

УДК (UDC) 621.43

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА ДВС С ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИМИ ФОРСУНКАМИ И ТУПИКОВОЙ РАМПОЙ НА НЕУСТАНОВИВШИХСЯ РЕЖИМАХ

## DETERMINATION OF FUEL CONSUMPTION OF AN ICE WITH ELECTROMECHANICAL INJECTORS AND A DEADLOCK TYPE RAMP ON TRANSIENTS

Савенков Н.В., Золотарев О.О.  
Savenkov N.V., Zolotarev O.O.Донбасская национальная академия строительства и архитектуры (Макеевка, Россия)  
Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture (Makeyevka, Russian Federation)

**Аннотация.** При эксплуатации автомобиля его двигатель внутреннего сгорания значительную долю времени работает на неустойчивых режимах. Для автотранспортных средств с традиционными силовыми установками это является неизбежным ввиду необходимости регулирования мощности на ведущих колесах, а также нежелательным с позиции часто имеющего место значительного ухудшения эффективных показателей и экологических качеств двигателя по отношению к их значениям, характерным для установившихся режимов работы, что обусловлено влиянием ряда факторов и отражено в известных исследованиях. Для большей приспособленности двигателя внутреннего сгорания и всей силовой установки к работе на неустойчивых режимах, учитывая сложность протекающих в агрегатах при этом процессов, актуальными являются исследования по экспериментальному изучению текущего расхода топлива, эффективного крутящего момента и экологичности двигателя на этих режимах. В статье усовершенствована методика определения текущего расхода топлива на неустойчивых режимах для автомобильного двигателя внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием, топливной рампой тупикового типа и распределенным впрыском бензина через электромеханические форсунки. Выполнено экспериментальное исследование влияния на объемную производительность форсунки перепада давления топлива, длительности управляющего импульса и величины электрического напряжения. В качестве примера выбрана форсунка Denso 23209-39295 двигателя 2ZR-FXE автомобиля Toyota Prius PHV 4-го поколения. Применен стенд Autool ST160, а также разработано дополнительное электронное оборудование. На основе полученных результатов предложен аналитический аппарат для более точного определения текущего расхода топлива на неустойчивых режимах работы двигателя без необходимости установки на автомобиль дополнительных датчиков и оборудования.

**Ключевые слова:** ДВС, расход топлива, форсунка электромеханическая, неустойчивые режимы, топливная система.

**Abstract.** The internal combustion engine operates in unsteady modes for a significant part of the time when the vehicles is moving. This is unavoidable for vehicles with traditional power plants for the following reasons: 1) the need to regulate the power on the driving wheels, 2) the effective performance and environmental qualities of the engine in unsteady modes are often worse in relation to those in steady-state modes of operation; this is due to the influence of many factors and has been studied in many well-known scientific papers. Experimental studies of current fuel consumption, effective torque and environmental qualities of the engine at unsteady speeds are relevant. This is due to the complexity of the processes that take place in the units. Their main goal of these studies is to ensure greater adaptability of the internal combustion engine and power plant to work in unsteady modes. The methodology for determining the current fuel consumption when operating in an unsteady mode of an automobile internal combustion engine with external mixing and a dead-end fuel ramp with distributed gasoline injection through electromechanical injectors is improved in this article. An experimental study was carried out in the work. The injectors of the Denso 23209-39295 model of the 2ZR-FXE engine of the Toyota Prius PHV 4th generation vehicles is selected as an example. The fuel pressure drop, the duration of the electric control pulse and the magnitude of the electric voltage are considered as parameters that affect the volumetric performance of the injectors. The Autool ST160 stand and additional electronic equipment developed by the authors were used in the study. The result of the study is an analytical device for more accurate determination of the current fuel consumption in unsteady engine operating modes. The improved technique does not require the installation of additional sensors and equipment on the vehicles.

**Keywords:** internal combustion engines, fuel consumption, electromechanical injector, unsteady conditions, fuel system.

<i>Дата получения статьи:</i>	09.09.2024	†	<i>Date of manuscript reception:</i>	09.09.2024
<i>Дата принятия к публикации:</i>	17.10.2000	†	<i>Date of acceptance for publication:</i>	17.10.2000
<i>Дата публикации:</i>	25.12.2024	†	<i>Date of publication:</i>	25.12.2024

**Сведения об авторах:**

**Савенков Никита Владимирович** – кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация», ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
*e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru.*

ORCID: 0000-0003-3803-9528

**Золотарев Олег Олегович** – ассистент кафедры «Автомобильный транспорт, сервис и эксплуатация», ФГБОУ ВО «Донбасская национальная академия строительства и архитектуры»,  
*e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8631-390X>

**Authors' information:**

**Nikita V. Savenkov** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department «Automobile transport, service and operation» at Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, *e-mail: n.v.savenkov@donnasa.ru.*

ORCID: 0000-0003-3803-9528

**Oleg O. Zolotarev** – Assistant of the Department «Automobile transport, service and operation» at Donbass National Academy of Civil Engineering and Architecture, *e-mail: o.o.zolotarev@donnasa.ru.*

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8631-390X>

**1. Введение**

В условиях эксплуатации значительная доля времени движения автомобиля может приходиться на неустановившиеся режимы, которые характеризуются переменными значениями кинематической (скорости) и (или) силовой (крутящего момента) составляющих энергосилового потока на движителе (колесе). Например, для городской составляющей UDC (ECE-15) Нового европейского ездового цикла NEDC на эти режимы движения автомобилей категорий  $N_1$  и  $M_1$  приходится 40% общего времени цикла [1], а для перспективного ездового цикла WLTC автомобилей этих же категорий (на примере III класса энерговооруженности) приходится уже 88% [2].

Известно, что для автомобильных ДВС, которые являются основным источником необходимой для движения энергии (как для традиционных силовых установок, так и для гибридных электромобилей [2]), развиваемая эффективная мощность и эффективный удельный расход топлива на неустановившихся режимах могут в значительной мере отличаться от значений, полученных на соответствующих установившихся режимах работы. В эксплуатационных диапазонах режимов ДВС это ухудшение может составлять до 40% и более, что обусловлено нарушением смесеобразования, тепловой инерцией, изменением наполнения цилиндров и инерцией движущихся масс [3-9].

Таким образом, с целью снижения негативного влияния рассмотренных факторов на показатели эксплуатационных свойств автомобилей, актуальными являются задачи:

- 1) сокращения доли времени работы ДВС на неустановившихся режимах (в том числе, за счет применения гибридных силовых установок);
- 2) улучшения свойств ДВС на режимах разгона [3-8];
- 3) замещения менее выгодных неустановившихся режимов работы ДВС более выгодными [9, 10].

Для этого необходимы экспериментальные исследования экологических качеств и эффективных показателей ДВС, в том числе, его расхода топлива с учётом динамики неустановившихся режимов работы, что позволит:

- 1) моделировать и оценивать топливно-экономические показатели автомобилей в эксплуатационных условиях (в том числе, в различных ездовых циклах);
- 2) определять скоростные характеристики современных ДВС с учётом этих режимов и, как следствие, совершенствовать их конструкцию - подбирать рациональные исходные параметры, которые в процессе хода проектирования обеспечивали бы высокие эксплуатационные свойства автомобилей, а также уменьшение объёма трудоёмких и длительных по времени доводочных работ;
- 3) разрабатывать силовые установки и алгоритмы их управления, которые будут

исключать работу агрегатов на неэффективных режимах.

Для определения расхода топлива ДВС применяют способы:

- гравиметрический (весовой);
- объемный [14];
- термоанемометрический [3];
- углеродного баланса [2].

Применимость и эффективность каждого из них для определения текущего (условно-мгновенного) расхода топлива на неустановившихся режимах определяется выбранной методикой, характеристиками используемых приборов и оборудования, а также типом топливной системы испытуемого ДВС.

Например, для двигателей с аккумуляторной топливной системой и впрыском бензина через электромеханические форсунки известны методики определения текущего расхода топлива, основанные на объемном способе [11, 13, 15]. В [11] предлагается определять расход бензина через электромеханическую форсунку на основании анализа длительности управляющего электрического импульса. Работа [13] ориентирована на топливные системы с тупиковой рампой и содержит методику с дополнительным учётом перепада давления на форсунках.

На основе термоанемометрического способа для неустановившихся режимов также разработаны соответствующие методики, в частности, [3]. К их недостаткам стоит отнести необходимость размещения термоанометра в топливной системе автомобильного ДВС, а также невозможность определять цикловую подачу отдельно по цилиндрам.

Общим достоинством методик [11, 13, 15] является отсутствие необходимости в установке дополнительных датчиков и оборудования в топливную систему испытуемого двигателя. Их общим недостатком является отсутствие учета влияния на цикловую подачу величины электрического напряжения бортовой сети и температуры топлива, которые могут существенно отличаться от условий проведения предварительных испытаний на специализированных проливочных стендах.

## 2. Постановка целей и задач

Целью работы является усовершенствование методики определения расхода топлива электромеханической форсунки по длительности управляющих импульсов для определения цикловой подачи топлива на неустановившихся режимах работы, как для каждого отдельного цилиндра, так и автомобильного двигателя в целом.

Для достижения поставленной цели решены следующие задачи:

1. Выполнение теоретического обоснования усовершенствованной методики.
2. Выбор в качестве примера конкретной модели автомобильного двигателя.
3. Проведение экспериментальных исследований влияния режимных параметров форсунки на её производительность.
4. Разработка и предложение для применения соответствующей математической модели.

Предлагаемая методика включает три последовательных этапа:

1. Демонтаж форсунок с двигателя.
2. Выполнение цикла проливочных испытаний с целью определения характеристики динамической объемной производительности в виде зависимости от четырех параметров:
  - длительности управляющего электрического импульса;
  - перепада давления на форсунке;
  - величины электрического напряжения;
  - температуры топлива.
3. Разработка математической модели динамической производительности форсунки с учетом её функционального определения.
4. Установка форсунок на двигатель и последующее определение при движении автомобиля значений параметров разработанной модели с целью последующего расчета текущего расхода топлива.

Усовершенствование предлагаемой методики заключается в дополнительном учете влияния на производительность форсунки величины электрического напряжения бортовой сети автомобиля и температуры топлива.

В настоящей работе, в качестве примера, для выполнения исследований выбран двигатель модели 2ZR-FXE автомобиля Toyota

Prius RHV 4-го поколения. ДВС имеет внешнее смесеобразование, принудительное воспламенение топливо-воздушной смеси и оснащен аккумуляторной топливной системой распределенного фазированного впрыска бензина через электромеханические форсунки, топливная рампа тупикового типа. Такие системы относительно распространены в Российской Федерации и применяются на автомобилях отечественного и зарубежного производства категорий  $N_1$  и  $M_1$ , которые соответствуют экологическим классам Евро-3 и выше.

Схема топливной системы выбранного ДВС показана на рис. 1, элементы для улавливания паров топлива и электронные блоки не показаны. Форсунки работают при переменном перепаде давления, т.к. вместо регулятора давления дифференциального типа более ранних конструкций, применяется редуктор, поддерживающий в рампе постоянное давление топлива.

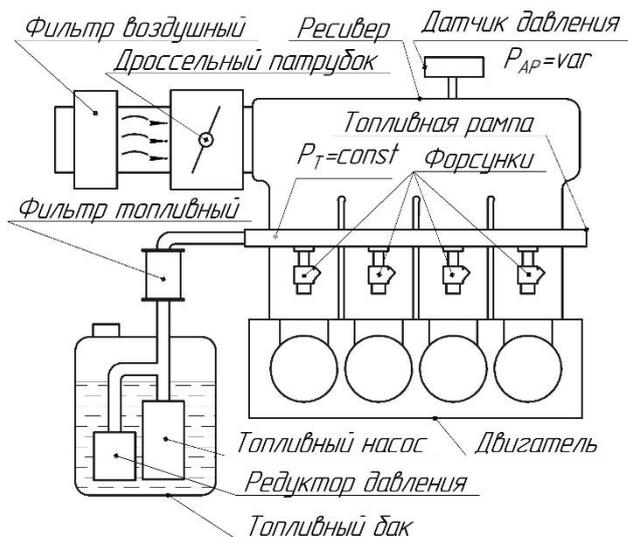


Рис. 1. Структурная схема топливной системы двигателя 2ZR-FXE

### 3. Теоретическое обоснование

Электромеханическая форсунка предназначена для дозирования и тонкого распыления топлива, представляет собой прецизионный гидравлический клапан с приводом от быстродействующего электромагнита [16]. Форсунка модели Denso 23209-39295 двигателя 2ZR-FXE показана на рис. 2. Количество впрыскиваемого топлива зависит от дли-

тельности импульса тока, определяемой контроллером автоматически для каждого режима работы двигателя.

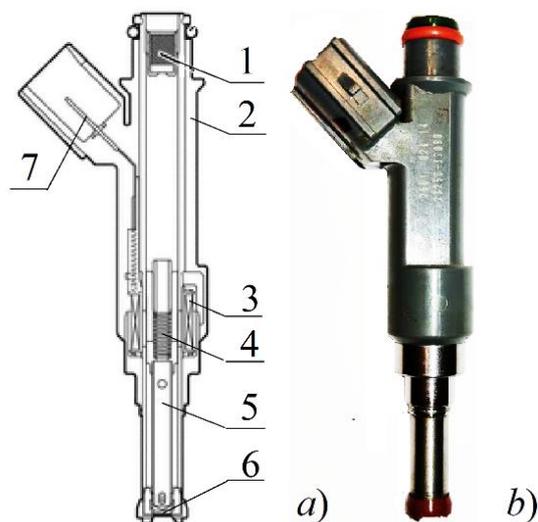


Рис. 2 Форсунка Denso 23209-39295:  
 а – конструкция; б - общий вид:  
 (1 – фильтр; 2 – корпус; 3 – обмотка электромагнита; 4 – возвратная пружина; 5 – якорь с иглой; 6 – распылитель)

Известно, что объемная подача форсунки за время  $t$  определяется выражением [11, 12]:

$$A = \int_0^t Q(t) dt = \int_0^t \mu F_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}} dt, \quad (1)$$

где  $Q(t)$  - зависимость объемной производительности форсунки (расхода) от времени  $t$ ;  $F_0$  - площадь проходного сечения распылителя форсунки;  $\Delta P$  - перепад давления топлива на форсунке (сумма избыточного давления в рампе  $P_T$  и вакуумметрического давления в ресивере системы впуска, определяемого как разность барометрического давления и абсолютного  $P_{AP}$ );  $\rho$  - плотность топлива;  $\mu$  - коэффициент расхода.

Для форсунок непрерывного впрыска функция  $Q(t)$  определяется их геометрическими характеристиками, величиной перепада давления и физико-механическими свойствами подаваемого топлива [12], и при постоянных значениях перечисленных параметров графически будет представлять собой прямую горизонтальную линию. В этом слу-

чае объемная подача  $A$  определится упрощенной зависимостью:

$$A = Q t. \quad (2)$$

Для форсунок импульсного действия, с помощью которых реализуется попарно-параллельный впрыск, фазированной впрыск (в том числе, многостадийный), функция  $Q(t)$  за время одного импульса (включающего процессы открытия, удержания в открытом положении и закрытия) показана на рис. 3.

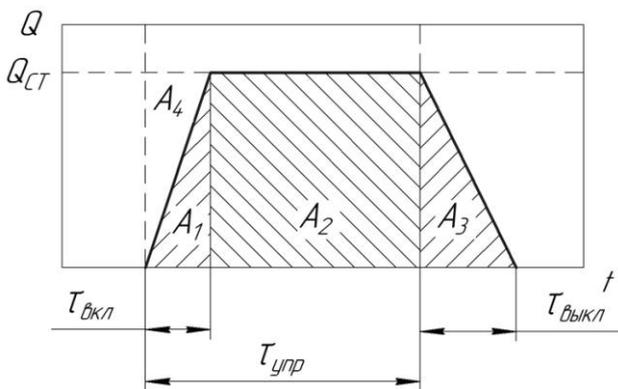


Рис. 3 Упрощенная зависимость производительности импульсной форсунки от времени

На графике  $\tau_{упр}$  - время управляющего электрического импульса (время, на протяжении которого на обмотку электромеханической форсунки подается напряжение),  $\tau_{вкл}$  и  $\tau_{выкл}$  - механические свойства форсунки: время включения (открытия) и выключения (закрытия) соответственно. Таким образом, время полного открытия форсунки составляет  $\tau_{упр} - \tau_{вкл}$ . На участке  $\tau_{вкл}$  производительность растет, а на участке  $\tau_{выкл}$  понижается, причём закон изменения функции  $Q(t)$  на этих участках может быть различным и зависит от множества факторов [16].

Практическую ценность при определении подачи топлива за один цикл форсунки составляет не сама форма функции  $Q(t)$  и значения времен  $\tau_{вкл}$  и  $\tau_{выкл}$ , а соответствующие площади  $A_1$ ,  $A_2$  и  $A_3$  (количества поданного топлива на участках открытия, открытого состояния и закрытия). Таким образом,

функция (1) для импульсной форсунки преобразована следующим образом:

$$A = t\Pi(A_1 + A_2 + A_3) = t\Pi(-\tau_{вкл}\alpha_\phi Q_{CT} + \tau_{упр}Q_{CT} + \tau_{выкл}\beta_\phi Q_{CT}), \quad (3)$$

где  $\Pi$  - частота управляющих импульсов, Гц;  $Q_{CT}$  - статическая производительность форсунки (рис. 3);  $\alpha_\phi$  и  $\beta_\phi$  - коэффициенты приведения продолжительности открытия и закрытия форсунки ко времени её открытого состояния по расходу топлива (значения коэффициентов зависят от ряда параметров: жёсткости возвратной пружины, усилия электромагнита и т.д.).

С учётом дополнительных преобразований формула (3) имеет вид:

$$A = \tau_{упр}t\Pi(Q_{CT} + \Lambda / \tau_{упр}), \quad (4)$$

$$\Lambda = Q_{CT}(\tau_{выкл}\beta_\phi - \tau_{вкл}\alpha_\phi) = A_3 - A_4,$$

где  $\Lambda$  - количество топлива, на которое изменяется подача форсунки за один импульс по отношению к её подаче при полном открытии за это время ( $\Lambda = 0$  если  $A_3 = A_4$ , т.е. при  $\alpha_\phi = \beta_\phi$ ).

Выполнив замену в (4) получаем:

$$A = \tau_{упр}t\Pi Q_a, \quad (5)$$

где  $Q_a$  - динамическая производительность форсунки.

Расход жидкости через местное сопротивление определяется выражением (1), [12]. С помощью этой зависимости в настоящей работе рассмотрена производительность полностью открытой форсунки  $Q_{CT}$ :

$$Q_{CT} = F_0 w = F_0 \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho \zeta_M}}, \quad (6)$$

где  $\zeta_M$  - суммарный коэффициент местного сопротивления;  $w$  - скорость истечения жидкости.

Таким образом, для конкретной модели форсунки и её технического состояния при известных свойствах топлива, зависимость (6) является функцией от следующих режимных параметров:

$$Q_{CT} = f(\Delta P, T), \quad (7)$$

где  $T$  – температура топлива, обуславливающая  $\rho$ .

В свою очередь, величина  $\Lambda$  (4) будет являться функцией, как от параметров выражения (7), так и дополнительно от величины управляющего электрического напряжения  $U$ , с ростом которого увеличивается скорость открытия форсунки [16].

Соответственно, при работе конкретной модели импульсной форсунки на некотором режиме, величина  $Q_a$ , определяющая подачу топлива  $A$  за время  $t$ , является функциональной зависимостью от следующих режимных параметров:

$$Q_a = f(\tau_{\text{ynp}}, \Delta P, U, T). \quad (8)$$

#### 4. Экспериментальные исследования

С целью экспериментального определения зависимости (8) в настоящем исследовании применен проливочный стенд модели Autool CT160, вид общий которого показан рис. 4.



Рис. 4. Процесс экспериментального определения динамической производительности форсунок Denso 23209-39295 на стенде Autool CT160

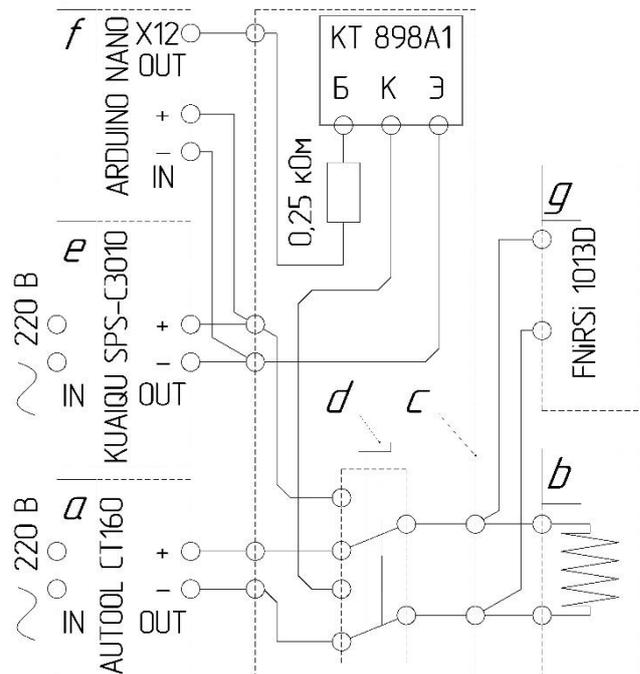


Рис. 5 Электрическая принципиальная схема управления форсункой

Стенд оснащался дополнительными гидравлическими приборами и оборудованием: манометром ДМ 05 ГОСТ 2405-88 модели 23.3829010 для более точного измерения величины  $\Delta P$  и топливным насосом SFP 0338 повышенной производительности с целью снижения пульсаций давления в рампе.

На рис. 5 приведена электрическая принципиальная схема подключения форсунки (-нок), примененная в ходе проведения стендовых экспериментов.

Серийный стенд «а» дополнительно оснащен:

1) осциллографом «g» модели FNiRSi 1013D, позволяющим исследовать осциллограмму напряжения на обмотке форсунки;

2) монтажным блоком «с», разработанным авторами и позволяющем дополнительно реализовать такие режимы управления форсункой «b», которые отсутствуют во встроенном программном обеспечении стенда; при подключении монтажного блока в управляющую цепь форсунки с помощью переключателя «d» управляющий электрический импульс формируется NPN транзистором KT 898A1, величина стабилизированного напряжения  $U$  постоянного тока плавно

устанавливается в блоке питания модели KUAQU SPS-C3010 «e», продолжительность импульса  $\tau_{упр}$  и их частота  $\Pi$  задаётся программой микроконтроллера Arduino «f».

Программа испытаний включала следующие режимы работы форсунок. Перепад давления  $\Delta P$  изменялся от 3 бар до 4 бар с шагом 0,1 бар; длительности управляющих импульсов  $\tau_{упр}$  составляли 2 мс, 4 мс, 7,5 мс, 10 мс, 15 мс; испытания проводились для трёх значений напряжения  $U$ : 11 В, 13 В и 15 В.

Для каждого режима испытаний рассчитывалась динамическая производительность форсунки  $Q_a$  [17]:

$$Q_a = \frac{10^3 V_i}{\tau_{упр} t_i \Pi_i}, \text{ мл/с}, \quad (9)$$

где  $V_i$  - объем тестовой жидкости, мл, набранный в мерную колбу стенда при работе форсунки с длительностью управляющего импульса  $\tau_{упр}$ , мс, и частотой впрыска  $\Pi_i$ , Гц, при выполнении  $i$ -го испытания суммарной продолжительностью  $t_i$ , с.

## 5. Результаты и обсуждение

Результаты экспериментального исследования приведены на рис. 6. Дробные обозначения зависимостей  $Q_a = f(\tau_{упр})$  содержат значения перепадов давления  $\Delta P$  и напряжений  $U$ , при сочетании которых они были определены (например, «4/15» означает, что результаты получены при  $\Delta P = 4$  бар и  $U = 15$  В).

В общем случае с уменьшением длительности управляющего импульса  $\tau_{упр}$  динамическая производительность  $Q_a$  снижается, что объясняется отрицательными значениями поправки  $\Lambda$  (4). График этого снижения имеет более сложную зависимость, чем, например, у электромеханических форсунок «Siemens deka» модели 6354 [13].

Также динамическая производительность снижается с уменьшением  $\Delta P$ , что связано со снижением статической производительности  $Q_{СТ}$  - эту закономерность отражает формула (6).

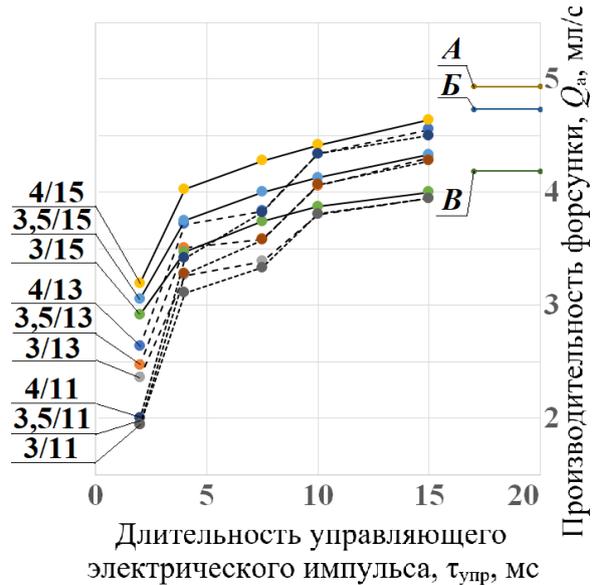


Рис. 6. Динамическая производительность форсунки Denso 23209-39295 по результатам экспериментальных исследований

Более сложное влияние на  $Q_a$  оказывает величина управляющего электрического напряжения  $U$ . При 15 В скорость снижения динамической производительности ( $dQ_a(\tau_{упр})/d\tau_{упр}$ ) увеличивается с уменьшением длительности впрыска  $\tau_{упр}$ . При более низких напряжениях (13 и 11 В) эта скорость в диапазонах  $[7,5 \text{ мс} < \tau_{упр} < 10 \text{ мс}]$  и  $\tau_{упр} < 4 \text{ мс}$  значительно превышает скорость изменения функции  $Q_a(\tau_{упр})$  на остальных диапазонах. Возможно это объясняется явлениями резонанса при соответствующих частотах. В общем случае падение напряжения оказывает большее относительное влияние на динамическую производительность с уменьшением  $\tau_{упр}$ . Например, для режима работы форсунки с длительностью управляющего импульса 15 мс и перепаде давления 4 бар, падение напряжения с 15 до 11 В влечет уменьшение динамической производительности на 2%, а для длительности 2 мс уже 37,4%.

Также на рис. 6 приведены полученные экспериментально значения статической производительности  $Q_{СТ}$  испытуемой форсунки («А» «Б» и «В» для давлений 4 бар, 3,5 бар и 3 бар). В соответствии с рекоменда-

циями [18] расчёт выполнялся как отношение набранного в мерную колбу объема тестовой жидкости к 15 с, в течение которых работала форсунка. Результаты соотносятся с допустимыми значениями для этой модели форсунки [18] (например, при нормативном диапазоне статической производительности 60...73 мл в течение 15 с и перепаде давления 3,1...3,5 бар, фактический расход форсунки в данных условиях при испытаниях составил 62,8...71 мл).

По результатам испытаний всех четырех форсунок двигателя 2ZR-FXE на предмет определения статической производительности разность величин составила не более 1%.

В работе [13] аппроксимация зависимости динамической производительности предложена в программной среде Mathcad с помощью кусочно-заданной сплайн-функции.

В настоящем исследовании с целью обеспечения возможности последующей работы с искомой функцией в среде других программных продуктов (Например, Microsoft Excel, PSIM и т.д.), выбрана соответствующая (4) аналитическая зависимость:

$$Q_a(\tau_{ynp}, \Delta P, U, T) = K_U(\tau_{ynp}, U) K_T(T) \times \left( Q_{cm}(\Delta P) - \frac{10^3 \Lambda(\Delta P, \tau_{ynp})}{\tau_{ynp}} \right), \quad (10)$$

где  $K_U$ ,  $K_T$  - коэффициенты учёта влияния величины электрического напряжения и температуры топлива, определяются соответственно формулами (13) и (14).

Установлено, что поправка  $\Lambda$  при работе форсунки является функцией не только от  $\Delta P$ , как это следует из (4), а имеет более сложное функциональное определение (т.е. коэффициенты  $\alpha_\phi$  и  $\beta_\phi$  не равны константам даже при постоянном  $\Delta P$ ); для аппроксимации выбрана колоколообразная функция принадлежности:

$$\Lambda(\Delta P, \tau_{ynp}) = \frac{e(\Delta P)}{1 + \left| \frac{\tau_{ynp} - c(\Delta P)}{a(\Delta P)} \right|^{b(\Delta P)}} + d(\Delta P) \quad (11)$$

где  $a(\Delta P)$ ,  $b(\Delta P)$ ,  $c(\Delta P)$ ,  $d(\Delta P)$ ,  $e(\Delta P)$  - функции изменения коэффициентов в зависимости от перепада давления, каждая их

которых аппроксимирована полиномом второй степени; например, для функции  $a(\Delta P)$ :

$$a(\Delta P) = -156.06 + 91.88\Delta P - 12.94\Delta P^2 \quad (12)$$

Соответствующие аппроксимирующие коэффициенты для остальных функций приведены в табл. 1. Также уравнение рассмотренного вида применено для описания зависимости  $Q_{CT}(\Delta P)$  и функций выражения (13).

Таблица 1

Коэффициенты функций динамической производительности форсунок

Аппроксимирующая зависимость (11)			
Обозначения функций	Значения коэффициентов		
$a(\Delta P)$	-156.06	91.88	-12.94
$b(\Delta P)$	-94.798	54.571	-7.357
$c(\Delta P)$	-174.14	104.18	-14.49
$d(\Delta P)$	-0.0171	0.0107	-0.0014
$e(\Delta P)$	-0.0705	0.0492	-0.00572
Статическая производительность			
Обозначение функции	Значения коэффициентов		
$Q_{CT}(\Delta P)$	-6.35	5.59	-0.6917
Аппроксимирующая зависимость (13)			
Обозначения функций	Значения коэффициентов		
$a(U)$	3.919	-0.42	0.0106
$b(U)$	173.36	-25.644	0.9613
$c(U)$	6.863	-0.655	0.0487
$d(U)$	7.383	-0.7063	0.0143

Для поиска приведенных в таблице коэффициентов применен эволюционный метод многопараметрической оптимизации, реализованный на языке VBA.

В настоящей работе предложено упрощенное функциональное определение коэффициента  $K_U$ , т.к. влияние перепада давления  $\Delta P$  на рассматриваемый коэффициент в эксплуатационном диапазоне режимных параметров форсунки незначительно:

$$K_U(\tau_{ynp}, U) = 1 - \frac{a(U)}{b(U) + (\tau_{ynp} - c(U))^2} - \frac{d(U)}{\tau_{ynp}^2} \quad (13)$$

Соответствующие экспериментальные данные показаны узловыми точками на рис. 7.

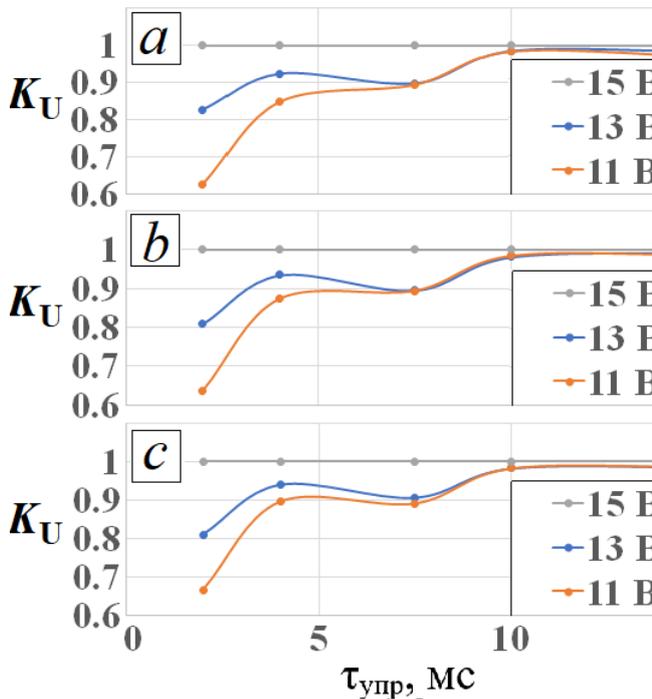


Рис. 7 Относительное влияние на динамическую производительность форсунки Denso 23209-39295 электрического напряжения и перепада давления топлива: а - 4 бар; б - 3,5 бар; в - 3 бар

$$K_T(T) = \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma(T - T_0)}}, \quad (14)$$

где  $\gamma$  - температурная поправка плотности топлива на 1 градус;  $T_0$  - температура, при которой экспериментально определена производительность форсунки на различных режимах;  $T$  - температура топлива в топливной рампе автомобиля, для которой рассчитывается производительность форсунки по формуле (10).

Зависимость (10) в графическом виде для трех уровней электрического напряжения (11, 13 и 15 В) показана на рис. 8.

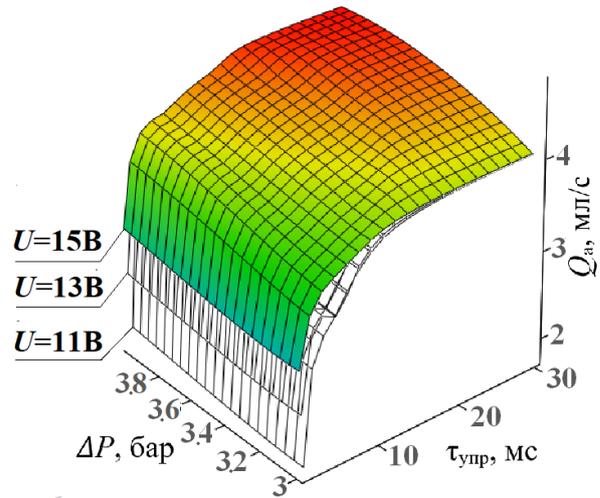


Рис. 8. Результаты аппроксимации динамической производительности форсунки Denso 23209-39295

### 6. Заключение

В работе выполнено обоснование актуальности разработки новых и усовершенствования известных методик определения текущего расхода топлива автомобильных ДВС на неустановившихся режимах работы, что обусловлено высокой конкуренцией производителей автомобилей, общим развитием конструкций силовых установок, а также ужесточением требований по обеспечению экологической безопасности. Для автомобилей, содержащих двигатели внутреннего сгорания с внешним смесеобразованием, рампой тупикового типа и распределенным впрыском топлива через электромеханические форсунки, предложена соответствующая усовершенствованная расчётно-экспериментальная методика.

На основании выполненного экспериментального исследования определено влияние на объемную производительность и, следовательно, на цикловую подачу электромеханической форсунки модели Denso 23209-39295 двигателя 2ZR-FXE автомобиля Prius PHV 4-го поколения, выбранного в качестве примера, следующих режимных параметров: перепада давления топлива, длительности управляющего импульса и величины электрического напряжения. Количество одновременно учитываемых параметров превышает таковое в известных методиках. Экспериментальные исследования подтвердили значительное влияние перечисленных

параметров на фактическую производительность форсунки. Например, изменение продолжительности управляющего электрического импульса может вызвать снижение производительности в 1,5 раза, колебание перепада давления – в 1,18 раза, а электрического напряжения – в 1,4 раза.

### Список литературы

1. ГОСТ Р 41.101-99. Единообразные предписания, касающиеся официального утверждения легковых автомобилей, оборудованных двигателем внутреннего сгорания, в отношении измерения объема выбросов диоксида углерода и расхода топлива, а также транспортных средств категорий М1 и N1, оборудованных электроприводом, в отношении измерения расхода электроэнергии и запаса хода Введ. 2000-07-01. М.: ИПК Издательство стандартов 2001. 41 с.

2. ГОСТ Р 59890-2021. Автомобильные транспортные средства. Выбросы загрязняющих веществ с отработавшими газами. Технические требования и методы испытаний на базе всемирной согласованной процедуры испытания транспортных средств малой грузоподъемности и испытаний в реальных условиях эксплуатации. Введ. 2022-04-01. М.: Российский институт стандартизации, 2022. 280 с.

3. Акатов Е.И., Белов П.М., Дьяченко Н.Х., Мусатов В.С. Работа автомобильного двигателя на неустойчивом режиме. Л.: Машгиз, 1960. 248 с.

4. Казаков С.А. Повышение эффективности неустойчивых режимов работы автотракторного дизеля 4Ч11/12,5 изменением физико-химических свойств топлива: дисс. ... канд. тех. наук. РУДН. М. 2012. 133 с.

5. Патрахальцев Н.Н. Неустойчивые режимы работы дизелей. Обзор. М.: НИИинформтяжмаш. 1976. 42 с.

6. Ждановский Н.С., Ковригин А.И., Шкрабак В.С., Соминич А.В. Неустойчивые режимы поршневых и газотурбинных двигателей автотракторного типа. Л.: Машиностроение, 1974. 224 с.

На основе полученных результатов предложен аналитический аппарат, позволяющий более точно определять текущий расход топлива ДВС на неустойчивых режимах работы без необходимости установки на автомобиль дополнительных датчиков и оборудования.

### References

1. GOST R 41.101-99. Uniform provisions concerning the approval of passenger cars equipped with an internal combustion engine with regard to the measurement of the emission of carbon dioxide and fuel consumption and of categories and vehicles equipped with an electric power train with regard to the measurement of electric energy consumption and range. Moscow, ИПК Izdatelstvo standartov, 2001. 41 p. (In Russian)

2. GOST R 59890-2021 Motor vehicles. Emissions of pollutants with exhaust gases. Specifications and test methods based on a globally harmonized vehicle test procedure light-duty and real-world testing exploitation. Moscow, Rossiyskiy institut standartizatsii 2022. 280 p. (In Russian)

3. Akatov E.I., Belov P.M., Dyachnko N.X., Musatov V.S. Rabota avtomobilnogo dvigatelya na neustanovivshemsya rezhime [Operation of an automobile engine in unsteady mode]. Leningrad, Mashgiz, 1960. 248 p. (In Russian)

4. Kazakov S.A. Increasing the efficiency of unsteady operating modes of the 4Ch11/12.5 automotive and tractor diesel engine by changing the physical and chemical properties of the fuel. Diss. Cand. Sci. (Engineering) Moscow. 2012. 133 p. (In Russian)

5. Patrakhaltsev N.N. Neustanovivshiesya rezhimy raboty dizelej. Obzor [Unsteady operating modes of diesel engines. Review]. Moscow, NIInformtyazhmash, 1976. 42 p. (In Russian)

6. Zhdanovskij N.S., Kovrigin A.I., Shkrabak V.S., Somnich A.V. Neustanovivshiesya rezhimy porshnevyyh i gazoturbinnykh dvigatelej avtotraktornogo tipa [Unsteady modes of piston and gas turbine engines of automobile and tractor type]. Leningrad, Mashinostroenie, 1974. 224 p. (In Russian)

7. Тырловой С.И. Моделирование переходных процессов высокооборотного автомобильного дизеля // Вестник СевНТУ. Вып. 122/2011. Серия: Машиностроение и транспорт. Севастополь, 2011. С. 47-49.

8. Патрахальцев Н.Н. Развитие методов испытания и диагностики ДВС при неустановившихся режимах работы // Двигателестроение. 1982. № 9 (45). С. 28-31.

9. Gorozhankin S.A., Bumaga A.D., Savenkov N.V. Improving car fuel efficiency by optimising transmission parameters // International Journal of Automotive and Mechanical Engineering, 2019, Vol. 16, No. 3. pp. 7019-7033.  
DOI: 10.15282/ijame.16.3.2019.14.0526.

10. Блохин А.Н. Разработка методики поиска рациональных передаточных чисел трансмиссии с учетом эксплуатационных свойств и назначения автомобиля: дисс. ... канд. тех. наук. НГТУ. Н., 2006. – 256 с.

11. Пойда А.Н., Сивых Д.Г., Карсекин Р.М. Определение расхода бензина на переходных режимах работы двигателя // Двигатели внутреннего сгорания. 2012. №2. С. 128-132.

12. Идельчик И.Е. Справочник по гидравлическим сопротивлениям. М.: Машиностроение, 1992. 671 с.

13. Савенков Н.В., Горожанкин С.А. Определение расхода топлива бензинового ДВС с рампой тупикового типа при работе на переходных режимах // Вестник СЧУ им. Владимира Даля. 2013. №15 (204) Ч. 2. С. 268-274.

14. ГОСТ 14846-2020 Двигатели автомобильные. Методы стендовых испытаний. Введ. 2021-06-01. М.: Стандартиформ. 2020. 96 с.

15. Васильев А.В., Березюков Д.С. Совершенствование диагностирования электромагнитных форсунок бензиновых двигателей на основе оценки их динамической производительности // Вестник Волгоградского государственного университета. Серия 10: Инновационная деятельность. 2012. № 6. С. 11-15.

16. Бакайкин Д.Д., Власов Д.Б., Ламзин В.А. Исследование работы электромаг-

7. Tyrlovoj S.I. Modeling of transient processes of high-speed automobile diesel engine. *Vestnik SevNTU. Seriya: Mashinostroenie i transport.* 2011. № 122, pp. 47-49. (In Russian)

8. Patrakhaltsev N.N. Razvitie metodov ispytaniya i diagnostiki DVS pri neustanovivshixsya rezhimax raboty [Development of methods for testing and diagnostics of internal combustion engines under unsteady operating conditions]. *Dvigatellestroenie.* 1982, No.9 (45), pp. 28-31. (In Russian)

9. Gorozhankin S.A., Bumaga A.D., Savenkov N.V. Improving car fuel efficiency by optimising transmission parameters. *International Journal of Automotive and Mechanical Engineering.* 2019, Vol. 16, No. 3. pp. 7019-7033.  
DOI: 10.15282/ijame.16.3.2019.14.0526.

10. Blokhin A.N. Development of a methodology for searching for rational transmission gear ratios taking into account the operational properties and purpose of the vehicle. Diss. Cand. Sci. (Engineering). Nizhniy Novgorod. 2006. 256 p. (In Russian)

11. Pojda A.N., Sivyx D.G., Karsekin R.M. Determination of gasoline consumption in transient engine operating modes. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*, 2012, No.2, pp. 128-132. (In Russian)

12. Idelchik I.E. Spravochnik po gidravlicheskim soprotivleniyam [Handbook of hydraulic resistances]. Moscow. Mashinostroenie, 1992. 671 p. (In Russian)

13. Savenkov N.V., Gorozhankin S.A. Determination of fuel consumption of a gasoline internal combustion engine with a dead-end ramp during operation in unsteady modes. *Vestnik SNU im. Vladimira Dalya.* 2013. No.15 (204) Part 2, pp. 268-274. (In Russian)

14. GOST 14846-2020 Automobile engines. Methods of bench tests. Moscow, Standartinform. 2020. 96 p. (In Russian)

15. Vasilev A.V., Berezyukov D.S. Improving the diagnostics of electromagnetic injectors of gasoline engines based on the assessment of their dynamic performance. *Vestnik Volgogradskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya 10: Innovacionnaya*

нитной форсунки // Актуальные вопросы агроинженерных наук в сфере технического сервиса машин, технологического оборудования и безопасности жизнедеятельности: Мат. Нац. (Всеросс.) научн. конф. Института агроинженерии, Челябинск, 24–26 февраля 2021 года. Ч.: ЮУГАУ. 2021. С. 7-14.

17. Ходяков А.А., Хлопков С.В., Басова В.В., Телков О.И., Космачева А.Д. Оценка технического состояния электромагнитных форсунок на стенде по погрешности измерения расхода тестовой жидкости // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. 2022. Т. 23, № 2. С. 146-154. DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154.

18. Techdoc - техническая информация по ремонту автомобилей TOYOTA/LEXUS [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.toyota-tech.eu> (дата обращения 04.09.2024).

deyatelnost. 2012, No.6, pp. 11-15. (In Russian)

16. Bakajkin D. D., Vlasov D. B., Lamzin V.A. Study of the operation of an electromagnetic injector. *Aktualnye voprosy agroinzhenernykh nauk v sfere texnicheskogo servisa mashin, texnologicheskogo oborudovaniya i bezopasnosti zhiznedeyatel'nosti: Materialy Nacionalnoy (Vserossiyskoy) nauchnyj konferentsii Instituta agroinzhenerii, Chelyabinsk, 24–26 fevralya 2021 goda.* 2021, pp. 7-14. (In Russian)

17. Xodyakov A.A., Xlopkov S.V., Basova V. V., Telkov O.I., Kosmacheva A.D. Assessment of the technical condition of electromagnetic injectors on a stand by the error in measuring the flow rate of test liquid. *Vestnik Rossijskogo universiteta druzhby narodov. Seriya: Inzhenernye issledovaniya.* 2022. Vol. 23, No. 2. pp. 146-154. DOI: 10.22363/2312-8143-2022-23-2-146-154. (In Russian)

18. Techdoc - technical information on repair of TOYOTA/LEXUS cars. Available at: <https://www.toyota-tech.eu>