

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109289>

Оригинальное исследование



# Определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива для заправки сельскохозяйственной техники

Н.В. Петров

Северо-Восточный федеральный университет им. М.К. Аммосова, Якутск, Россия

## АННОТАЦИЯ

**Обоснование.** В сельской местности Республики Саха (Якутия) основным потребителем жидкого топлива нефтяного происхождения является сельскохозяйственная техника. Даже частичный перевод этой техники на биогаз позволил бы снизить потребление жидких нефтяных топлив, в связи с этим, для заправки сельскохозяйственной техники биогазовым топливом в первую очередь необходимо определить коэффициент сжимаемости биогазового топлива. Для определения коэффициента сжимаемости биогаза разного состава требуется проводить ряд экспериментальных работ.

**Цель работы** – определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива разного состава, используемого при заправке сельскохозяйственной техники компрессором.

**Материалы и методы.** Экспериментальное определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива проведено на установке типа УГК-3. Математическое моделирование на основе полученных экспериментальных работ выполнено в программе CurveExpert и Excel – для линейной аппроксимации массива данных.

**Результаты.** На основе уравнения Менделеева-Клапейрона для идеального газа получена формула для теоретического расчета коэффициента сжимаемости биогаза для разного химического состава. Для получения экспериментальных данных было проведено ряд экспериментов на установке типа УГК-3 с доработками для учета коэффициента сжимаемости биогазового топлива для разных условий. Согласно, результатам линейной аппроксимации, показатель коэффициента сжимаемости биогазового топлива с увеличением объемного содержания метана стремится к значению коэффициента сжимаемости чистого метана по ГОСТу 30319.2-96.

**Заключение.** Практическая ценность исследования заключается в возможности использования предложенного метода расчета коэффициента сжимаемости при заправке автотракторной техники биогазовым топливом для безопасной и эффективной заправки.

**Ключевые слова:** биогазовое топливо; коэффициент сжимаемости биогазового топлива; установка УГК-3; уравнение Менделеева-Клапейрона; плотность биогаза.

## Для цитирования:

Петров Н.В. Определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива для заправки сельскохозяйственной техники // Тракторы и сельхозмашины. 2022. Т. 89, № 5. С. 351–356. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109289>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109289>

Original Study Article

# Determination of biogas fuel compression ratio for agricultural machinery fueling

Nikolay V. Petrov

North-Eastern federal university named after M.K. Ammosov Yakutsk, Republic of Sakha (Yakutia), Russia

## ABSTRACT

**BACKGROUND:** Agricultural machinery is the main consumer of liquid petroleum-product fuel in the countryside of Republic of Sakha (Yakutia). Even partial machinery transition to biogas fuel would reduce consumption of liquid petroleum-product fuel, in this regard, first of all, it is necessary to determine biogas fuel compression ratio for agricultural machinery fueling. A number of experimental works is demanded to carry out to determine compression ratio of biogas fuel of different compositions.

**AIMS:** Determination of compression ratio of biogas fuel of different composition for agricultural machinery fueling with a compressor.

**METHODS:** Experimental determination of biogas fuel compression ratio carried out with the UGK-3 test facility. Based on obtained experimental data, numerical simulation was carried out with CurveExpert and MS Excel software (for data set linear approximation).

**RESULTS:** Based on Mendeleev-Clapeyron ideal gas law, the formula for theoretical calculation of compression ratio of biogas fuel of different chemical compositions. In order to obtain experimental data, a number of experimental works was carried out with the UGK-3 test facility, updated for considering of biogas fuel compression ratio in various conditions. According to the results of linear approximation, with increasing of methane volume fraction, biogas fuel compression ratio tends to values of pure methane compression ratio taken from GOST 30319.2-2019.

**CONCLUSIONS:** Practical utility of the study lies in ability of using the proposed method of calculation of compression ratio during vehicle fueling with biogas fuel for the sake of safe and effective fueling.

**Keywords:** *biogas fuel, biogas fuel compression ratio; the UGK-3 test facility; ideal gas law; biogas fuel density.*

## Cite as:

Petrov NV. Determination of biogas fuel compression ratio for agricultural machinery fueling. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2022;89(5):351–356. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-109289>

Received: 11.07.2022

Accepted: 04.09.2022

Published: 15.11.2022

## ВВЕДЕНИЕ

Для заправки сельскохозяйственной техники биогазом в первую очередь необходимо определить коэффициент сжимаемости биогазового топлива. На сегодняшний день еще не определен коэффициент сжимаемости биогазового топлива для разного состава. Определение коэффициента сжимаемости биогаза для разного состава требует проведение ряда экспериментальных работ. Проведение экспериментальных работ подразумевает использование большого и объемного экспериментального оборудования, а также значительных затрат человеческого времени.

## ЦЕЛЬ ИССЛЕДОВАНИЯ

Определение коэффициента сжимаемости биогаза для разного состава при заправке биогазовым топливом сельскохозяйственной техники компрессором.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Экспериментальное определение коэффициента сжимаемости биогазового топлива, особенно с высоким

содержанием  $\text{CO}_2$ , рекомендуется проводить на установках типа УГК-3 [1]. Схема соединения технологических узлов установки УГК-3 для изучения коэффициента сжимаемости биогаза приведена на рис. 1.

Установка УГК-3 выпускалась на начальном этапе развития газоконденсатных исследований в СССР в 1960-е годы. Объем камеры этой установки 3,1 л. Камера PVT представляет собой цилиндр, в который помещен поршень с выведенным через крышку цилиндра штоком, снабженным измерительной шкалой. Внутри штока имеется безобъемная мешалка, приводимая в движение электромагнитом. Конструкцией установки предусмотрены жидкостный обогрев камеры PVT и место для термометра в нижней крышке цилиндра для контроля температуры. Ниже смотрового окна помещен измерительный поршень (меньшего сечения, чем поршень, помещенный в верхней части камеры), который перемещается при помощи электродвигателя [2].

Поэтому определение коэффициента сжимаемости для разного состава биогаза можно провести с использованием методов математического моделирования.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

Для получения уравнения коэффициента сжимаемости газа воспользуемся уравнением Менделеева-Клапейрона, описывающим состояние идеального газа [3]:

$$pV = \frac{m}{M}RT. \quad (1)$$

Если учесть коэффициент сжимаемости  $Z$ , при  $m=M$ , уравнение Менделеева-Клапейрона (1) примет следующий вид:

$$pV = ZRT. \quad (2)$$

В конечном состоянии, то есть после накачки газа, при  $m \neq M$  уравнение (1) преобразуется к виду:

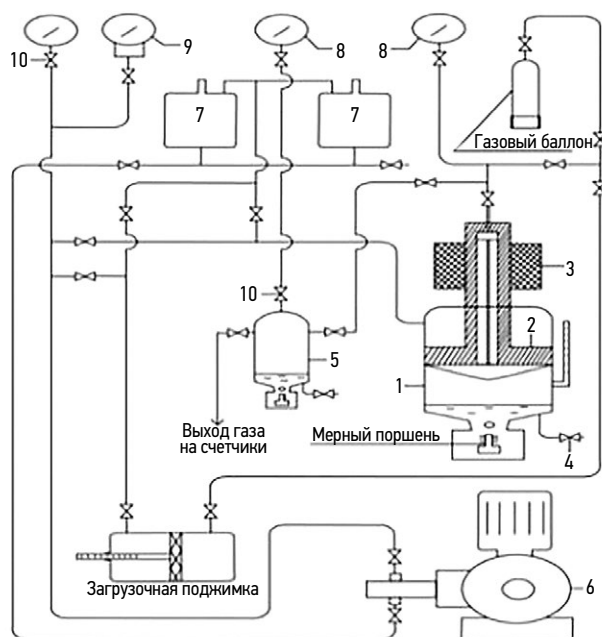
$$p_1V_1 = Z_1 \frac{m_1RT_1}{M}. \quad (3)$$

Для примера, приведем формулу вычисления молярной массы  $M_{\text{общ}}$  смеси двух газов:

$$M_{\text{общ}} = \frac{m_{\text{CO}_2} + m_{\text{CH}_4}}{\frac{m_{\text{CO}_2}}{M_{\text{CO}_2}} + \frac{m_{\text{CH}_4}}{M_{\text{CH}_4}}}. \quad (4)$$

Для смеси газов уравнение Клапейрона-Менделеева (1) записывается в форме:

$$p_1V_1 = Z_1 \frac{m_1RT_1}{M_{\text{общ}}}. \quad (5)$$



**Рис. 1.** Схема установки УГК-3 для исследования коэффициента сжимаемости биогазового топлива: 1 – бомба равновесия; 2 – разделительный поршень; 3 – магнитная катушка; 4 – вентиль загрузки углекислого газа; 5 – термостатируемый сепаратор; 6 – плунжерный насос; 7 – бочки для жидкости; 8 – манометры пружинные; 9 – манометр ЭКМ; 10 – вентили запорные.

**Fig. 1.** Scheme of the UGK-3 test facility for biogas fuel compression ratio study: 1 – a balance bomb; 2 – a separator piston; 3 – a magnetic coil; 4 – a carbon dioxide inflow valve; 5 – a temperature-controlled separator; 6 – a plunge-type pump; 7 – barrels for liquid; 8 – spring pressure gauges; 9 – an electric contact pressure gauge; 10 – cutoff valves.

С целью получения формулы коэффициента сжимаемости биогазового топлива для разных составов преобразуем уравнение (5):

$$\begin{aligned} Z &= \frac{P_1 \cdot V_1}{P_0 \cdot V_0} = \frac{\frac{m_1 \cdot R \cdot T_1}{M_1}}{\frac{m_0 \cdot R \cdot T_0}{M_0}} = \frac{m_1 \cdot T_1 \cdot M_0}{M_1 \cdot m_0 \cdot T_0} = \\ &= \frac{\rho_1 \cdot V_1 \cdot T_1 \cdot M_0}{M_1 \cdot \rho_0 \cdot V_0 \cdot T_0} = \frac{\rho_1 \cdot T_1 \cdot V_1}{\rho_0 \cdot V_0 \cdot T_0} \end{aligned} \quad (6)$$

Решим уравнение (6) через плотности и объемы газа. Тогда в окончательном виде последняя формула будет выглядеть следующим образом:

$$Z_1 = \frac{\rho_1 \cdot T_1 \cdot V_1}{m_0 \cdot T_0} \quad (7)$$

На данный момент, плотность биогазового топлива для разных составов (метана и углекислого газа)

не вычислена, поэтому имеется необходимость экспериментального ее определения. С этой целью был проведен ряд экспериментов с биогазом с разным процентным содержанием метана и углекислого газа. Результаты приведены в таблице 1.

Далее, методом линейной аппроксимации экспериментальных данных были получены коэффициенты уравнения регрессии [4], имеющего вид:

$$y = ax + b \quad (8)$$

Для исследуемого случая получено следующее эмпирическое уравнение:

$$\rho_6 = 0,449 \cdot m - 0,009, \quad (9)$$

где  $\rho_6$  – плотность биогазового топлива,  $\text{кг/м}^3$ ,  $m$  – масса биогазового топлива,  $\text{кг}$ .

Уравнение (9) позволяет вычислить теоретически плотность биогазового топлива для разных составов.

Согласно полученному уравнению (9), график линейной аппроксимации плотности биогазового топлива

Таблица 1. Экспериментальные результаты по определению плотности биогазового топлива

Table 1. Experimental results of biogas fuel density determination

Процентное соотношение метана, %	55	60	65	70	75	80	85	90
Процентное соотношение углекислого газа, %	45	40	35	30	25	20	15	10
Плотность биогаза, $\text{кг/м}^3$	1,28	1,20	1,15	1,09	1,03	0,96	0,90	0,83
Масса биогаза, кг	2,86	2,72	2,58	2,44	2,30	2,16	2,02	1,88

Таблица 2. Теоретические значения коэффициентов сжимаемости для разных составов биогазового топлива

Table 2. Theoretical values of compression ratio for different compositions of biogas fuel

Давление, МПа	Коэффициент сжимаемости для разного состава биогазового топлива							
	55	60	65	70	75	80	85	90
20	1,073	1,069	1,072	1,073	1,073	1,068	1,071	1,068

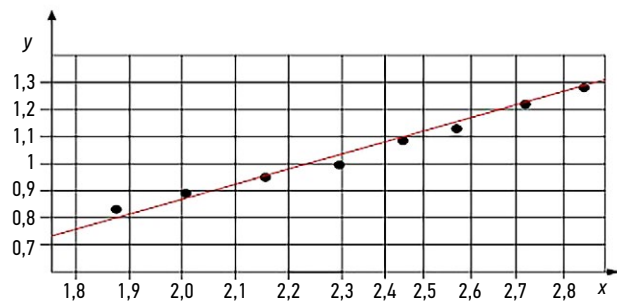


Рис. 2. График зависимости экспериментальных и теоретических результатов.

Fig. 2. Dependency graph of experimental and theoretical results.

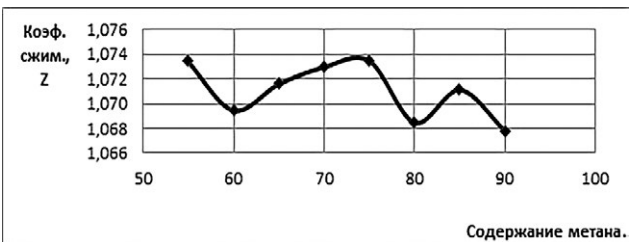


Рис. 3. Теоретическая зависимость коэффициента сжимаемости биогазового топлива.

Fig. 3. Theoretical dependence of biogas fuel compression ratio.

в сравнении с данными эксперимента выглядит следующим образом (рис. 2):

Получив теоретические и экспериментальные значения плотности биогазового топлива для разных составов, перейдем к вычислению коэффициента сжимаемости биогаза, используя формулу (7).

Результаты теоретических расчетов коэффициента сжимаемости для разных составов биогазового топлива приведены в таблице 2.

По полученным теоретическим данным, зависимость коэффициента сжимаемости для разных составов биогазового топлива имеет следующий вид (рис. 3).

Согласно ГОСТ 30319.2-96 «Газ природный. Методы расчета физических свойств. Определение коэффициента сжимаемости», рекомендованный предел коэффициента сжимаемости метана равен 0,9844 при температуре 293 К и давлении до 25 МПа [5].

## ВЫВОДЫ

По результатам исследований установили, что, в выше приведенных условиях, критический коэффициент сжатия биогазового топлива будет равен 1,073 при соотношении метана к углекислому газу 55:45.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Лапшин В.И., Круглов Ю.Ю., Желтов А.П. Экспериментальное определение коэффициента сверхсжимаемости газовых смесей с высоким содержанием  $H_2S$ ,  $CO_2$  // Экспресс-информ. Сер. Разработка и эксплуатация газовых и газоконденсатных месторождений. 1988. № 1. С. 32–33.
2. Лапшин В.И., Волков А.Н., Шафиев И.М. Установки для термодинамических исследований пластовых нефтегазоконденсатных систем месторождений ОАО «Газпром» // Вести газовой науки. 2011. С. 92–102.
3. Мануйлов А.В., Родионов В.И. Химия, 8 и 11 классы. Три уровня обучения. Новосибирск: НГУ, 1998.
4. Саушев А.В. Методы линейной аппроксимации граничных точек областей работоспособности технических систем //

## REFERENCES

1. Lapshin VI, Kruglov YuYu, Zheltov AP. Experimental determination of the supercompressibility coefficient of gas mixtures with a high content of  $H_2S$ ,  $CO_2$ . *Ekspress-inform. Ser. Razrabotka i ekspluatatsiya gazovykh i gazokondensatnykh mesto-rozhdeniy*. 1988;1:32–33. (in Russ).
2. Lapshin VI, Volkov AN, Shafiev IM. Installations for thermodynamic studies of reservoir oil and gas condensate systems of OAO Gazprom fields. *Vesti gazovoy nauki*. 2011:92–102. (in Russ).
3. Manuilov AV, Rodionov VI. *Chemistry, 8th and 11th grades. Three levels of study*. Novosibirsk: NGU; 1998. (in Russ).

1 м<sup>3</sup> биогазового топлива, сжатый до 20 МПа при температуре 0 °С, занимает объем 2,95 дм<sup>3</sup>. Тогда, при 0 °С в пятидесятилитровых баллонах высокого давления можно хранить 9 м<sup>3</sup> биогазового топлива.

Исходя из вышесказанного, для заправки биогазовым топливом сельскохозяйственной техники полностью подходит компрессор Coltri MCH-10 [6].

## ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

**Конфликт интересов.** Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

**Источник финансирования.** Автор заявляет об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

## ADDITIONAL INFORMATION

**Competing interests.** The authors declares no any transparent and potential conflict of interests in relation to this article publication.

**Funding source.** This study was not supported by any external sources of funding.

Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2013. № 3(19). С. 41–51.

5. ГОСТ 30319.2-96. Газ природный. Методы расчета физических свойств. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/1200002059> Дата обращения: 10.07.2022.

6. Компрессор Coltri MCH-10. Оборудование для заправки метаном. [internet] Режим доступа: [https://ecofuel.su/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&category\\_id=38&product\\_id=490&option=com\\_virtuemart&Itemid=141](https://ecofuel.su/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&category_id=38&product_id=490&option=com_virtuemart&Itemid=141) Дата обращения: 10.07.2022.

4. Saushev AV. Methods for linear approximation of the boundary points of the areas of operability of technical systems. *Vestnik gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota im. admirala SO Makarova*. 2013;3(19):41–51. (in Russ).

5. GOST 30319.2-96. Gaz prirodnny. Metody rascheta fizicheskikh svoystv. Available from: <https://docs.cntd.ru/document/1200002059> Accessed: 10.07.2022. (in Russ).

6. Compressor Coltri MCH-10. Methane filling equipment [internet]. Available from: [https://ecofuel.su/index.php?page=shop.product\\_details&flypage=flypage.tpl&category\\_id=38&product\\_id=490&option=com\\_virtuemart&Itemid=141](https://ecofuel.su/index.php?page=shop.product_details&flypage=flypage.tpl&category_id=38&product_id=490&option=com_virtuemart&Itemid=141) Accessed: 10.07.2022.

## ОБ АВТОРЕ

**Петров Николай Вадимович,**

к.т.н., доцент кафедры «Эксплуатация автомобильного транспорта и автосервис» автодорожного факультета;

адрес: Россия, 677000, Якутск, ул. Белинского, д. 58;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-7828>;

eLibrary SPIN: 7971-2057;

e-mail: [petnikvad1988@mail.ru](mailto:petnikvad1988@mail.ru)

## AUTHOR'S INFO

**Nikolay V. Petrov,**

Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Operation of Road Transport and Vehicle Maintenance Department of the Road Faculty;

address: 58 Belinsky street, 677027 Yakutsk, Russia;

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8927-7828>;

eLibrary SPIN: 7971-2057;

e-mail: [petnikvad1988@mail.ru](mailto:petnikvad1988@mail.ru)