1=-\frac{p}{3}+x_2, \tag{7}$$

$$x_3=2\sqrt{\frac{-a}{3}}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+240^\circ\right) \text{ и } y_1=-\frac{p}{3}+x_3 \tag{8}$$

Далее для вычисления значения угла φ, необходимо определить коэффициенты:

$$z^3+pz^2+qz+r=0, \tag{9}$$

где: $p=B-1,$

$q=A-2B-3B^2,$

$r=-\left(AB-B^2-B^3\right),$

$a=\frac{\left(3q-p^2\right)}{3},$

$b=\left(2p^3-9pq+27r\right)27$

Определив все коэффициенты, необходимо будет подставить их в уравнение:

$$z_1=-\frac{p}{3}+2\sqrt{-\frac{a}{3}}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}\right), \tag{10}$$

$$z_2=-\frac{p}{3}+2\sqrt{-\frac{a}{3}}\cdot\cos\left(\frac{\varphi}{3}+\frac{2\pi}{3}\right), \tag{11}$$

Электронный научно-производственный журнал
«АгроЭкоИнфо»
==========

$$z_3 = -\frac{p}{3} + 2\sqrt{-\frac{a}{3}} \cdot \cos\left(\frac{\varphi}{3} + \frac{4\pi}{3}\right), \qquad (12)$$

φ находим по следующему выражению:

$$\varphi = \cos^{-1}\left(\frac{-b}{\left(2\sqrt{\frac{-a^3}{27}}\right)}\right) \qquad (13)$$

Уравнение коэффициента сжимаемости для биогазового топлива будет иметь следующий вид:

$$z = z_{\max} - z_{\min} \qquad (14)$$

На основе полученного уравнения были определены теоретические коэффициенты сжимаемости биогазового топлива для разного состава (табл. 1).

Таблица 1.Теоретические значения коэффициентов сжимаемости для разных составов биогаза

Давление, МПа	Коэффициент сжимаемости для разного состава биогаза							
	55	60	65	70	75	80	85	90
20	0,59	0,61	0,63	0,66	0,69	0,72	0,74	0,78

На рис. 1 представлена зависимость коэффициента сжимаемости от различных составов биогаза, полученная в результате теоретических вычислений.

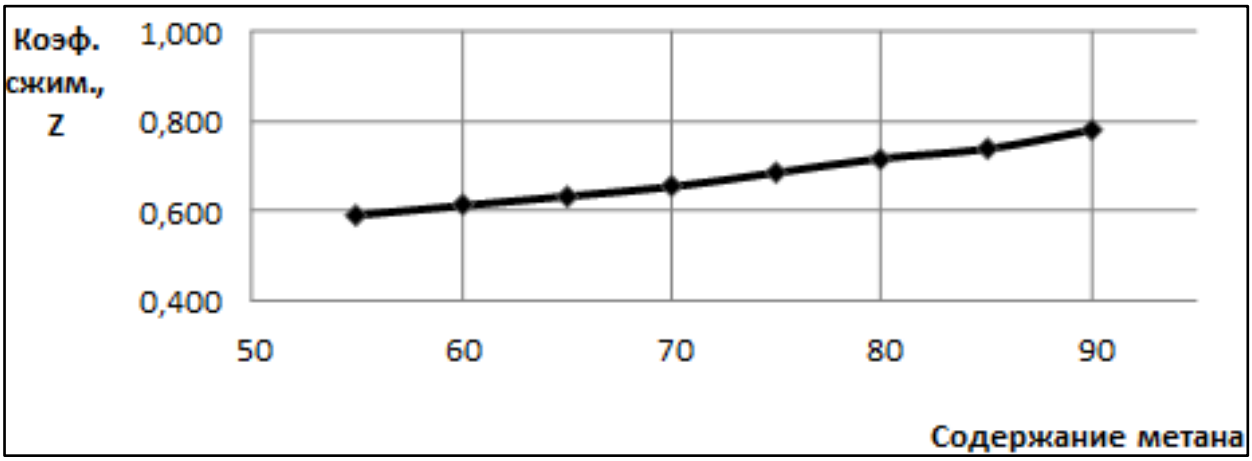

Рис. 1. Теоретическая зависимость коэффициента сжимаемости биогаза

Предлагается для определения коэффициентов сжимаемости провести цикл экспериментов с использованием биогазовой смеси разного состава, затем из экспериментальных данных методом аппроксимации получить зависимость, учитывающую двухкомпонентный состав топлива.

Исходя из полученных данных коэффициента сжимаемости, видно, что отклонение объема реального газа (биогаза) от метана существенна для разного состава. Поэтому возникает необходимость проверки объема заправляемого биогаза в различных температурных условиях и давлениях.

Для определения объема заправляемого биогаза в зависимости от наружной температуры используется объединенный газовый закон [7-9]:

$$\frac{P_1V_1}{T_1} = \frac{P_2V_2}{T_2} \tag{15}$$

Тогда, в преобразованном виде выражение будет иметь следующий вид:

$$V_1 = \frac{P_2V_2T_1}{P_1T_2Z} \tag{16}$$

В упрощенном виде объем заправляемого биогаза находим по следующей формуле:

$$V_{зб} = \frac{(P+1{,}033)\cdot V_б \cdot T_{ст}}{Pст \cdot T_б \cdot Z} \tag{17}$$

где: $V_{зб}$ – объем заправляемого биогаза; P – давление в баллоне; $P_{СТ}$ – атмосферное давление; $V_б$ – объем баллона, л; $T_{СТ}$ – стандартная (постоянная) температура, К; $T_б$ – температура в баллоне, К; Z – коэффициент сжимаемости.

На основе полученного массива данных коэффициента сжимаемости для разного состава, используя формулу (17), вычисляем объем заправляемого биогаза в различных температурных условиях (рис. 2).

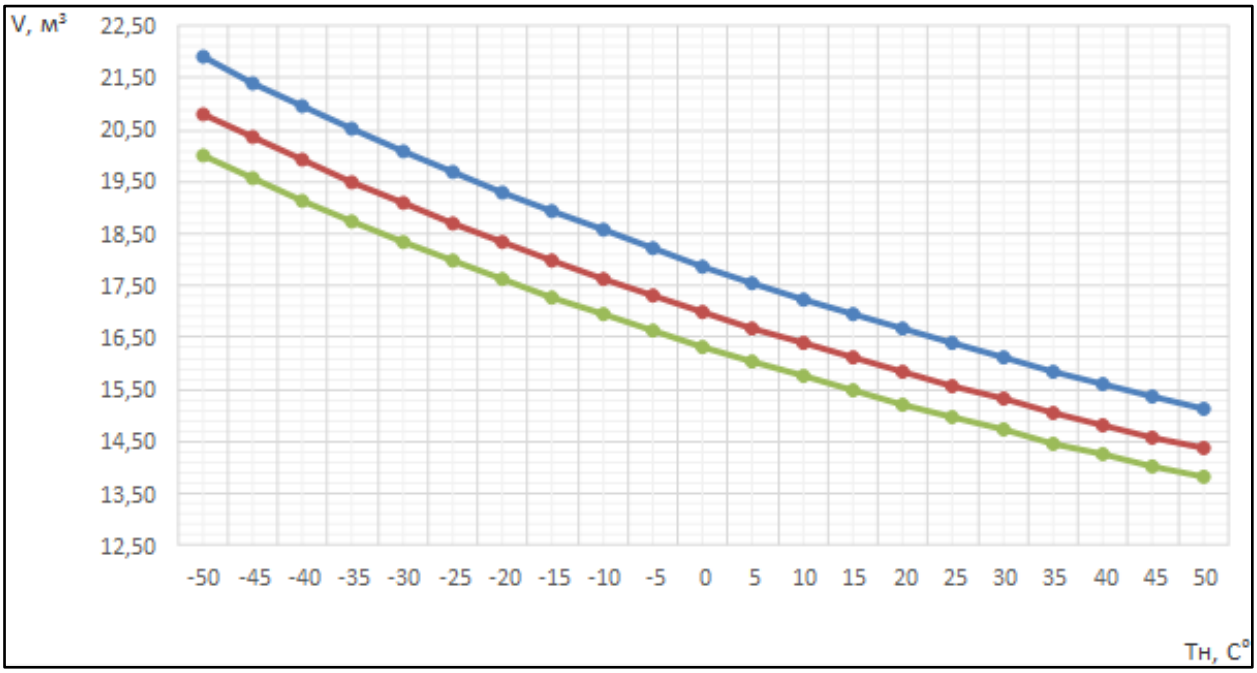

Рис. 2. Объем заправляемого биогаза (разного состава) в зависимости от наружной температуры атмосферного воздуха

Примечание: — - CH_4 = 55, CO_2 = 45; — - CH_4 = 70, CO_2 = 30; — - CH_4 = 90, CO_2 = 10.

Выводы

На основе уравнения состояния газа Редлиха-Квонга были определены показатели коэффициента сжимаемости биогаза для разного состава. Полученные данные показывают, что с увеличением объемной доли метана, коэффициент сжимаемости увеличивается (при соотношении метана к углекислому газу 90:10, коэффициент сжимаемости равен 0,825), тогда как по ГОСТу коэффициент сжимаемости метана равен – 0,984. Также с учетом коэффициента сжимаемости получена формула объема заправляемого биогаза путем преобразования объединенного газового закона. При 0 °С в пятидесятилитровом баллоне высокого давления можно загрузить 18,29 м^3 биогаза составным соотношением 55:45.

Список использованных источников:

1. Петров Н.В. Определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива для заправки сельскохозяйственной техники // Тракторы и сельхозмашины. – 2022. – Т. 89, № 5. – С. 351–356. – DOI 10.17816/0321-4443–109289. – EDN SGAAMC.

2. Петрик Г.Г. Разработка однопараметрических семейств термических уравнений состояния на основе стандартных уравнений Ван-дер-Ваальса и Редлиха-Квонга // Возобновляемая энергетика: проблемы и перспективы : материалы Международной

конференции: к 25-летию Института проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН: в 2-х томах, Махачкала, 19–22 сентября 2005 года / редколлегия: А.Б. Алхасов, Д.Н. Кобзаренко. Том 2. – Махачкала: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем геотермии Дагестанского научного центра РАН, 2005. – С. 94–101. – EDN RXIXHL.

3. Васильева Л.А., Лалетин Р.А., Кудряшов М.Д., Баязитов В.Д. Компьютерное моделирование уравнения Редлиха – Квонга для смесей реальных газов // Сборник научных трудов SWorld. – 2013. – Т. 4, № 4. – С. 24–27. – EDN RTIEQZ.

4. Никишкин С.И., Котов В.В. Методика уточнения зависимостей для расчета термодинамических свойств газов, базирующихся на кубических уравнениях состояния // Мониторинг. Наука и технологии. – 2021. – № 1(47). – С. 90–94. – DOI 10.25714/MNT.2021.47.011. – EDN DUVVKN.

5. Троценко А.В. Прогнозирование и расчет азеотропных превращений на основе кубических уравнений состояния // Технические газы. – 2003. – № 1(2003). – С. 51–57. – EDN SIJKBN.

6. Шестова Т.Д., Маркварт А.С., Лозовский Т.Л., Железный В.П. Кубическое уравнение состояния для прогнозирования фазовых равновесий малоизученных веществ // Журнал физической химии. – 2013. – Т. 87, № 6. – С. 905. – DOI 10.7868/S0044453713060253. – EDN PZVMAV.

7. Ганиев Н.Р. Методика изучения газовых законов // Студенческий вестник. – 2023. – № 14–4(253). – С. 10–12. – EDN YAMDEM.

8. Макаров А.Н. Законы теплового излучения цилиндрических газовых объемов // Энергоресурсосбережение в промышленности: Сборник научно-практических трудов / Под ред. А.Н. Макарова. Том Выпуск 5. – Тверь: Тверской государственный технический университет, 2017. – С. 26–31. – EDN ZFGBMZ.

9. Газовые законы: лабораторный практикум. – Волгоград: Издательство ВГПУ "Перемена", 2003. – 12 с. – EDN TVGVIT.

==========

Цитирование:

Петров Н.В., Друзьянова В.П., Татарникова П.А., Степанов С.П. Математическая модель для исследования коэффициента сжимаемости биогазового топлива [Электрон. ресурс] // АгроЭкоИнфо: Электронный научно-производственный журнал. – 2023. – № 3. – Режим доступа: http://agroecoinfo.ru/STATYI/2023/3/st_325.pdf.