8. *Пшихопов В.Х., Медведев М.Ю.* Синтез адаптивных систем управления летательными аппаратами // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 187-196.
9. *Медведев М.Ю.* Структура и алгоритмическое обеспечение нелинейного наблюдателя производных в условиях действия случайных шумов // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2008. – № 12 (89). – С. 20-25.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

**Мазалов Андрей Андреевич** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: Anmaz8@list.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634371694; кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

**Mazalov Andrey Andrejevich** – Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education "Southern Federal University"; e-mail: Anmaz8@list.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: 88634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; assistant.

УДК 629.113

**М.А. Береснев**

## ОПТИМИЗАЦИЯ УГЛА ОПЕРЕЖЕНИЯ ЗАЖИГАНИЯ ДЛЯ ДОСТИЖЕНИЯ МАКСИМАЛЬНОГО КРУТЯЩЕГО МОМЕНТА ДВИГАТЕЛЯ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С ПОМОЩЬЮ БИНАРНОГО ТОПЛИВА

*Рассмотрена задача повышения крутящего момента двигателя внутреннего сгорания без сопутствующего увеличения расхода топлива. Предлагается использование бинарного топлива, состоящего из смеси бензина и сжиженного газа, которое за счет высокой детонационной стойкости позволяет реализовать угол опережения зажигания, обеспечивающий максимум давления в цилиндре в целевом диапазоне поворота коленчатого вала. Делается вывод, что помимо увеличения крутящего момента и мощности двигателя, бинарное топливо позволит снизить расходы на топливо и выбросы вредных продуктов сгорания в атмосферу.*

*Двигатель внутреннего сгорания; угол опережения зажигания; бинарное топливо; крутящий момент; мощность.*

**M.A. Beresnev**

## OPTIMIZATION OF SPARK ADVANCE TO REACH THE MAXIMUM INTERNAL COMBUSTION ENGINE TORQUE BY MEANS OF BINARY FUEL

*Author considers a problem of increasing internal combustion engine torque without consequent fuel consumption increase. The proposed solution is includes utilization of binary fuel with high knock rating comparing with gasoline allowing spark advance that provides reach of maximum pressure inside cylinder in necessary crankshaft rotation angle range. It's concluded that aside of torque and power increase, binary fuel helps to decrease POL expenses and emission of harmful combustion products.*

*Internal combustion engine; spark advance; binary fuel; torque; power.*

**Введение.** В развитии двигателей внутреннего сгорания можно выделить несколько основных направлений: улучшение экологических показателей, увеличение экономичности и увеличение эффективности. Вместе с эффективностью растет и литровая мощность, что, с одной стороны, не может не радовать конечных

потребителей. Но, с другой стороны, мощность тесно связана с количеством потребляемого топлива, а также выбросами вредных веществ в атмосферу, и, в общем случае, ее увеличение влечет за собой увеличение нагрузки на окружающую среду и/или расходов на топливо. В связи с этим актуальной является задача поиска таких путей увеличения мощности и крутящего момента, которые бы не приводили к упомянутым выше нежелательным последствиям.

Для решения этой задачи используются как конструктивный [1–3], так и программный подход [4–7]. Первый заключается в разработке более эффективных конструкций двигателей, например с более высокой степенью сжатия, с системой непосредственного впрыска и т.д. Второй предполагает совершенствование алгоритмов управления двигателем с тем, чтобы добиться желаемых показателей. При несомненных перспективах первого пути, второй также не лишен преимуществ, позволяя максимально полно использовать возможности уже существующих технических решений. К программным подходам относится и использование угла опережения зажигания (УОЗ) для достижения максимального давления в цилиндре в диапазоне от 8 до 14 градусов поворота коленчатого вала после верхней мертвой точки [6], который позволяет при неизменном количестве бензина получить больший крутящий момент. Однако УОЗ, обеспечивающий максимум давления в целевом диапазоне, не всегда может быть реализован вследствие детонационного сгорания топлива. Детонация – это взрывообразное сгорание топливно-воздушной смеси, которое может возникать при возникновении ряда условий, таких как высокая температура в камере сгорания, ранний угол опережения зажигания, высокая нагрузка на двигатель при низких оборотах коленчатого вала и т.п. Помимо снижения крутящего момента, детонация приводит к увеличению нагрузки на детали и может вывести двигатель из строя. Для борьбы с детонацией широко используется уменьшение угла опережения зажигания, уменьшение нагрузки на двигатель и увеличение детонационной способности топлива. Поскольку только последний способ не приводит к уменьшению крутящего момента и мощности, рассмотрим возможность увеличения детонационной стойкости топлива для реализации, обеспечивающего максимальную мощность угла опережения зажигания в тех ситуациях, когда этому могло бы помешать возникновение детонации.

Использование бензина с более высоким октановым числом, обеспечивающим большую детонационную стойкость, приводит к нежелательному увеличению расходов на топливо. Существующие альтернативные топлива могут обеспечить более высокую детонационную стойкость по сравнению даже с высокооктановым бензином, более низкую цену и лучшие экологические показатели [8, 9]. При сравнении наиболее распространенных альтернативных топлив, таких как природный и сжиженный газ, этанол и водород по энергоемкости заряда, октановому числу, цене, экологичности, развитости инфраструктуры и объемам необходимой доработки ДВС, наилучшим топливом является сжиженный газ. Обладая высоким октановым числом и низкой ценой, он доступен на распространенной сети заправочных станций во множестве стран, а доработки автомобиля для его использования не представляют каких-либо сложностей. Однако, вследствие большей продолжительности горения, более низкой теплоте сгорания и плотности по сравнению с бензином, крутящий момент и мощность двигателя, работающего на сжиженном газе, оказывается ниже, чем крутящий момент и мощность двигателя, работающего на бензине [10, 11]. Особенно заметно падение мощности при высоких оборотах вращения коленчатого вала.

Исходя из свойств бензина и сжиженного газа, а также принимая во внимание характер полученных при использовании этих топлив внешних скоростных характеристик, можно предположить, что при совмещении определенных долей бензина и сжиженного газа в единую топливную смесь, вероятно, даст результат,

обладающий преимуществами обоих компонентов. Такую смесь будем называть бинарным топливом. Кроме того, возможность изменения состава бинарного топлива, в зависимости от определенных условий, например нагрузки на двигатель, скорости вращения коленчатого вала, и т.п. должна обеспечить еще более лучшие характеристики.

**Расчет угла опережения зажигания при использовании бинарного топлива.** Для расчета УОЗ, обеспечивающего максимальный крутящий момент двигателя, работающего на бинарном топливе, можно воспользоваться процедурой расчета, разработанной для бензина, обновив ее для учета иных характеристик горения в части вычисления кинетической составляющей давления в цилиндре.

Кинетическая составляющая представляет собой набор значений давления внутри цилиндра, в зависимости от поворота коленчатого вала с учетом горения топливно-воздушной смеси. Для ее вычисления процесс горения разбивается на интервалы, выражаемые в градусах поворота коленчатого вала. Интервалы задаются границами $[\varphi_{n-1}, \varphi_n]$, а давление на правой границе каждого последующего интервала $\varphi_n$ вычисляется на основании значения давления на правой границе предыдущего интервала $\varphi_{n-1}$ по формуле 1:

$$p(\varphi_n) = \frac{2 \times q_z \times \Delta x + p(\varphi_{n-1}) \times (K\upsilon(\varphi_{n-1}) - \upsilon(\varphi_n))}{K\upsilon(\varphi_n) - \upsilon(\varphi_{n-1})}, \quad (1)$$

где K – фактор теплоемкости, $\upsilon(\varphi)$ – удельный объем рабочего тела, соответствующего углам поворота коленчатого вала $\varphi$, $q_z$ – полная удельная теплота сгорания топлива, которая при использовании бинарной топливной смеси вычисляется по следующей формуле:

$$q_z = \mu_{\text{бенз}} \left( H_{\text{иб}} \frac{q_{t\text{б}}}{V_{\text{ц}}} \right) + \mu_{\text{газ}} \left( H_{\text{иг}} \frac{q_{t\text{г}}}{V_{\text{воз}} + V_{\text{газ}}} \right), \quad (2)$$

где $H_{\text{иб}}$ – низшая теплотворная способность бензина, $q_{t\text{б}}$ – цикловой расход бензина, $V_{\text{ц}}$ – объем цилиндра, $H_{иг}$ – низшая теплотворная способность сжиженного газа, $q_{t\text{г}}$ – цикловой расход сжиженного газа, $V_{воз}$ – объем воздуха в цилиндре, $V_{газ}$ – объем сжиженного газа в цилиндре.

Доля топлива, сгоревшего за время поворота коленчатого вала от $\varphi_{n-1}$ до $\varphi_n$, ($\Delta x$) рассчитывается по полуэмпирическому уравнению выгорания:

$$\Delta x = e^{-6{,}908 \times \left(\frac{\varphi_n}{\varphi_z}\right)^{m1+1}} - e^{-6{,}908 \times \left(\frac{\varphi_{n-1}}{\varphi_z}\right)^{m1+1}}, \quad (3)$$

где $m_1$ – показатель характера сгорания, который при использовании бинарного топлива уменьшается по сравнению с бензином, $\varphi_z$ – продолжительность процесса сгорания топлива, выраженная в градусах поворота коленчатого вала, которая при добавлении к бензину более медленно горящего сжиженного газа увеличивается.

Остальные этапы процедуры, такие как вычисление термодинамической составляющей давления в цилиндре, а также определения непосредственно УОЗ идентичны для бензина и бинарного топлива и не требуют доработок.

**Исследование влияния состава бинарной смеси на крутящий момент двигателя и детонацию.** Очевидно, что для достижения максимального крутящего момента, помимо использования рассчитанного угла опережения зажигания, необходимо определить мощностной состав бинарного топлива, т.е. соотношение компонентов, обеспечивающее наибольший крутящий момент. Исходя из того, что мощность и крутящий момент двигателя, работающего на бензине больше, чем мощность и крутящий момент двигателя, работающего на сжиженном газе, и, принимая во внимание характеристики обоих топлив, можно предположить, что при увеличении доли газа в бинарном топливе момент и мощность двигателя сначала будут постепенно увеличиваться, а когда объем впрыскиваемого газа достигнет некоего предела, начнут уменьшаться.

Для определения параметров двигателя, работающего на смеси бензина и сжиженного газа, был проведен эксперимент, целью которого стало получение внешних скоростных характеристик двигателя внутреннего сгорания при использовании бинарного топлива различного состава, а также снятие осциллограмм давления в цилиндре для изучения детонации. Эксперимент был реализован на базе измерительного стенда, состоящего из следующих компонентов: автомобиль ВАЗ-2110, с установленной системой модифицированного газобалонного оборудования, газовые форсунки которой находились под управлением специального программного обеспечения штатного электронного блока управления двигателем; устройство для съема мощности и момента двигателя, в качестве которого использовался комплекс MAHA LPS3000; датчик для регистрации давления в цилиндре; устройство для съема информации с вышеуказанного датчика и импульса свечи зажигания, для чего был выбран мотор-тестер MotoDoc II; устройство мониторинга диагностических параметров, функции которого выполнял сканер ScanDoc; средство записи и визуализации полученных сигналов, для чего был использован персональный компьютер с установленным программным обеспечением Quantex. Для обеспечения сравнимости экспериментов бинарная смесь различных составов предварительно приводилась к единому коэффициенту избытка воздуха с помощью системы настройки топливной смеси, в качестве которой использовались программно-аппаратные комплексы Matrix и Injector Online. Финальные замеры мощности были проведены в один день для обеспечения одинаковых условий окружающей среды. В процессе замеров поддерживалась сопоставимая температура охлаждающей жидкости.

Всего было исследовано 5 составов бинарной смеси с соотношениями бензин/газ (L), равными 80/20, 70/30, 60/40, 50/50 и 40/60. В качестве опорного использовался замер на чистом бензине L=100/0. На рис. 2 приведены граничные графики крутящего момента двигателя.

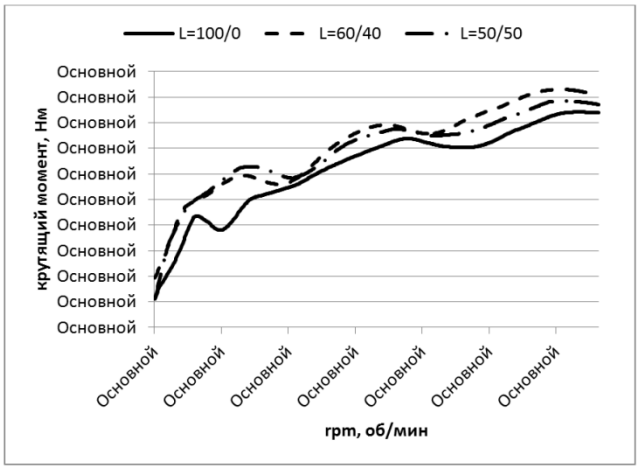
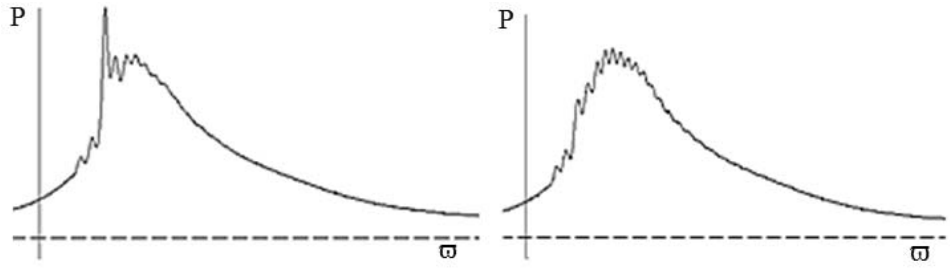



*Рис. 2. Результаты эксперимента: крутящий момент*

Так, при начальном увеличении доли газа крутящий момент постепенно увеличивался и принял максимальное значение 173,1 Нм при L=60/40, что составило прирост в 5,4 % относительно максимального крутящего момента на бензине 164,2 Нм. Кроме того, в нижнем диапазоне оборотов коленчатого вала крутящий момент не только значительно увеличился, но и форма графика стала более ровная, без резких перепадов, наблюдаемых на бензине. Дальнейшее увеличение доли сжиженного газа в бинарном топливе привело к уменьшению характеристик.

Для изучения детонации был выбран типичный для ее возникновения при высокой нагрузке на двигатель нижний диапазон оборотов. Датчиком давления были сняты осциллограммы давления в цилиндре, характерные примеры которых для 2000 об/мин представлены на рис. 3. Хорошо видно, что бинарное топливо с соотношением бензин/газ 80/20 (рис. 3,б) обладает лучшей детонационной стойкостью, по сравнению с бензином (рис. 3,а). Увеличение доли сжиженного газа увеличивает детонационную стойкость еще больше.




а б

*Рис. 3. Результаты эксперимента: детонация*

**Заключение.** В статье предложено использование смеси бензина со сжиженным газом для увеличения крутящего момента двигателя. Показано, что данное топливо имеет большую детонационную стойкость по сравнению с бензином, и позволяет реализовать угол опережения зажигания, обеспечивающий максимальный крутящий момент в тех случаях, когда при использовании бензина это было бы невозможно из-за детонации. Кроме того, определено мощностное соотношение бензина и сжиженного газа в бинарном топливе. Помимо зафиксированного увеличения мощности и крутящего момента двигателя, при использовании бинарного топлива ожидается снижение вредных выбросов в атмосферу за счет уменьшения доли бензина и экологической чистоты сжиженного газа, а также снижение затрат на топливо по причине низкой стоимости пропан-бутановой смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Агафонов А.Н., Слесаренко И.В., Гудзь В.Н. и др.* Экспериментальные исследования работы ДВС с усовершенствованной системой воздухоснабжения // Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С. 11-15.
2. *Быстров О.И.* Один из способов повышения эффективности ДВС // Научные проблемы транспорта Сибири и Дальнего Востока. – 2008. – № 2. – С. 133-138.
3. *Сидыганов Ю.Н., Егоров А.В., Мясников В.Н. и др.* Методы и средства повышения эффективности цикла ДВС со смешанным подводом теплоты // Тракторы и сельскохозяйственные машины. – 2007. – № 6. – С. 17-19.
4. *Геращенко В.В., Яскевич М.Я., Геращенко А.В. и др.* Интеллектуальная система регулирования угла опережения зажигания // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 6. – С. 11-14.
5. *Витковский С.Л.* Корректировка угла опережения зажигания по цилиндрам в процессе эксплуатации ДВС // Системы. Методы. Технологии. – 2006. – Т. 2. – С. 158-160.
6. *Береснев М.А.* Алгоритм расчета угла опережения зажигания для достижения максимального давления в цилиндре двигателя внутреннего сгорания в целевом диапазоне // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2010. – № 3 (104). – С. 232-240.
7. *Дзюбенко А.А.* Параметрическая оптимизация системы автоматического управления зажиганием // Автомобильный транспорт. – 2009. – № 25. – С. 13-17.
8. *Мысник М.И., Свистула А.Е.* Анализ теплофизических свойств альтернативных топлив для двигателей внутреннего сгорания // Ползуновский вестник. – 2009. – № 1-2. – С. 37-43.
9. *Брагинский О.Б.* Альтернативные моторные топлива: мировые тенденции и выбор для России // Российский химический журнал. – 2008. – № 6. – С. 137-146.

10. *Марков В.А., Акимов В.С., Шумовский В.А.* Анализ показателей бензинового двигателя, работающего на смеси пропана и бутана // Автогазозаправочный комплекс + Альтернативное топливо. – 2010. – № 2. – С. 3-9.
11. *Злотин Г.Н., Захаров Е.А., Кузьмин А.В.* Регулировка бензинового ДВС при переводе его на сжиженный нефтяной газ // Двигателестроение. – 2007. – № 2. – С. 29-31.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Р.А. Нейдорф.

**Береснев Максим Алексеевич** – Технологический институт федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Южный федеральный университет» в г. Таганроге; e-mail: max_tr6@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: 88634681894; кафедра электроники и мехатроники; ассистент.

**Beresnev Maksim Alekseevich** – Taganrog Institute of Technological – Federal State-Owned Autonomous Educational Establishment of Higher Vocational Education «Southern Federal University»; e-mail: max_tr6@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634681894; the department of electronics and mechatronics; assistant.

УДК 669.539.57:620.22+621.793.6

**В.И. Бутенко, Д.С. Дуров, А.Д. Захарченко, Т.А. Рыбинская, Р.Г. Шаповалов**

## СОВРЕМЕННЫЕ ВЗГЛЯДЫ НА ИНЖЕНЕРИЮ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ДЕТАЛЕЙ

*Рассмотрено состояние поверхностного слоя деталей в зависимости от изменения в нем внутренней энергии и установлена роль процесса накопления повреждаемости в микрообъемах материала поверхностного слоя детали на ее износостойкость и другие эксплуатационные показатели, которые могут быть использованы для разработки технологических методов повышения работоспособности изделий машиностроения. Получена формула для определения критического значения повреждаемости материала поверхностей деталей трибосистемы в зависимости от их физико-механических свойств.*

*Износостойкость; поверхностный слой; материал; энергия деформирования; дислокации; повреждаемость; трибосистема.*

**V.I. Butenko, D.S. Durov, A.D. Zakharchenko, T.A. Rybinskaya, R.G. Shapovalov**

## MODERN SIGHTS AT ENGINEERING OF THE BLANKET OF DETAILS

*The condition of a blanket of details depending on change in it of internal energy is considered and the role of process of accumulation of damageability in micro volumes of a material of a blanket of a detail on its wear resistance and other operational indicators which can be used for working out of technological methods of increase of working capacity of products of mechanical engineering is established. The formula for definition of critical value of damageability of a material of surfaces of details tribosystem depending on their physicomechanical properties is received.*

*Wear resistance; blanket; material; energy of deformation; disposition; damageability; tribosystem.*

От состояния поверхностного слоя детали зависят такие важнейшие ее эксплуатационные показатели, как износостойкость, усталостная прочность, коррозионная стойкость, контактная прочность и другие [1]. Именно поэтому применяемые в технологии машиностроении методы обработки условно делят по доминирующему управляющему воздействию на формообразующие и формирующие показатели качества детали, которые, в свою очередь, в значительной степени зависят от поверхностной энергии $\Delta E_n$ и скрытой энергии деформирования $\Delta E_c$ [2].