

УДК 621.433

**Оценка энергоэффективности двигателей внутреннего сгорания при
использовании природного газа в качестве топлива**

**д.т.н. А.В. Козлов, к.т.н. А.С. Теренченко, Е.А. Миренкова, А.Г. Ветош-
ников**

Федеральное государственное унитарное предприятие "Центральный ордена Трудового Красного Знамени научно-исследовательский автомобильный и автомоторный институт "НАМИ" (ФГУП «НАМИ»)

**Assessment of energy efficiency of the internal combustion engines using
natural gas as a fuel**

A.V. Kozlov, A. S. Terenchenko, E.A. Mirenkova, A.G. Vetoshnikov

*Federal State Unitary Enterprise Central Scientific Research Automobile and Automotive Institute "NAMI"
(FSUE «NAMI»)*

В статье приведены результаты исследования рабочего процесса газовых двигателей, работающих на бедных топливно-воздушных смесях по газодизельному циклу с количественно-качественным регулированием мощности. Показаны пути достижения наилучших показателей по топливной экономичности. Проведена оценка экономической эффективности газодизеля по сравнению с дизелем и газовым двигателем, работающим по циклу Отто, рассчитаны затраты за жизненный цикл и экономический эффект от использования газового топлива.

Ключевые слова: газодизель, дизель, альтернативные топлива, рабочий процесс, компримированный природный газ, экономическая оценка, полный жизненный цикл

The article provides the results of the research of the working process of gas engines running on lean fuel-air mixtures on a dual-fuel cycle with combined quantity and air/fuel ratio torque control. The ways of the achievement of the maximum fuel efficiency were shown. The estimation of economic efficiency of the dual-fuel engine has compared to the diesel and Otto gas engine and calculated costs for the total life cycle and the economic effect of the use of gas fuel.

Keywords: dual-fuel gas engines, diesel, alternative fuels, working process, compressed natural gas, economic evaluation, life cycle analysis

В настоящее время проблемы истощения природных ресурсов, уменьшения негативного воздействия на окружающую среду от выбросов загрязняющих веществ и парниковых газов, а также эффективного использования топливно-энергетических ресурсов являются наиболее актуальными во всем мире. В этой связи актуальной становится задача поиска альтернативы нефтяным топливам.

Природный газ (ПГ) является наиболее перспективным и доступным альтернативным топливом для автотранспорта с точки зрения создания альтернативы жидким топливам нефтяного происхождения, причем на единицу полученной тепловой энергии при сжигании ПГ выделяется на 23% меньше CO_2 , чем при сжигании дизельного топлива (ДТ) [1].

Существует два основных способа конвертирования дизельных двигателей для работы на газовом топливе. Первый способ – создание на базе дизельного двигателя однопаливных газовых двигателей, работающих только на газообразном топливе. И второй способ – конвертировать серийные дизельные двигатели путем оснащения их дополнительной газовой системой питания для работы на двух топливах одновременно с сохранением возможности работать на одном дизельном топливе [2].

Государственный научный центр Российской Федерации «НАМИ» имеет большой опыт создания дизельных двигателей, работающих на природном газе в газодизельном цикле [3]. Опыт эксплуатации таких двигателей показал, что дальнейшее улучшение экономических и особенно экологических показателей газодизельного двигателя может быть достигнуто за счет расширения зоны оптимального регулирования (состав топливно-воздушной смеси, величина запальной дозы, угол опережения впрыска), при-

менения фазированного распределённого впрыска газа и смешанного количественно-качественного регулирования мощности [4,5]. Оптимизация этих параметров является целью исследований, выполненных в данной работе.

Дополнительным стимулом для перевода на газомоторное топливо стала Климатическая доктрина Российской Федерации от 17 декабря 2009 г., в которой говорится, что в связи с хозяйственной деятельностью человека, связанной прежде всего с выбросами парниковых газов в результате сжигания ископаемого топлива, необходимо реализовать меры, обеспечивающие повышение энергетической эффективности во всех секторах экономики и развитие использования возобновляемых и альтернативных источников энергии [6].

Таким образом, учитывая стратегические ориентиры РФ, необходима также оценка энергоэффективности ДВС с точки зрения сокращения выбросов парниковых газов. Потенциал к возникновению парникового эффекта, выражается в эквивалентном выбросе диоксида углерода (CO_2).

Объектом исследования являлся дизельный двигатель ЯМЗ-6566 с аккумуляторной системой питания, обеспечивающий работу по газодизельному циклу с запальной порцией дизельного топлива, оборудованный системой фазированной распределенной подачи природного газа в цилиндры, и специальной системой управления, разработанными во ФГУП «НАМИ». Количественное регулирование подачи воздуха осуществлялось с помощью электронной дроссельной заслонки.

Для сравнения использовались данные испытаний дизельного двигателя, конвертированного для работы на ПГ по циклу Отто путем снижения степени сжатия до 11,5 [7]. Характеристики двигателей представлены в таблице 1.

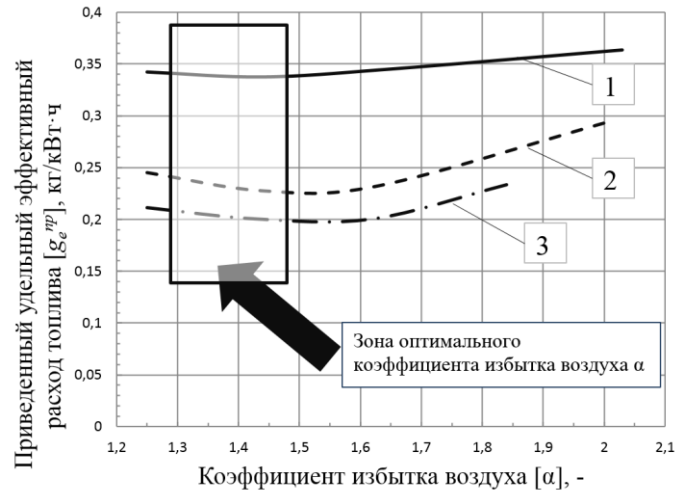
Таблица 1
Объекты исследования

Характеристики	Дизель	Газовый	Газодизель
Рабочий объем двигателя, л	11,15		
Рабочий цикл	Четырехтактный		
Количество и расположение цилиндров двигателя	6, V-образное		
Степень сжатия	17,5	11,5	17,5
Диаметр цилиндра, мм	130,0		
Ход поршня, мм	140,0		
Топливо	ДТ	ПГ	ДТ и ПГ
Максимальная мощность, кВт, не более	200 (при 1900 мин-1)	180 (при 1900 мин-1)	197 (при 1900 мин-1)
Максимальная допустимая частота вращения, мин-1, не более	1900		
Максимальный крутящий момент, Н•м, не более	1170 (при 1100-1500 мин-1)	900 (при 1100-1500 мин-1)	1150 (при 1100-1500 мин-1)

Известно, что основной недостаток в работе газодизеля с качественным регулированием заключается в ухудшении топливной экономичности и увеличении выбросов несгоревших углеводородов (свыше 90% которых составляет метан) и оксида углерода, из-за ухудшения процесса сгорания газа на малых нагрузках [3]. Оптимальное и эффективное горение гомогенной газозвушной смеси достигается в достаточно узком диапазоне значений коэффициента избытка воздуха ($\alpha = 1,05 - 1,4$). Но в двигателях с качественным регулированием мощности на холостом ходу и малых нагрузках коэффициент избытка воздуха может достигать значительно больших величин [8]. Эта особенность рабочего процесса в двигателе с качественным регулированием мощности и приводит к ухудшению показателей газодизельного двигателя. В связи с этим оптимизация рабочего процесса двигателя была направлена на повышение эффективности сгорания именно газозвушного заряда в цилиндре двигателя.

На рисунке 1 показана зависимость приведенного удельного расхода топлива от коэффициента избытка воздуха, где приведенный удельный расход топлива g_e^{np} – это удельный расход топлив ДТ и ПГ, приведенный к теплоте сгорания ДТ.

Установлено, что эффективность работы двигателя в газодизельном цикле с минимальными значениями g_e^{np} достигается при поддержании α в диапазоне 1,35 — 1,5.

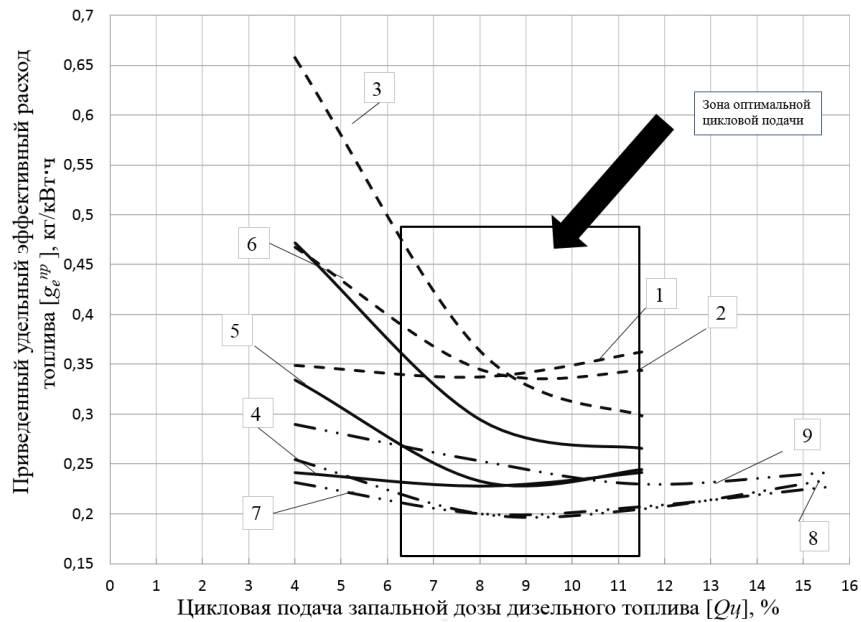


(1 - $M_k=150$ Nm; 2 - $M_k=350$ Nm; 3 - 550 Nm)

Рис.1. Зависимость приведенного удельного расхода топлива от коэффициента избытка воздуха

На рисунке 2 показаны зависимости изменения g_e^{np} от величины цикловой подачи запальной дозы дизельного топлива (Q_u) для различных нагрузок и различных приведенных коэффициентов избытка воздуха. Q_u определялась как доля от максимальной подачи дизельного топлива на данном скоростном режиме ($n=1200$ мин⁻¹).

В результате этих исследований для дальнейших испытаний была принята величина запальной дозы в диапазоне 6-11 мг/цикл (5-10%).



1 - $\alpha=1,4, M_k=150 \text{ Нм}$; 2 - $\alpha=1,65, M_k=150 \text{ Нм}$; 3 - $\alpha=2, M_k=150 \text{ Нм}$; 4 - $\alpha=1,4, M_k=350 \text{ Нм}$; 5 - $\alpha=1,65, M_k=350 \text{ Нм}$; 6 - $\alpha=2, M_k=350 \text{ Нм}$; 7 - $\alpha=1,4, M_k=550 \text{ Нм}$; 8 - $\alpha=1,65, M_k=550 \text{ Нм}$; 9 - $\alpha=2, M_k=550 \text{ Нм}$.

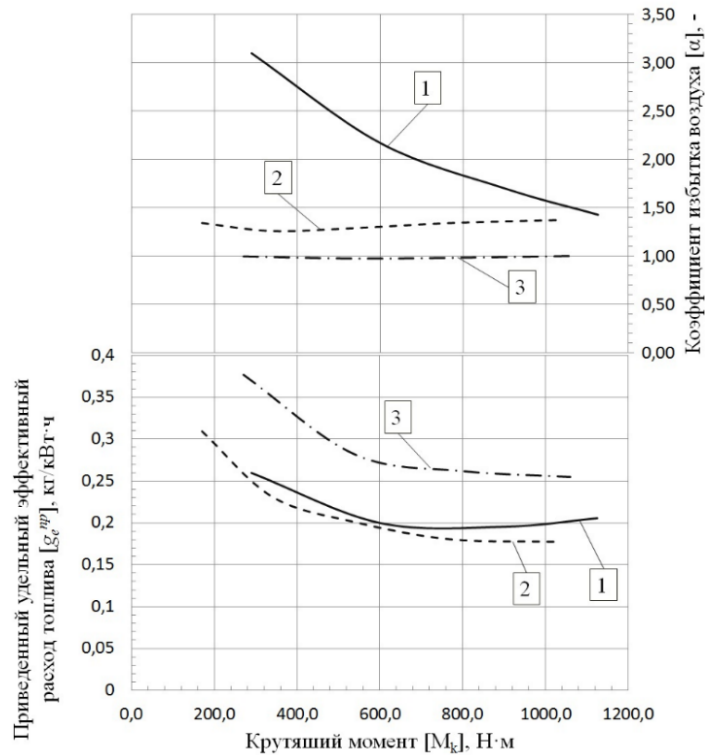
(где α - коэффициент избытка воздуха, M_k - крутящий момент)

Рис. 2. Определение оптимальных значений цикловой подачи запальной дозы дизельного топлива в процентах от максимальной подачи на полной нагрузке

В результате оптимизации этих параметров были выбраны регулировки системы управления и получены нагрузочные характеристики двигателя, работающего по газодизельному циклу со смешанным количественно-качественным регулированием мощности.

В газовом двигателе, работающем по циклу Отто, также были оптимизированы регулировочные характеристики по составу топливно-воздушной смеси. Угол опережения зажигания не менялся и поддерживался в диапазоне $15^\circ\text{-}18^\circ$ ПКВ. В целях ограничения детонационного сгорания была уменьшена базовая степень сжатия до $11,5 - 11,7$ ед. за счет установки дополнительной прокладки между головкой блока цилиндров и блоком цилиндров [7].

На рисунке 3 приведено сравнение приведенного удельного расхода топлива по нагрузочной характеристике для газодизельного, дизельного и газового двигателей на характерном режиме работы (при $n = 1200 \text{ мин}^{-1}$).



($n=1200 \text{ мин}^{-1}$, 1 – Дизель, 2 – Газодизель, 3 – Газовый двигатель)

Рис. 3. Сравнение приведенного удельного расхода топлива по нагрузочной характеристике для газодизельного, дизельного и газового двигателей

Использование оптимальных алгоритмов управления рабочим процессом газодизеля по нагрузочным характеристикам двигателя обеспечивает улучшение топливно-экономических показателей двигателя на 5-10% на отдельных режимах по сравнению с дизелем и примерно на 20% по сравнению с газовым двигателем, работающим по циклу Отто.

Оценка энергоэффективности произведена для трех вариантов силовых установок: дизель, газовый двигатель и газодизель. В расчете в качестве транспортного средства принят грузовой автомобиль полной массой 23300 кг с двигателем ЯМЗ-6566.

Для проведения расчетов была использована разработанная во ФГУП «НАМИ» комплексная методика технико-экономической и экологической оценки перспектив использования альтернативных видов топлива на автомобильном транспорте в полном жизненном цикле от добычи сырья до их использования при эксплуатации автотранспорта и его утилизации [9, 10, 11]. Методика учитывает потребление природных ресурсов, энергии, выбросы вредных веществ и ущерб окружающей среде от их негативного воздействия, а также денежные затраты на осуществление жизненного цикла альтернативных топлив и силовых установок [12].

Результаты расчетов показали, что за полный жизненный цикл выброс парниковых газов от силовой установки, работающей по газодизельному циклу, меньше на 15,8% по сравнению с установкой, работающей на природном газе и на 22,5% - по сравнению с дизелем.

По результатам анализа экономической эффективности трех вариантов двигателей установлено, что в целом за период эксплуатации, при сравнении двигателя, работающего по газодизельному циклу с дизелем, получен положительный эффект в размере 4,9 млн. руб. Схожие результаты получены при сравнении газового двигателя с дизелем - 4,3 млн. руб. При сравнении газодизеля и газового двигателя экономический эффект составил около 550 тыс. руб. Основная доля затрат приходится на стадию эксплуатации – около 90%.

Выводы

В ходе испытаний было установлено, что наилучшая эффективность газодизельного процесса с минимальными значениями удельного эффективного расхода топлива достигается при коэффициенте избытка воздуха равном 1,35 — 1,5 и поддерживается на режимах работы двигателя от 100% до 10% от полной нагрузки. Оптимальная величина запальной дозы дизельного топлива находится в диапазоне 5-10% от номинальной цикловой подачи топлива.

Использование оптимальных алгоритмов управления рабочим процессом газодизеля по нагрузочным характеристикам двигателя обеспечивает улучшение топливно-экономических показателей двигателя на 5-10% на отдельных режимах по сравнению с дизелем и примерно на 20% по сравнению с газовым двигателем, работающим по циклу Отто.

В результате анализа экономической эффективности установлено, что применение природного газа в качестве основного топлива позволяет уменьшить затраты на реализацию полного жизненного цикла почти в 1,6-1,8 раза и основная доля затрат приходится на стадию эксплуатации – около 90%.

Таким образом, полученные результаты позволяют рассматривать двигатель, работающий по газодизельному циклу на природном газе с запальной порцией дизельного топлива, в качестве наиболее перспективного решения в плане улучшения топливной экономичности, снижения выбросов парниковых газов и снижения затрат на реализацию полного жизненного цикла.

Литература

[1] Марков В. А., Гайворонский А. И., Грехов Л. В., Иващенко Н. А. Работа дизелей на нетрадиционных топливах: Учебное пособие. — М.: Изд-во Легион-Автодата, 2008. — 644 с.

[2] Кавтарадзе Р.З. Теплофизические процессы в дизелях, конвертированных на природный газ и водород — М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2011. — 40 с.

[3] Лукшо В.А., Теренченко А.С., Филипосянц Т.Р., Корнилов Г.С., Миронов М.В. Газодизели НАМИ // «Автомобильная промышленность», 2013, № 10, с. 18-20

[4] Wagemakers A.M.L.M., Leermakers C.A.J., “Review on the effects of Dual-Fuel operation, using diesel and gaseous fuels, on emissions and performance”, SAE 2012-01-0869, 2012, doi: 10.4271/2012-01-0869.

[5] Shah A, Thipse S. S., Tyagi A., Rairikar S. D., Kavthekar K. P., Marathe N. V., “Literature Review and Simulation of Dual Fuel Diesel-CNG Engines”, SAE 2011-26-0001, 2011

[6] Климатическая доктрина Российской Федерации от 17 декабря 2009 г.

[7] Лукшо В.А. Комплексный метод повышения энергоэффективности газовых двигателей с высокой степенью сжатия и укороченными тактами впуска и выпуска: Автореф. дис. на соискание уч. степени д-ра техн. наук. - Москва: ФГУП «НАМИ», 2015. - 42 с.

[8] B.V. Sahoo, N. Sahoo, U.K. Saha. Effect of engine parameters and type of gaseous fuel on the performance of dual-fuel gas diesel engines — A critical review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (2009) 1151–1184

[9] Звонов В.А., Козлов А.В., Кутенев В.Ф. Экологическая безопасность автомобилей в полном жизненном цикле. — М.: Изд-во НАМИ, 2001. — 248 с.

[10] Вершков Л.В., Грошев В.Л., Гаврилов В.В. и др. Временная методика определения предотвращенного экологического ущерба / М. – 1999. – 68 с.

[11] Луканин В.Н., Трофименко Ю.В. Промышленно-транспортная экология: Учеб. Для вузов / Под ред. В.Н. Луканина. — М.: Высш. шк., 2001. - 273 с.: ил.

[12] Козлов А.В., Теренченко А.С., Лукшо В.А., Миренкова Е.А. Анализ эколого-экономической эффективности автобусов, работающих на нефтяном и газовом топливах, в полном жизненном цикле — Труды НАМИ. 2014. № 259. С. 38-49.