

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ
УДК 656.2:665.73:621.43:504
DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-10>

Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 4 (101). С. 112–116

Энергетическое влияние степени гидратации этанола и коэффициента избыточного воздуха (α) на использование смесей этанол-бензина в двигателях с искровым зажиганием



Яриан РЕЙЕС СУАРЕС



Валентин БАЛАБИН

Яриан Рейес Суарес¹,
Валентин Николаевич Балабин²

¹ Гаванский аграрный университет, Майябеке, Куба.

² Российский университет транспорта, Москва, Россия.

✉ ¹ yarianrs@gmail.com.

✉ ² vbbn2347@gmail.com.

АННОТАЦИЯ

Цель этого исследования – энергетически оценить влияние степени гидратации и типа смеси (богатой смеси $\alpha = 0,85$ и бедной смеси $\alpha = 0,15$) на использование смесей этанола и бензина в двигателях с искровым зажиганием. Эксперименты проводились в Лаборатории двигателей Факультета технических наук Гаванского аграрного университета (УНАХ). Используемый двигатель модели JASTO имеет эффективную мощность 1,2 кВт. Частота вращения – 580 об./мин, объём камеры сгорания – 34 см³. Перед сжиганием определяли степень гидратации этанола (80 %; 85 %; 90 %; 95 %). С учётом влияния процента чистоты этанола и коэффициента избыточного воздуха (α) при использовании горючих смесей были проведены анализы следующих параметров: соотношение воздух-топливо ($s_{\text{в/т}}$) и соотношение топливо-воздух ($s_{\text{т/в}}$); внутренняя энергия продуктов сгорания ($U_{\text{в}}$); количество молей исходных веществ в смеси для бензиновых двига-

телей (M_1) и количество молей продуктов при сгорании (M_2).

На основе выполненных экспериментальных работ и энергетического анализа процесса сгорания показано, что в смеси бензина E-10-ЕН-80 % содержалось большее соотношение воздуха и топлива, чем необходимо для достижения сгорания. Это соотношение достигает 11,781 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 0,85$ и 15,309 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 1,15$. Это связано с тем, что компоненты с повышенным содержанием влаги обедняют смесь и гарантируют лучшее сгорание. При этом богатые смеси ($\alpha = 0,85$) оказались наиболее энергоэффективны по причине увеличения октанового числа и соответственно улучшения антидетонационных способностей используемой топливной смеси. Однако, с другой стороны, возможно снижение энергетической эффективности при появлении детонационных процессов.

Ключевые слова: транспорт, углеводород, топливо, бензин, смесь, этанол, энергия, двигатель, воздух, газ, гидратация, сгорание, экология.

Для цитирования: Рейес Суарес Я., Балабин В. Н. Энергетическое влияние степени гидратации этанола и коэффициента избыточного воздуха (α) на использование смесей этанол-бензина в двигателях с искровым зажиганием // Мир транспорта. 2022. Т. 20. № 4 (101). С. 112–116. DOI: <https://doi.org/10.30932/1992-3252-2022-20-4-10>.

Полный текст статьи, изначально представленный на английском языке, публикуется во второй части данного выпуска.
The full text of the article originally written in English is published in the second part of the issue.

ВВЕДЕНИЕ

Об угрозе истощения ископаемых углеводородов уже более четырёх десятилетий предупреждают учёные и различные мировые организации. Они утверждают, что «нефтяной пик» является неизбежной реальностью, и прогнозируют его на разные даты. Но важно то, что никто не сомневается, что это произойдёт и приведёт к серьёзным последствиям для мировой экономики [1].

Постепенное истощение запасов ископаемого топлива, неопределённость цен на него, а также ухудшение состояния окружающей среды заставляет человечество серьёзно задуматься над энергетической проблемой и искать альтернативные источники. По этой причине в настоящее время наблюдается общая тенденция к поиску и использованию возобновляемых источников энергии [2].

Однако такие источники энергии – не единственные среди прочих доступных источников. В настоящее время многие промышленные предприятия генерируют большое количество отходов, которые содержат ощутимый потенциал для энергетического использования. С помощью физических или химических процессов эти отходы могут использоваться для получения энергии, что позволяет экономить не только первичные ресурсы, но и эффективно решать проблемы управления отходами [3].

Учитывая угрозу, которую представляют истощение углеводородов и изменение климата, на глобальном уровне были разработаны стандарты и методы, позволившие эффективно решать возникающие проблемы. Некоторые современные технологические разработки указывают на тенденцию к сокращению потребления ископаемых углеводородов, постепенному переходу к использованию альтернативных видов топлива, таких как, например, биотопливо [4].

Переход на смешанное топливо позволяет улучшить тяговые свойства транспорта, повысить производительность, снизить расход топлива и уменьшить количество вредных выбросов [5–9]. При этом богатые смеси ($\alpha = 0,85$) оказались наиболее энергоэффективны по причине увеличения октанового числа и соответственно улучшения антидетонационных способностей используемой топливной смеси. Однако, с другой стороны, возможно снижение энергетической эффективности

при появлении детонационных процессов [10].

С учётом вышеизложенного в работе приведены результаты термодинамических исследований использования смесей бензина и 10 % этанола в двигателях с искровым зажиганием.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Теоретические основы процесса сгорания

Для анализа теоретических основ процесса сгорания было рассмотрено несколько работ на эту тему [11, с. 8–69; 12, с. 8–20; 13, с. 13–42; 14, с. 43–58; 15], в которых установлено:

1. Теоретическое количество воздуха, необходимое для окисления топлива (L_0), определяется из выражения:

$$L_0 = \frac{1}{0,21} \left(\frac{C}{12} + \frac{H}{4} + \frac{O_0}{32} \right). \quad (1)$$

При этом средняя доля содержания химических элементов в составе может составлять для бензинов: углерод – $C = 0,85$; водород – $H = 0,15$; кислород – $O_0 = 0$.

2. Молярная масса смеси для бензиновых двигателей (M_1):

$$M_1 = \alpha \cdot L_0 + \frac{1}{\mu_c}, \quad (2)$$

где μ_c – молекулярная масса топлива, для бензинов $\mu_c = 110 \dots 120$ кг/кмоль;

a – коэффициент избытка воздуха.

3. Количество молей продуктов при сгорании (M_2):

$$\text{Если } \alpha < 1 \quad M_2 = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79 \cdot \alpha \cdot L_0. \quad (3)$$

$$\text{Если } \alpha \geq 1 \quad M_2 = (M_2)_{\alpha=1} \alpha = 1 + j, \quad (4)$$

$$\text{где } (M_2)_{\alpha=1} = \frac{C}{12} + \frac{H}{2} + 0,79 \cdot L_0. \quad (5)$$

4. Необходимое количество воздуха (J) определяется из выражения:

$$J = (\alpha - 1) \cdot L_0 \quad (6)$$

5. Теоретический коэффициент молекулярной вариации определяется из:

$$\mu_0 = M_2 / M_1. \quad (7)$$

6. Фактический коэффициент молекулярной вариации (β) определяется из:

$$\beta = \frac{M_2 + M_r}{M_1 + M_r} = \frac{M_2 + M_1 \cdot \sigma_r}{M_1 + (1 + \sigma_r)} = \frac{\mu_0 + \sigma_r}{1 + \sigma_r}. \quad (8)$$

Значение β колеблется для бензиновых двигателей в пределах – $\beta = 1,02 \dots 1,12$, для дизельных двигателей – $\beta = 1,01 \dots 1,06$.

Нижняя теплота сгорания (H_u) топлива составляет для бензиновых двигателей – $H_u = 44000$ кДж/кг; для дизельных – $H_u =$



Соотношения «воздух–топливо» ($c_{в/т}$) и «топливо–воздух» ($c_{т/в}$)
[выполнено авторами]

| Смеси | $\alpha = 0,85$ | | $\alpha = 1,15$ | |
|--------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | $c_{в/т}$ кг воздух/кг топливо | $c_{т/в}$ кг топливо/кг воздух | $c_{в/т}$ кг воздух/кг топливо | $c_{т/в}$ кг топливо/кг воздух |
| E-10-EH-95 % | 11,303 | 0,088 | 15,293 | 0,063 |
| E-10-EH-90 % | 11,31 | 0,088 | 15,303 | 0,065 |
| E-10-EH-85 % | 11,311 | 0,088 | 15,304 | 0,065 |
| E-10-EH-80 % | 11,781 | 0,085 | 15,309 | 0,065 |



42500 кДж/кг; а для газохолола (Flex fuel) – $H_u = 26279$ кДж/кг.

7. Внутренняя энергия продуктов сгорания (U_z) определяется из выражения:

$$U_z = \frac{1}{\beta} \left[\xi \frac{(H_u - \Delta H_u)}{M_1(1 + \sigma_r)} + \frac{[U_c - \sigma_r \cdot U_c^-]}{1 + \sigma_r} \right], \quad (9)$$

где σ_r – коэффициент отработанных газов. Для бензиновых двигателей $\sigma_r = 0,06 \dots 0,12$; для дизельных двигателей $\sigma_r = 0,02 \dots 0,06$;

ξ – коэффициент использования тепла.

В номинальном режиме он составляет: для бензиновых двигателей $\xi = 0,85 \dots 0,95$; для дизельных двигателей $\xi = 0,65 \dots 0,85$;

U_c – внутренняя энергия газов (может быть взята из воздуха) для температуры в конце сжатия в градусах Цельсия ($^{\circ}\text{C}$);

U_c^- – внутренняя энергия продуктов сгорания для критической температуры продуктов (t_c).

2. Гидратация этанола

Шаги, которые следует учитывать для получения различных степеней гидратации этанола:

- измерение с помощью алкотестера степени гидратации этанола для эксперимента;

- увеличение степени гидратации этанола до желаемых значений путём добавления дистиллированной воды (H_2O) без примесей.

РЕЗУЛЬТАТЫ

1. Экспериментальные исследования

Эксперименты проводились в Лаборатории двигателей Факультета технических наук Гаванского аграрного университета (УНАХ). Использовался одноцилиндровый двигатель модели JASTO. Анализ процесса сгорания на основе смесей 10 % этанола и обычного бензина категории В-85 (Е-10). Перед сжиганием определяли степень гидратации этанола (80 %; 85 %; 90 %; 95 %) и тип смешивания (богатая смесь $\alpha = 0,85$ и бедная смесь $\alpha = 0,15$). Используемый двигатель имеет эффективную мощность 1,2 кВт. Частота вращения – 580 мин^{-1} , объём камеры сгорания – 34 см^3 .

Изначальный процент чистоты этанола (EH), используемого в экспериментах, составлял 97 %. Из него получали этанол 95 %, 90 %, 85 % и 80 %. С этими процентами чистоты выполнялись запланированные исследования эксперименты по сжиганию смеси.

**Внутренняя энергия продуктов сгорания (U_z).
Количество молей исходных веществ в смеси для бензиновых двигателей (M_1)
и количество молей продуктов сгорания (M_2) при $\alpha = 0,85$ и в $\alpha = 1,15$
[выполнено авторами]**

| Смеси | $\alpha = 0,85$ | | | | |
|-----------------|------------------|------------------|-------|---------|-------------------|
| | M_1 , кг/кмоль | M_2 , кг/кмоль | m_0 | β | U_z , кДж/кмоль |
| E-10-ЕН-95 % | 28,632 | 26,113 | 0,912 | 0,616 | 27749,510 |
| E-10-ЕН-90 % | 28,432 | 25,873 | 0,91 | 0,614 | 28202,971 |
| E-10-ЕН-85 % | 28,230 | 25,661 | 0,909 | 0,612 | 28664,544 |
| E-10-ЕН-80 % | 28,027 | 25,420 | 0,907 | 0,609 | 29134,443 |
| $\alpha = 1,15$ | | | | | |
| E-10-ЕН-95 % | 21,474 | 19,606 | 0,913 | 0,633 | 26852,127 |
| E-10-ЕН-90 % | 21,242 | 19,288 | 0,908 | 0,631 | 27294,547 |
| E-10-ЕН-85 % | 21,009 | 19,013 | 0,905 | 0,629 | 27744,519 |
| E-10-ЕН-80 % | 20,773 | 18,779 | 0,904 | 0,627 | 28202,227 |

2. Термодинамический анализ результатов экспериментальных исследований процесса сгорания

Принимая во внимание материалы и методы, изложенные выше, влияние процента чистоты этанола и коэффициент избыточного воздуха, при использовании горючих смесей проводился анализ следующих параметров: соотношение «воздух–топливо» ($c_{в/т}$) и соотношение «топливо–воздух» ($c_{т/в}$); внутренняя энергия продуктов сгорания (U_z); количество молей веществ в исходной смеси для бензиновых двигателей (M_1) и количество молей продуктов сгорания (M_2).

В случае соотношения «воздух–топливо» ($c_{в/т}$) и «топливо–воздух» ($c_{т/в}$) соответствующие коэффициенты представляют собой отношение массы топлива или воздуха, которые присутствуют в смеси, к массе воздуха или топлива во время сгорания. Большое количество воздуха с небольшим количеством топлива становятся причиной быстрого сгорания при высокой температуре, в то время как, наоборот, при большом количестве топлива смесь сгорает медленно и при более низких температурах. Соотношение «воздух–топливо» менее 14,7 означает богатую смесь, а соотношение более 14,7 – обеднённую смесь. Коэффициент избытка воздуха определён равным $\alpha = 0,85$ и $\alpha = 1,15$, соответственно, для смеси 10 % этанола с процентом чистоты 95 % и бензина (E-10-ЕН-95 %), 10 % этанола с процентом чистоты 90 % и бензина (E-10-ЕН-90 %), 10 % этанола с процентом-

чистоты 85 % и бензина (E-10-ЕН-85 %), 10 % этанола с процентом чистоты 80 % и бензина (E-10-ЕН-80 %) (табл. 1).

В соответствии с данными табл. 1, в указанной выше смеси E-10-ЕН-80 % соотношение воздуха и топлива больше необходимого для воспламенения смеси, оно достигает 11,781 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 0,85$ и 15,309 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 1,15$. Это происходит потому, что смесь содержит больше влаги и из-за того, что в её составе присутствует больше атомов кислорода. Это то, что обедняет смесь и обеспечивает лучшее качество сгорания. В то время при $\alpha = 0,85$ соотношение топливо/воздух больше, чем для $\alpha = 0,15$, так как масса воздуха уменьшается.

В свою очередь, по формуле (9) определяли внутреннюю энергию продуктов сгорания для каждой из проанализированных смесей, представленных в табл. 2.

Анализ показал, что при использовании смеси E-10-ЕН-80 % как в обогащённых, так и в обеднённых смесях, получается больше внутренней энергии, чем при других условиях. Значение достигает 29134,443 кДж/кмоль для богатых смесей и 28202,227 кДж/кмоль для бедных смесей, что приводит к максимальной разнице с другими богатыми смесями (в 1384,934 кДж/кмоль относительно смеси E-10-ЕН-95 %) и бедными смесями (в 1350,1 кДж/кмоль относительно смеси E-10-ЕН-95 %). Увеличение энергии может быть обусловлено увеличением содержания





водорода и кислорода в смеси за счёт добавления к этанолу воды.

Более высокую внутреннюю энергию дают богатые смеси.

Подводя итог, можно сказать, что наибольшее значение внутренней энергии продукты сгорания достигают при использовании смеси Е-10-ЕН-80 % для богатых смесей ($\alpha = 0,85$). Это обусловлено повышением октанового числа используемой топливной смеси, что в целом улучшает качество сгорания. Следует отметить, что это не означает, что по мере увеличения гидратации этанола увеличивается внутренняя энергия.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для смеси Е-10-ЕН-80 % характерно большее соотношение воздуха и топлива для достижения сгорания, которое достигает 11,781 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 0,85$ и 15,309 кг (воздуха)/кг (топлива) для $\alpha = 1,15$. Смесь с повышенным увлажнением гарантирует лучшее качество сгорания.

2. В богатых смесях ($\alpha = 0,85$) соотношение топливо/воздух больше, чем в бедных смесях ($\alpha = 0,15$), потому что количество подаваемого воздуха уменьшается.

3. Смесь Е-10-ЕН-80 % для богатых смесей ($\alpha = 0,85$) оказалась наиболее энергоэффективной, что связано с увеличением октанового числа и повышением антидетонационной способности при общем улучшении качества сгорания.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Domínguez, F. S. La agroindustria bioenergética de la caña de azúcar: retos y perspectivas. In: La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes. Editor Mario González-Corzo, 2015, pp. 35–59. [Электронный ресурс]: <https://cubaproject.org/wp-content/uploads/2014/07/SugarEbook.pdf>. Доступ 31.08.2022.
2. Reyes Suárez, Y., Arteaga Barrueta, M., Morejón Mesa, Y., Fuentes Sánchez, A. Valuation of the energy potential of the agroindustrial residuals of tomato for their employment as biofuel. Revista Ingeniería Agrícola, 2020, Vol. 10, No. 2. [Электронный ресурс]: <https://www.redalyc.org/journal/5862/586263256006/>. Доступ 31.08.2022.
3. Baño, A., Darío, A., Quito, P., Gonzalo, H. Obtención de la mezcla combustible diésel con aceites lubricantes reciclados del automóvil en concentraciones de 5 %, 10 %, 15 %, 20 % y 30 % y determinación de los parámetros característicos del motor. Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE Extensión Latacunga. Carrera de IngenieríaAutomotriz,

2016. [Электронный ресурс]: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/11809>. Доступ 31.08.2022.

4. Aguilar-Rivera, N. Bioetanol de la caña de azúcar. Avances en Investigación Agropecuaria, 2007, Vol. 11, No. 3, pp. 25–39. [Электронный ресурс]: <https://www.redalyc.org/pdf/837/83711303.pdf>. Доступ 31.08.2022.

5. Носырев Д. Я., Курманова Л. С., Петухов С. А., Муратов А. В., Ерзамаев М. П. Экологическая эффективность применения альтернативных видов топлива в энергетических установках железнодорожного транспорта // Экология и промышленность России. – 2019. – Т. 23. – № 2. – С. 19–23. DOI: <https://doi.org/10.18412/1816-0395-2019-2-19-23> [платный доступ].

6. Коссов Е. Е., Сухопаров С. И. Оптимизация режимов работы тепловых дизель-генераторов // Труды ВНИИЖТ. – М.: Интекст, 1999. – 183 с. ISBN 5-89277-010-9.

7. Марков В. А., Козлов С. И. Топливоподача много-топливных и газодизельных двигателей. – М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2000. – 296 с. ISBN 5-7038-1565-7.

8. Фофанов Г. А. Природный газ – моторное топливо для тепловозов // Журнал «Железные дороги мира (ЖДМ)». – 2006. – № 7. – С. 43–48. [Электронный ресурс]: https://zdmira.com/images/pdf/_dm2006-07_43-48.pdf. Доступ 31.08.2022.

9. Носырев Д. Я., Росляков А. Д., Муратов А. В. Перспективы и проблемы применения альтернативных видов топлива в локомотивных энергетических установках: Монография. – Самара: СамГУПС, 2009. – 117 с. ISBN 978-5-98941-110-8.

10. Reyes Suárez, Y., Morejón Mesa, Y., Hernández Herranz, A. Thermodynamic Evaluation of Using Ethanol-Gasoline Blends in Spark Ignition Engine. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias, 2020, Vol. 29, No. 2. [Электронный ресурс]: <https://www.redalyc.org/journal/932/93264060003/>. Доступ 31.08.2022.

11. Богданов С. Н., Буренков М. М., Иванов И. Е. Автомобильные двигатели: «Раздел I. Основы технической термодинамики и теплопередачи». – М.: Машиностроение, 1987. – 367 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/JxMwJZBbNBIEQ>. Доступ 31.08.2022.

12. Анохин В. И., Сахаров А. Г. Пособие тракториста: Раздел второй «Тракторные двигатели». – 2-е изд. перераб. – М.: Колос, 1969. – 424 с. [Электронный ресурс]: <https://fr-lib.ru/books/professii/posobie-tractorkista-download182810>. Доступ 31.08.2022.

13. Гуревич А. М., Сорокин Е. М. Тракторы и автомобили: «Раздел второй. Основы теории тракторных и автомобильных двигателей внутреннего сгорания». – 4-е изд. перераб. и дополн. – М.: Колос, 1978. – 480 с. [Электронный ресурс]: <https://djvu.online/file/IFM9cZ1fzYDZ>. Доступ 31.08.2022.

14. Холдерман Дж. Д., Митчелл, мл. Ч. Д. Автомобильные двигатели: теория и техническое обслуживание: Глава 2. Принцип работы и типы двигателей / Пер. с англ. и ред. С. А. Добродеева. – 4-е изд. – М.: Вильямс, 2006. – 664 с. ISBN 5-8459-0954-6.

15. Круглов С. М. Устройство, техническое обслуживание и ремонт легковых автомобилей. – М.: Высшая школа, 1987. – 336 с. [Электронный ресурс]: <https://fr-lib.ru/books/raznoe/kruglov-s-m-ustroystvo-tehnicheskoe-obsluzhivanie-i-remont-legkovykh-avtomobilei-download602479>. Доступ 31.08.2022.

Информация об авторах:

Рейес Суарес Яриан – аспирант РУТ, профессор Гаванского аграрного университета, Майябеке, Куба, varians@gmail.com.
Балабин Валентин Николаевич – доктор технических наук, профессор Российского университета транспорта, Москва, Россия, vbbn2347@gmail.com.

Статья поступила в редакцию 16.06.2022, одобрена после рецензирования 27.06.2022, принята к публикации 13.07.2022.