

# Автоматизация. Современные Технологии

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ МЕЖОТРАСЛЕВОЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

## Главный редактор

**Шахнов В.А.** — д.т.н., проф., член-кор. РАН,  
МГТУ им. Н.Э. Баумана

## РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

**Афанасьев В.Н.** — д.т.н., проф., МИЭМ НИУ ВШЭ  
**Басараб М.А.** — д.ф.-м.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Большаков А.А.** — д.т.н., проф., СПбГИ (ТУ)  
**Буддакова Т.И.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Ван Мэйлин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Зинченко Л.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Зубов Н.Е.** — д.т.н., проф., РКК «Энергия»  
**Кларк Р.** — д.т.н., проф., КИУ (г. Ворвик,  
Великобритания)  
**Криони Н.К.** — д.т.н., проф., УГАТУ (г. Уфа)  
**Кузнецов А.Е.** — д.т.н., проф., РГРТУ (г. Рязань)  
**Мальцева С.В.** — д.т.н., проф., НИУ ВШЭ  
**Микаева С.А.** — д.т.н., проф., МИРЭА—РТУ  
**Неусыпин К.А.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Никифоров В.М.** — д.т.н., проф., АО «НПЦАП  
им. Н.А. Пилюгина»  
**Пролетарский А.В.** — д.т.н., проф., МГТУ им. Н.Э. Баумана  
**Проталинский О.М.** — д.т.н., проф., НИУ МЭИ  
**Путилов В.Н.** — ООО «Изд-во "Инновационное  
машиностроение"» (заместитель  
главного редактора)  
**Румянцева О.Н.** — генеральный директор ООО «Изд-во  
"Инновационное машиностроение"»  
**Ся Юаньцин** — д.т.н., проф., Пекинский  
политехн. ун-т (КНР)  
**Фу Ли** — д.т.н., проф., Ин-т Бейхан (КНР)  
**Хэ Юн** — д.т.н., проф., Нанкинский ун-т  
науки и технологии (КНР)  
**Чистякова Т.Б.** — д.т.н., проф., СПбГИ (ТУ)  
**Шибанов Г.П.** — д.т.н., проф., Гос. лётно-испытат.  
центр им. В.П. Чкалова

Редакторы — **Мымрина И.Н., Селихова Е.А.**

Корректор — **Сажина Л.И.**

## Адрес редакции:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2.  
Тел.: 8 (499) 268-41-77.  
E-mail: ast@mashin.ru; astmashin@yandex.ru;  
http://www.mashin.ru

## Учредитель:

ООО «НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО  
"ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ"»

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре 29 мая 2014 г.  
(ПИ № ФС77-58102), входит в перечень утверждённых ВАК  
при Минобрнауки России изданий для публикации трудов  
соискателей учёных степеней, а также в систему Россий-  
ского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Издаётся с 1947 г.

Том 79

1  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

### АВТОМАТИЗАЦИЯ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

**Дадабоев Р.М., Мирзаабдуллаев Ж.Б., Усманов Ж.** Влия-  
ние добавления водорода в бензиновоздушную смесь на ди-  
намические показатели двигателя . . . . . 3

**Шушлебин А.В., Микаева С.А.** Лазерная установка для резки  
стекла и керамических изделий . . . . . 10

### СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ

**Чжан Л., Лукьянов В.В.** Перспективные исследования в об-  
ласти визуально-инерциальной навигации . . . . . 14

**Шокиров О.Г.** Обзор моделей поведения водителей транс-  
портных средств в ситуации, близкой к столкновению . . . . . 19

**Муратов И.В.** Применение БПЛА для выявления наруше-  
ний ПДД . . . . . 22

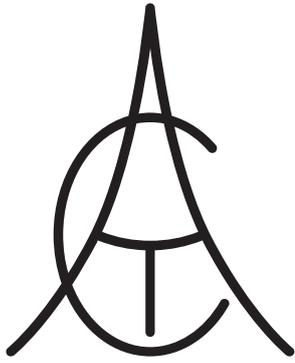
**Белов Б.А., Салтыкова О.А.** Навигация мобильного робота  
в неструктурированной среде . . . . . 27

**Кириллова А.Б.** Исследование практики автоматизации  
управления маршрутной сетью авиакомпании . . . . . 32

### СИСТЕМЫ И ПРИБОРЫ УПРАВЛЕНИЯ

**Андреев И.А.** Программная реализация автоматизирован-  
ной системы управления технологическим процессом с эле-  
ментами обучения . . . . . 37

**Чаадаев К.В.** Программно-аппаратный комплекс дистанци-  
онного мониторинга состояния и управления объектами сети  
цифрового телерадиовещания . . . . . 42



# Automation. Modern Technologies

MONTHLY INTERBRANCH SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

## Chief in Editor

**Shakhnov V.A.** – dr.en.s., prof., corr. member of RAS,  
MSTU behalf of N.E. Bauman

## EDITORIAL COUNCIL:

**Afanasyev V.N.** – dr.en.s., prof., MIEM NRU HSE

**Basarab M.A.** – dr.ph.-m.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Bolshakov A.A.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Buldakova T.I.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Wang Meiling** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Zinchenko L.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Zubov N.E.** – dr.en.s., prof., RSC «Energy»

**Clark R.** – Ph.D., prof., EMB of Warwick Un., UK

**Krioni N.K.** – dr.en.s., prof., USATU, Ufa

**Kuznetsov A.E.** – dr.en.s., prof., RSREU, Ryazan

**Maltseva S.V.** – dr.en.s., prof., NRU HSE

**Mikaeva S.A.** – dr.en.s., prof., MIREA—RTU

**Neusypin K.A.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Nikiforov V.M.** – dr.en.s., prof., AC «NPCAP  
behalf of N.A. Pilyugin»

**Proletarskiy A.V.** – dr.en.s., prof., MSTU behalf  
of N.E. Bauman

**Protalinsky O.M.** – dr.en.s., prof., NRU MPEI

**Putilov V.N.** – LLC «"Innovative Mashinostroenie"  
Publishers» (deputy chief in editor)

**Rumyantseva O.N.** – General Director of LLC «"Innovative  
Mashinostroenie" Publishers»

**Xia Yuantsin** – Ph.D., prof., Beijing Ins. of Technology,  
P.R. China

**Fu Li** – Ph.D., prof., Beikhan Un., P.R. China

**He Yung** – Ph.D., prof., Nanjing Un. of Science  
and Technology, P.R. China

**Chistyakova T.B.** – dr.en.s., prof., SPbSIT (TU)

**Shibanov G.P.** – dr.en.s., prof., State Flight Test Center  
behalf of V.P. Chkalov

Editors — **Mymrina I.N., Selikhova E.A.**

Profreader — **Sazhina L.I.**

## Editorial address:

107076, Moscow, Kolodezny lane — 2a, build. 2

Tel.: +7 (499) 268-41-77.

E-mail: [ast@mashin.ru](mailto:ast@mashin.ru); [astmashin@yandex.ru](mailto:astmashin@yandex.ru);

<http://www.mashin.ru>

## Founder:

LLC «"INNOVATIVE MASHINOSTROENIE" PUBLISHERS»

The journal was registered in the Roskomnadzor on May 29, 2014 (PI No. FS77-58102), it is included in the list of publications approved by the Higher Attestation Commission (VAK) of the Russian Ministry of education and science for publication of the works of applicants for academic degrees and the system of the Russian index scientific citation (RINC)

It is published since 1947

Volume 79  $\frac{1}{2025}$

## CONTENTS

### AUTOMATION OF SCIENTIFIC-RESEARCH AND PRODUCTION PROCESSES

**Dadaboyev R.M., Mirzaabdullaev J.B., Usmanov J.** Effect of adding hydrogen to the gasoline-air mixture on the engine dynamic performance . . . . . 3

**Shushlebin A.V., Mikaeva S.A.** Laser machine for cutting glass and ceramic products . . . . . 10

### MODERN TECHNOLOGIES

**Zhang L., Lukyanov V.V.** Advanced research in the field of visual-inertial navigation . . . . . 14

**Shokirov O.G.** Review of behavioral models of vehicle drivers in a situation close to a collision . . . . . 19

**Muratov I.V.** Application of UAV for detecting traffic violations . . . 22

**Belov B.A., Saltykova O.A.** Mobile robot navigation in an unstructured environment . . . . . 27

**Kirillova A.B.** Research of the automation practice of the airline route network management . . . . . 32

### SYSTEMS AND CONTROL DEVICES

**Andreev I.A.** Software implementation of an automatic control system for technological process with training elements . . . . . 37

**Chaadaev K.V.** Hardware and software complex for remote monitoring of the objects state and their control of digital television and radio broadcasting network . . . . . 42



Научная статья

УДК 621.431.3

DOI: 10.36652/0869-4931-2025-79-1-3-9

## ВЛИЯНИЕ ДОБАВЛЕНИЯ ВОДОРОДА В БЕНЗИНОВОЗДУШНУЮ СМЕСЬ НА ДИНАМИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДВИГАТЕЛЯ

Равшанбек Махамдали оглы Дадабоев<sup>1✉</sup>,  
Жахонгир Бахтиёрович Мирзаабдуллаев<sup>2✉</sup>, Жалил Усманов<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Андижанский машиностроительный институт, Андижан, Узбекистан,  
ravshanbek.dadaboyev@mail.ru✉

<sup>2,3</sup>Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, Узбекистан,  
jakhongirmirzo2002@gmail.com✉

**Аннотация.** Проведена оценки энергоэффективности систем производства и использования топлива от момента его открытия в виде сырья до процесса превращения в механическую работу. Использование газообразного водорода в качестве присадки в бензиновых двигателях улучшает динамические характеристики двигателя и топливную экономичность. Применение таких методов в двигателях является рациональным использованием природного топлива.

**Ключевые слова:** нормальная скорость пламени, двигатель, водород, альтернативное топливо, угловая частота вращения коленчатого вала, динамика двигателя

**Для цитирования:** Дадабоев Р.М., Мирзаабдуллаев Ж.Б., Усманов Ж. Влияние добавления водорода в бензиновоздушную смесь на динамические показатели двигателя // Автоматизация. Современные технологии. 2025. Т. 79. № 1. С. 3—9. DOI: 10.36652/0869-4931-2025-79-1-3-9

Original article

## EFFECT OF ADDING HYDROGEN TO THE GASOLINE-AIR MIXTURE ON THE ENGINE DYNAMIC PERFORMANCE

Ravshanbek M. Dadaboyev<sup>1✉</sup>, Jakhongir B. Mirzaabdullaev<sup>2✉</sup>, J. Usmanov<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Andijan machine-building institute, Andijan, Uzbekistan, ravshanbek.dadaboyev@mail.ru✉

<sup>2,3</sup>Tashkent state technical university, Tashkent, Uzbekistan, jakhongirmirzo2002@gmail.com✉

**Abstract.** The energy efficiency evaluation of fuel production and use systems from the moment of its discovery as a raw material to the process of conversion into mechanical work is carried out. The use of gaseous hydrogen as an additive in gasoline engines improves the dynamic performance of the engine and fuel efficiency. The use of such methods in engines is a rational use of natural fuel.

**Keywords:** normal flame speed, engine, hydrogen, alternative fuel, crankshaft speed, engine dynamics

**Введение.** В XXI в. резко возрос спрос на нефтяные топливные ресурсы, что привело к нехватке топлива и высоким ценам. Одной из отраслей, наиболее активно использующих нефтяные топлива, является транспорт. Поиск источников энергии для двигателей внутреннего сгорания (ДВС), отличных от нефтяного топлива, является актуальной проблемой. Наиболее эффективными являются двигатели внутренне-

го сгорания, обладающие высокими мощностью и экологическими характеристиками при низком расходе топлива. Использование альтернативных видов топлива в двигателях внутреннего сгорания или в качестве добавки к основному топливу повышает мощность двигателя, экологические и экономические показатели [1, 7].

В связи с этим возникает необходимость оценить энергоэффективность систем произ-

водства и использования топлива от момента его обнаружения в виде сырья до процесса превращения в механическую работу. Такой подход к решению задачи позволяет оценить все виды потенциального топлива, их основные источники, а также эффективность использования топлива в двигателях автомобилей. Для оценки энергетической эффективности перспективных видов топлива используется отечественный и зарубежный опыт [1, 10].

Прежде чем использовать сырье в качестве топлива, оно должно пройти несколько технических стадий: поиск и добыча сырья, переработка, распределение топлива среди потребителей, использование топлива потребителями частного транспорта. Общую эффективность этих процессов можно записать в следующем виде:

$$\Sigma z = z_1 + z_2 + z_3 + z_4, \quad (1)$$

где  $z_1$  — эффективность процесса поиска и добычи сырья;  $z_2$  — эффективность переработки сырья;  $z_3$  — эффективность распределения топлива среди потребителей;  $z_4$  — эффективность использования топлива потребителями частного транспорта [7].

**Основная часть.** При оценке энергетической эффективности потенциального топлива целесообразно учитывать следующие вопросы: энергоресурсы и тип потенциального топлива, эффективность переработки сырья при получении различных альтернативных видов топлива из первичных источников энергии, совместимость системы «топливо—двигатель», топливную экономичность различных автомобильных и тракторных двигателей. Суммарная энергоэффективность позволяет определить оптимальное сочетание системы «топливо—двигатель» с точки зрения энергетики. В двигателях с искровым зажиганием рабочая смесь готовится и воспламеняется через определенные промежутки времени. Для современных двигателей общая продолжительность первой и второй фаз сгорания составляет 0,003...0,01 с, что соответствует повороту коленчатого вала на угол 30...45° [4, 6, 9].

Скорость горения рабочей смеси обычно выражают через среднюю скорость распространения пламени по всему объему камеры сгорания. Для исправно работающего двигателя скорость распространения пламени второй фазы составляет 20...30 м/с. В точке  $Z$  на индикаторной диаграмме (рис. 1) температура и давление в цилиндре современных двигателей достигают максимальных значений 2600...2800 К и 50...80 кг/см<sup>2</sup> соответственно [4, 8].

Продолжительность сгорания топлива в цилиндре зависит от температуры рабочей смеси, степени сжатия, количества остаточных газов в цилиндре, сосредоточенного движения смеси, угловой скорости коленчатого вала, расположения и количества свечей зажигания, формы камеры сгорания и состава рабочей смеси. Чем выше температура смеси перед горением, тем выше скорость ее горения. Увеличение степени сжатия двигателя вызывает повышение температуры рабочей смеси при сгорании и увеличение скорости горения.

Наличие остаточных газов в составе новой рабочей смеси (примерно до 10 %) практически не влияет на скорость горения, однако их увеличение снижает скорость горения. Чем больше движение массы смеси, тем быстрее она сгорает.

Увеличение угловой скорости коленчатого вала повышает скорость поступления рабочей смеси в цилиндр, что приводит к увеличению интенсивности перемешивающих движений смеси и улучшает скорость горения [8, 9].

Увеличение количества свечей зажигания сокращает путь образующегося пламени, в результате чего снижается продолжительность горения при постоянной скорости распространения пламени и увеличивается

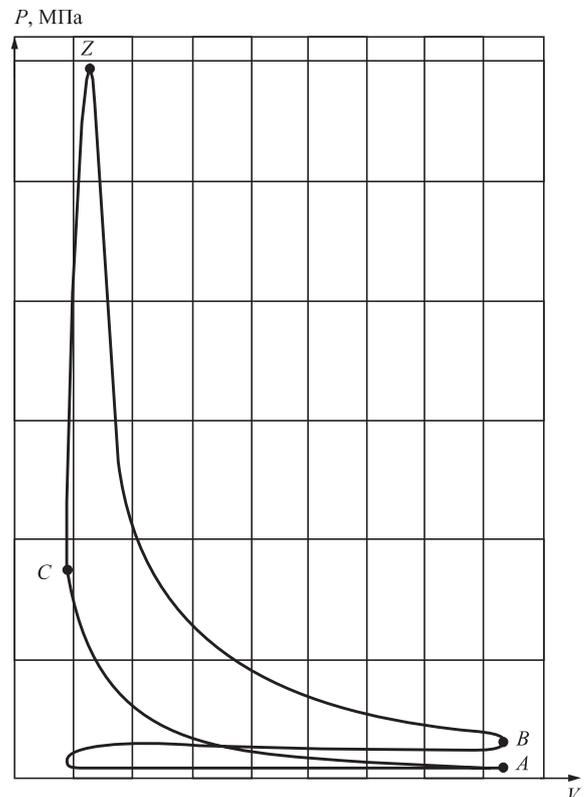


Рис. 1. Индикаторная диаграмма

скорость нарастания давления. Но увеличение количества свечей зажигания в цилиндрах усложняет конструкцию двигателя. Для эффективного сгорания топлива в цилиндре двигателя достаточно установки двух свечей зажигания. В современных двигателях устанавливаются две противоположные свечи зажигания. На время зажигания влияет и расположение свечей: чем меньше расстояние между свечами зажигания и краем камеры сгорания, тем меньше время сгорания рабочей смеси [2, 3, 11].

Конструкция камеры сгорания влияет и на время горения рабочей смеси, ведь от скорости горения зависят расстояние, пройденное пламенем, и скорость сгорания смеси.

Состав рабочей смеси оказывает существенное влияние на скорость ее горения. Эксперименты показывают, что при пределе воспламенения коэффициент избытка воздуха  $\alpha = 0,85...0,90$ , а скорость сгорания смеси наибольшая. При изменении состава рабочей смеси изменяется и скорость ее горения. При обогащенных или обедненных рабочих смесях работа двигателя затруднена, так как рабочая смесь воспламеняется от свечи зажигания и пламя не может полностью распространяться в камере сгорания из-за отсутствия кислорода в обогащенных смесях или отсутствия топлива в обедненных смесях [1, 11].

Распространение пламени по рабочей смеси, т. е. предел воспламеняемости, зависит от коэффициента избытка воздуха:  $\alpha_{\min} \approx 0,3...0,4$  и  $\alpha_{\max} \approx 1,3...1,5$  для обогащенных смесей. Также на него влияет температура окружающей среды. Процесс сгорания в двигателях с искровым зажиганием состоит из трех фаз [9, 10].

Основным фактором, ограничивающим частоту вращения коленчатого вала современных двигателей ( $\sim 6500 \text{ мин}^{-1}$ ), является скорость сгорания углеводородного топлива, которая в настоящее время составляет около 40 м/с. Из-за очень низкой скорости сгорания в двигателях внутреннего сгорания, работающих на углеродном топливе, осуществляется принудительное зажигание. Напротив, водород горит с гораздо более высокой скоростью распространения фронта пламени, чем углеводородное топливо. Поэтому можно существенно увеличить частоту вращения коленчатого вала водородных двигателей.

Под скоростью распространения понимают скорость нормального распространения фронта пламени к поверхности камеры сгорания за счет молекулярной теплопроводности

и диффузии активных центров в несгоревшей смеси.

Опытные образцы серийных, вновь проектируемых и модернизируемых двигателей перед испытаниями должны быть проверены в соответствии с правилами пуска двигателя на уровне, указанном в технической документации. Двигатели, бывшие в употреблении, замене не подлежат.

Испытания проводятся по ГОСТ 14846—2020 при комнатной температуре и атмосферном давлении. Если температура и давление выходят за установленные пределы, это отмечается в протоколе испытаний (рис. 2).



Рис. 2. Процесс испытания ДВС на стенде индуктивного тормозного устройства FDJ 001

Условия испытаний (температура и давление) в помещении обеспечиваются с помощью кондиционера. Испытания проводятся на топливе и масле, указанных в утвержденной технической документации производителя. Во время испытания температура охлаждающей жидкости и масла в двигателе поддерживается в пределах, указанных в технических характеристиках двигателя (рис. 3).

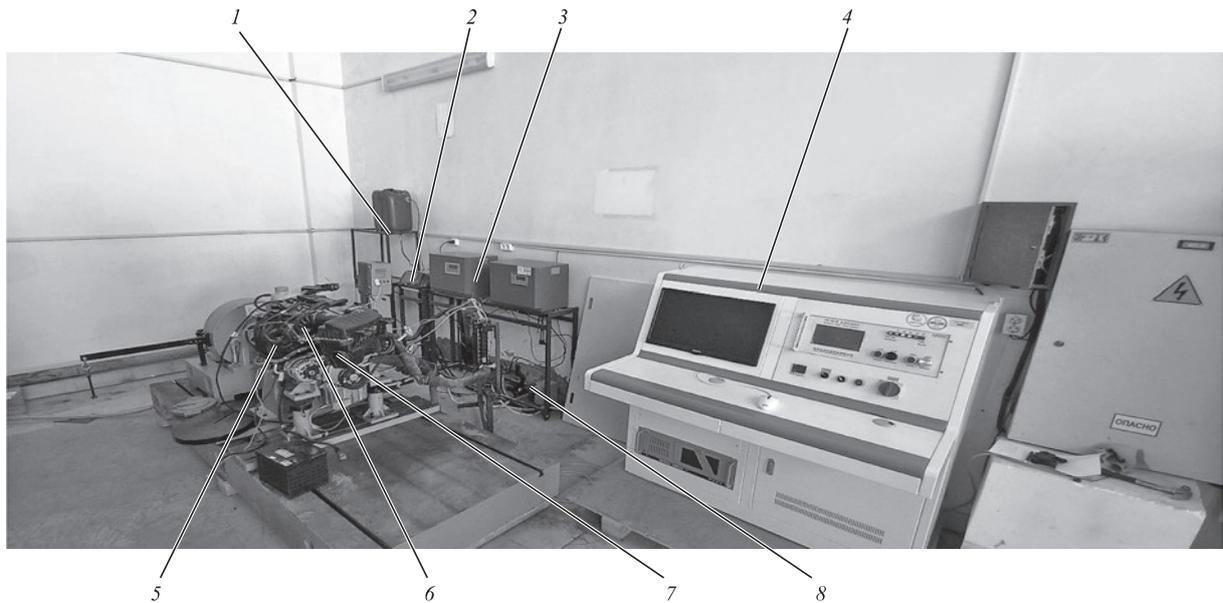
График изменения частоты вращения коленчатого вала во времени получают автоматически на испытательном стенде (рис. 4).

По графику (см. рис. 4) определяем время, необходимое коленвалу для достижения частоты от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ . График можно масштабировать по осям  $x$  и  $y$  с помощью программы Auto CAD и определить численное значение времени по оси  $x$  и частоту вращения по оси  $y$  (рис. 5).

Угловое ускорение коленчатого вала двигателя определяется по формуле

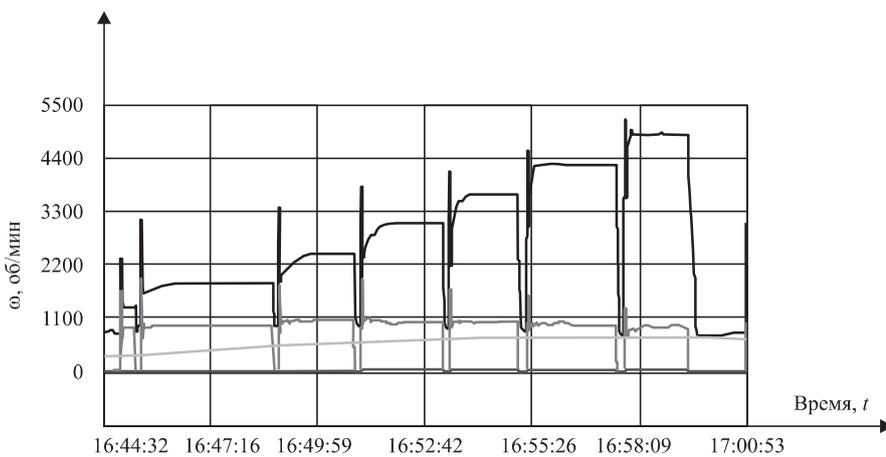
$$\varepsilon = (\omega_2 - \omega_1)/t, \quad (2)$$

где  $\varepsilon$  — угловое ускорение коленчатого вала,  $\text{м/с}^2$ ;  $\omega_1$  и  $\omega_2$  — начальная и конечная угловая скорость коленчатого вала соответственно,  $\text{об/мин}$ .

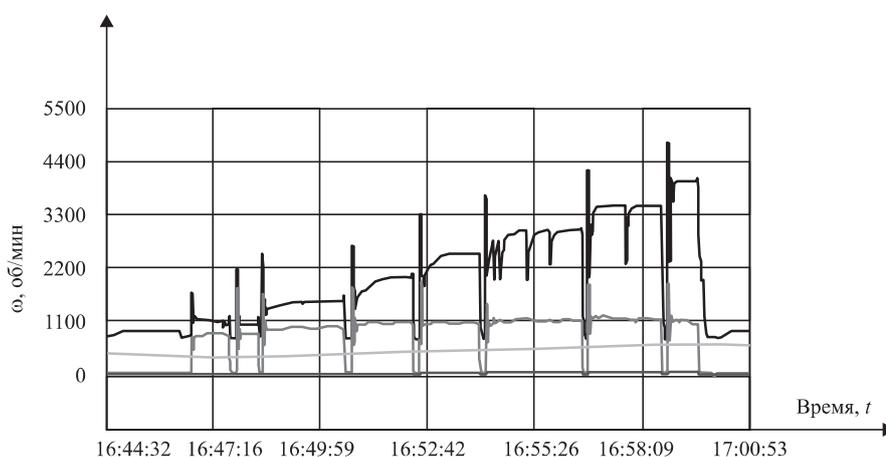


**Рис. 3. Испытательный стенд ДВС (индуктивное тормозное устройство FDJ 001):**

1 — топливный бак; 2 — газоанализатор HORIBA (MEXA-584L); 3 — устройство измерения расхода топлива; 4 — панель управления; 5 — индуктивное тормозное устройство FDJ-001; 6 — бензиновый двигатель 1,5 L2C; 7 — датчик температуры масла; 8 — электронный блок управления



**Рис. 4. Зависимость частоты вращения коленчатого вала от времени**



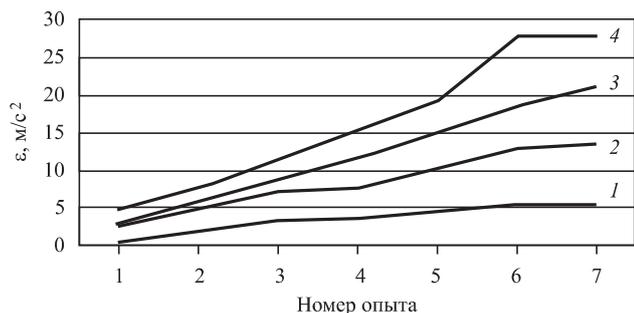
**Рис. 5. Определение времени, необходимого для достижения частоты от  $\omega_1$  до  $\omega_2$**

Значения углового ускорения коленчатого вала двигателя при использовании в двигателе бензина АИ-80 и АИ-92 и добавлении в него водорода определяют на основе электронных графиков, полученных с помощью индуктивного тормозного устройства FDJ 001. Эксперименты проведены при изменении числа оборотов от минимального до заданного, например 1000...1500 об/мин.

Динамика двигателя — это способность двигателя за короткое время достигать заданной мощности. Динамика двигателя зависит от времени достижения частоты оборотов коленчатого вала от  $\omega_1$  до  $\omega_2$ . Увеличение углового ускорения коленчатого вала сокращает время изменения частоты оборотов с  $\omega_1$  на  $\omega_2$  (рис. 6)

Значения мощности и крутящего момента двигателя при использовании бензина и бензиноводородной смеси приведены в табл. 1 и 2.

Графики изменения крутящего момента и мощности двигателя при использовании раз-



**Рис. 6. Угловое ускорение коленчатого вала двигателя при использовании бензина АИ-80, АИ-92 и водорода, необходимых для достижения заданной максимальной и минимальной угловой скорости:**  
 1 — АИ-80; 2 — АИ-80 с водородом; 3 — АИ-92; 4 — АИ-92 с водородом

Таблица 1

**Характеристики двигателя при использовании бензина АИ-80 и водорода**

Частота оборотов коленчатого вала $n$ , об/мин	Бензин АИ-80		Бензин АИ-80 с водородом	
	Me, Н·м	Ne, кВт	Me, Н·м	Ne, кВт
1000	77,3	8,3	82,5	8,9
1500	83,9	13,3	85,0	14,5
2000	97,6	20,4	99,8	21,3
2500	103,8	27,3	112,6	29,8
3000	110,6	34,9	115,0	36,0
3500	115,4	42,3	117,4	43,3
4000	115,6	47,7	121,7	50,5
4500	113,1	50,2	122,2	52,3
5000	113,7	48,5	119,7	50,0
5800	110,6	46,6	114,6	47,8

личных марок бензина и водорода приведены на рис. 7 и 8.

При обработке и анализе полученных результатов с использованием методов стандартного отклонения и дисперсии, корреляционной связи и уравнения регрессии получены следующие выражения:

$$\bar{x} = \frac{f_1 x_1 + f_2 x_2 + \dots + f_n x_n}{f_1 + f_2 + \dots + f_n} = \frac{\sum f x}{n}, \quad (3)$$

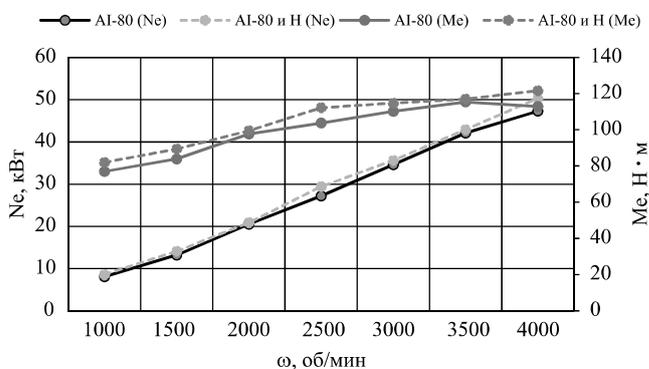
где  $\bar{x}$  — среднее значение;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  — первые измеренные значения;  $f_1, f_2, \dots, f_n$  — вторые измеренные значения;

Таблица 2

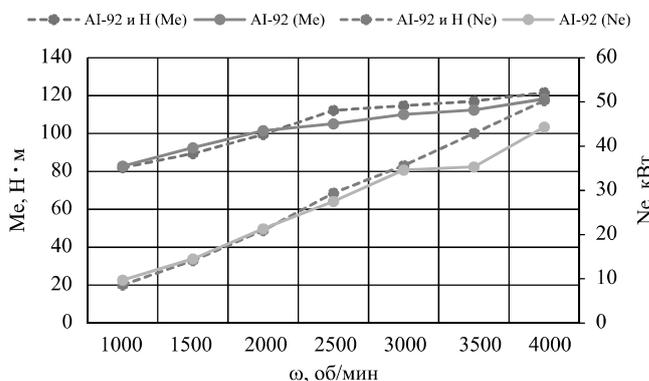
**Характеристики двигателя при использовании бензина АИ-92 и водорода**

Частота оборотов коленчатого вала $n$ , об/мин	Бензин АИ-80		Бензин АИ-80 с водородом	
	Me, Н·м	Ne, кВт	Me, Н·м	Ne, кВт
1000	82,9	10,0	85,9	12,3
1500	92,7	14,7	97,5	15,6
2000	101,7	21,5	107,9	22,8
2500	105,4	27,4	110,1	33,7
3000	110,3	34,7	115,5	36,5
3500	112,6	35,6	119,5	44,0
4000	118,5	44,6	121,0	46,1
4500	117,2	43,7	118,6	44,9
5000	115,6	43,2	116,9	43,8
5800	112,4	37,8	114,2	42,4

Примечание: Me — крутящий момент коленчатого вала; Ne — мощность.



**Рис. 7. Изменение крутящего момента и мощности двигателя при использовании бензина АИ-80 и водорода**



**Рис. 8. Изменение крутящего момента и мощности двигателя при использовании бензина АИ-92 и водорода**

$$r = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_n - \bar{x})(y_n - \bar{y})}{\sqrt{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2} \sqrt{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}}. \quad (4)$$

В табл. 3 приведены показатели мощности двигателя и расхода топлива при использовании разных марок бензина.

Вычисление коэффициентов корреляции и регрессии углового ускорения коленчатого вала двигателя в зависимости от мощности двигателя осуществляется по формулам:

коэффициент регрессии относительно  $x$  —

$$R_{x/y} = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{(y_1 - \bar{y})^2 + (y_2 - \bar{y})^2 + \dots + (y_n - \bar{y})^2}; \quad (5)$$

коэффициент регрессии относительно  $y$  —

$$R_{y/x} = \frac{(x_1 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + (x_2 - \bar{x})(y_2 - \bar{y}) + \dots + (x_k - \bar{x})(y_k - \bar{y})}{(x_1 - \bar{x})^2 + (x_2 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2}; \quad (6)$$

уравнение регрессии по отношению к  $y$  —

$$y - \bar{y} = R_{y/x}(x - \bar{x}); \quad (7)$$

уравнение регрессии по отношению к  $x$  [12] —

$$x - \bar{x} = R_{x/y}(y - \bar{y}). \quad (8)$$

Среднее арифметическое значение  $\bar{x} = 12,61447$ , среднее арифметическое значение  $\bar{y} = 40,39106$ .

Коэффициент корреляции  $r = 0,962806$  свидетельствует об очень высокой корреляционной связи:

$$\sigma_x = 5,579427, \sigma_y = 16,23953.$$

Для создания уравнения регрессии определяем коэффициенты регрессии:

$$R_y^x = r \frac{\sigma_x}{\sigma_y} \quad (9)$$

или

$$R_x^y = r \frac{\sigma_y}{\sigma_x}. \quad (10)$$

В результате вычислений получаем

$$R_y^x = 0,330792 \text{ и } R_x^y = 2,802351.$$

Уравнение регрессии запишем следующим образом:  $y = 2,8x + 2,86$ .

С помощью этого уравнения можно определить мощность коленчатого вала двигателя при любом угловом ускорении.

**Заключение.** Процесс сгорания топлива в двигателях с искровым зажиганием зависит от состава рабочей смеси, температуры, степени сжатия, количества остаточных газов,

Таблица 3

Результаты вычислений характеристик двигателя

$f_1$	$\bar{x}$	$x_1$	$x_1 - \bar{x}$	$(x_1 - \bar{x})^2$	$\bar{y}$	$y_1$	$y_1 - \bar{y}$	$(y_1 - \bar{y})^2$
1000	12,61447	2,052288	-10,5622	111,5597	40,39106	8,30	-32,09	1029,84
1500	12,61447	3,230453	-9,38402	88,05982	40,39106	13,27	-27,12	735,73
2000	12,61447	5,814815	-6,79966	46,23534	40,39106	20,40	-19,99	399,64
2500	12,61447	8,395722	-4,21875	17,79785	40,39106	27,27	-13,12	172,25
3000	12,61447	10,79038	-1,82409	3,32732	40,39106	34,93	-5,46	29,79
3500	12,61447	12,8268	0,212325	0,045082	40,39106	42,27	1,88	3,52
4000	12,61447	12,26563	-0,34885	0,121694	40,39106	47,67	7,28	52,93
4500	12,61447	14,03576	1,421288	2,020059	40,39106	50,20	9,81	96,22
5000	12,61447	15,6804	3,065927	9,39991	40,39106	48,53	8,14	66,30
5800	12,61447	18,33577	5,721294	32,73321	40,39106	47,53	7,14	51,01

числа оборотов коленчатого вала, количества и расположения свечей зажигания, формы сгорания, камеры и других параметров. Добавление газообразного водорода в рабочую смесь увеличивает низшую теплоту сгорания топлива и скорость распространения пламени.

Поскольку нормальная скорость распространения пламени в водородном топливе выше, чем в бензиновом, скорость распространения пламени в бензино-воздушно-водородной смеси увеличивается. В результате существенно возрастает давление в цилиндре и улучшаются динамические характеристики двигателя.

Электролазерный водородный двигатель напрямую подключен к впускному коллектору. Использование таких систем питания обеспечивает минимальные изменения в конструкции и системах двигателя. В данном эксперименте получено максимальное количество водорода без нагрузки на систему питания двигателя. Повышенная нагрузка на электрическую систему снижает мощность двигателя и топливную экономичность.

#### СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. **Льотко В., Луканин В.Н., Хачиян А.С.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. М.: МАДИ, 2000. 311 с.
2. **Мищенко А.И.** Применение водорода для автомобильных двигателей. Киев: Наук. думка, 1984. 143 с.
3. **Токарев А.А.** Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. М.: Машиностроение, 1982. 224 с.

4. **Qodirov S.M., Qodirxonov M.O.** Dvigatellar va avtomobil nazariyasi. Toshkent: Cho'lpon nomidagi nashriyot-matbaa ijodiy uyi, 2012. 328 b.

5. **Karimxodjayev N., Dadaboyev R.M.** Avtomobil-larning ekologik havfsizligi va vodorod yoqilg'isidan foydalanish istiqbollari: monografiya, 2023. 97 b.

6. **Луканин В.Н., Морозов К.А., Хачиян А.С.** Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов. М.: Высш. шк., 2005. 479 с.

7. **Кавтарадзе З.Р., Кавтарадзе Р.З.** Перспективы применения поршневых двигателей на альтернативных моторных топливах // Транспорт на альтернативном топливе. Ч. 1. № 6 (12). 2009. С. 59—65; Ч. 2. № 1 (13). 2010. С. 74—80.

8. **Базаров Б.И., Калауов С.А., Васидов А.Х.** Альтернативные моторные топлива. Ташкент: SHAMSASA, 2014. 189 с.

9. **Базаров Б.И.** Работа поршневых двигателей на альтернативных видах топлива. Ташкент: ТАДИ, 2001. 138 с.

10. **Denmuxammadiyev A.M., Djalilov A.U., Cho'lliyev Y.E.** Современные методы статистической обработки результатов экспериментов: монография. Ташкент, 2019.

11. **Исмаев Ж.Ф., Джалилов Ж.Х., Файзуллаев А.Ж.** Применение водорода в виде добавки в автомобильных двигателях // Научный журнал Universum: технические науки. 2021. Вып. 4 (85).

12. **Исмаев Ж.Ф., Джалилов Ж.Х., Файзуллаев А.Ж., Юсупов У.К.** Повышение экологической безопасности автомобилей путем добавки водорода к бензину // Научный журнал Universum: технические науки. 2021. Вып. 5 (86).

*Статья поступила в редакцию 20.08.2024;  
одобрена после рецензирования 26.08.2024;  
принята к публикации 26.08.2024.*

#### Требования к оформлению библиографических ссылок

Список литературных источников, на которые делаются ссылки в тексте статьи, составляется в порядке цитирования и оформляется в соответствии с ГОСТ 7.1—2003, ГОСТ Р 7.0.5—2008 и ГОСТ Р 7.07—2021 (указываются фамилии и инициалы авторов, точное название книги или сборника, издательство, год и место издания, количество страниц в книге, а для журнальных статей — фамилии и инициалы авторов, название статьи, название, год выхода и номер журнала, страницы размещения статьи). При ссылке на электронные ресурсы обязательно указывать дату обращения, например, 26.06.2017. Ссылки на иностранную литературу даются на языке первоисточника без сокращений. Согласно требованиям зарубежных баз данных, список литературных источников необходимо также транслитерировать на латинский шрифт (фамилия и инициалы авторов, название источника публикации и место издания), при этом технические сокращения должны быть переведены с использованием общепринятых обозначений (номер — No., том — Vol., страница — P. и т. п.). Для транслитерации русскоязычных наименований можно воспользоваться сервисом <http://translit.ru/>.