Грузовик

3
2016

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

Учредитель ООО "Научно-техническое издательство "Инновационное машиностроение"
Главный редактор С.Н. ПЕДЕНКО

Редакционный совет

Д.Х. Валеев, д-р техн. наук
В.А. Волчков
С.М. Гайдар, д-р техн. наук
Л.В. Грехов, д-р техн. наук, проф.
В.А. Зорин, д-р техн. наук
Н.А. Иващенко, д-р техн. наук
В.В. Комаров, канд. техн. наук
В.А. Марков, д-р техн. наук, проф.
А.Н. Ременцов, д-р пед. наук, канд. техн. наук
О.Н. Румянцева, Ген. дир. ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
А.Ф. Синельников, канд. техн. наук, проф.
А.А. Солнцев, д-р техн. наук
В.С. Устименко, канд. техн. наук
Х.А. Фасхиев, д-р техн. наук, проф.
Н.Д. Чайнов, д-р техн. наук, проф.

Корпункт:
Я.Е. Карповский (г. Минск)

Адрес редакции:
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 12
Тел. (499) 269-48-96
E-mail: gruzovik@mashin.ru; http://www.mashin.ru

Адрес издательства
107076, Москва, Колодезный пер., дом 2-а, стр. 2
Тел. (495) 661-03-36

Журнал зарегистрирован Федеральной службой по надзору в сфере связи, информационных технологий, информационных технологий и массовых коммуникаций (Роскомнадзор).
Регистрационный номер ПИ № ФС 77-63955 от 09.12.2015 г.

Подписной индекс:
по каталогу "Роспечать" 373409,
по объединенному каталогу "Пресса России" 39799,
по каталогу "Почта России" 25782

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение», "Грузовик", 2016

Перепечатка материалов из журнала «Грузовик» возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала. При перепечатке материалов ссылка на журнал «Грузовик» обязательна.

За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель

В НОМЕРЕ:

Конструкция

3 *Блинов Е. И.* Динамика дифференциальных механизмов

13 *Марков В. А., Сивачев В. М., Сивачев С. М., Маркова И. Г.* Топливные элементы для транспорта

Исследования. Расчет

20 *Грехов Л. В., Драган Ю. Е.* Формирование характеристики впрыскивания топлива с помощью аккумуляторной топливной системы для малотоксичных дизелей наземных транспортных средств

25 *Батыщев Д. Ю., Рыжиков В. А., Ляшенко Ю. М., Череповский А. С.* Влияние топливных присадок на рабочие процессы и динамику работы ДВС

Транспортный комплекс

29 *Аржанухина С. П., Бобков А. В., Валиев Ш. Н., Кочетков А. В.* Автоматизированные комплексы хранения и подготовки противогололедных реагентов для содержания автомобильных дорог и мостов

34 *Дэн Чэнгун.* Роль автомобильной промышленности в процессе экспонентного развития экономики КНР

Практика

39 *Козловский В. Н., Заятров А. В., Панюков Д. И.* Информационно-аналитический метод определения ключевых проблем надежности в автомобилестроении

Безопасность

46 *Громов А. Ю.* Регулирование движения на кольцевой автомобильной дороге (КАД-СПб)

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Система Российского индекса научного цитирования www.elibrary.ru

Информация на сайте "Autotransportnik.ru"

Truck

3
2016

SCIENTIFIC-TECHNICAL AND INDUSTRIAL MAGAZINE

Founder JSC Scientific and Technical Publishing House "Innovative Engineering"
Editor-in-Chief S.N. PEDENKO

Editorial council

D.Kh. Valeev, dr.en.s.
V.A. Volchkov
S.M. Gaydar, dr.en.s., prof,
L.V. Grekhov, dr.en.s., prof.
V.A. Zorin, dr.en.s.
N.A. Ivashchenko, dr.en.s.
V.V. Komarov, PhD in en.s.
V.A. Markov, dr.en.s., prof.
A.N. Rementsov, dr.Hab, PhD in en.s.
O.N. Rumyantseva, General Director, JSC "Publisher "Innovative Engineering"
A.F. Sinel'nikov, PhD in en.s., prof.
A.A. Solntsev dr.en.s.
V.S. Ustimenko, PhD in en.s.
Kh.A. Faskhiev, dr.en.s., prof.
N.D. Chaynov, dr.en.s., prof.

Correspondent's office:
Ya.E. Karpovsky (Minsk)

Address of the editorial office:
107076, Moscow, Koiodezny Lane, house 2, p. 12
Ph. (499) 269-48-96
E-mail: qnjzovik@mashin.ru; snp748@yandex.ru
http://www.mashin.ru

Address of publishing house
107076, Koiodezny Lane, house 2, p. 2
Ph. (495) 661-03-36

The magazine is registered by the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology, Information Technology and Mass Communications (Roskomnadzor).
Registration number PI number FS77.-63955 on December 9, 2015

Subscription index:
according to the catalog "Rospechat" 373409,
according to the integrated catalog "Press of Russia" 39799,
according to the catalog "Russian Post" 25782

JSC Innovatsionnoye mashinostroyeniye Publishing House, "Truck", 2016

The reprint of materials from the "Truck" magazine is possible at obligatory written coordination with editorial office of the magazine. At the link to the "Truck" magazine is obligatory for a reprint of materials.

For contents of advertizing materials responsibility is born by the advertiser.

CONTENTS:

Design

3 *Blinov Yu. I.* Dynamic of differential mechanisms

23 *Markov V. A., Sivachev V. M., Sivachev S. M., Markova I. G.* Fuel Cells for Transport

Research. Calculation

20 *Grekhov L. V., Dragan Y. E.* Injection rate shaping with common rail for low-emission diesel engines of ground vehicles

25 *Batyshchev D.Yu., Ryzhikov V. A., Liashengko Yu.M., Cherepovsky A. S.* Influence fuel additiveson the working processes and dynamics of infernal combustion engines

Transportation complex

29 *Arzhanukhina S. P., Bobkov A. V., Valiyev Sh. N., Kochetkov A. V.* Automated complexes of storage and preparation of deicing reagents for the maintenance of highways and bridges

34 *Deng Chenggong.* The role of the automotive industry in the process of exponential development of China's economy

Practice

39 *Kozlovskiy V. N., Zaytrov A. V., Panyukov D. I.* Information-analytical method for determining the reliability of the key issues in the automotive industry

Security

46 *Gromov A. Yu.* Regulation of the movement on ring highway (Ring road SPb)

The magazine is included into the list of the approved VAK of the Russian Federation of editions for the publication of works of competitors of academic degrees

System of the Russian index of scientific citing www.elibrary.ru

Information on the site "Autotransportnik.ru"

УДК 629.113 (075.8)

Е. И. Блинов, канд. техн. наук, доцент, Московский государственный университет информационных технологий, радиотехники и электроники
E-mail: blinov-ti6-mgupi@mail.ru

ДИНАМИКА ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНЫХ МЕХАНИЗМОВ

Многозвенные динамические модели в собственных координатах, учитывающие внутренние упруго-демпфирующие и иные связи, в наибольшей степени соответствуют фундаментальному научному принципу объективной реальности. Динамическая модель дифференциального механизма формирует критически важное свойство пространственности двигательно-трансмиссионной установки.

Ключевые слова: *принцип объективной реальности, модель, дифференциальный механизм, двигательно-трансмиссионная установка.*

Yu. I. Blinov

DYNAMIC OF DIFFERENTIAL MECHANISMS

Multicomponent dynamic in own coordinates models that incorporate internal elastic-damping and other links relates to the fundamental scientific principle of objective reality to the maximum extent possible. Dynamic model of differential mechanism forms critically important property of 3-D model engine-transmission facility.

Keywords: *principle of objective reality, model, differential mechanism, engine-transmission facility.*

Современные мобильные машины (ММ) далеко несовершенны. Мы их терпим только потому, что из двух зол выбирают меньшее. Однако производители не торопятся решать проблему в отношении модернизации и тем более коренного обновления собственно конструкции ММ, отделываясь косметическими мерами, такими как электростеклоподъемники, подогрев сидений, круиз-контроль и т.п. Да и зачем — их продукция продается и так. В то же время инстинкт человечества к самосохранению неизбывен — оно не хочет и далее терпеть мастодонтов, самоедски тратящих энергию при минимуме полезной работы.

Одним из необходимых условий решения проблемы кардинального улучшения конструкций ММ является разработка современной общей (глобальной) модели их движения. Она должна быть пространственной (необходимым и достаточным условием является пространственное расположение внутренних связей, в то время, как протяженность тела вдоль осей X, Y, Z является необходимым, но недостаточным условием), динамической (учитывать внутренние упруго-демпфирующие и иные связи), структурированной (изменять число независимых координат с течением времени), в собственных координатах (неприведенной), а в качестве базового фрагмента использовать модель совместных колебаний двигательно-трансмиссионной установки (ДТУ) и подвески, которая может быть адаптирована для изучения всех основных качеств ММ — тяговой динамики, плавности хода, энергетики, тормозной динамики, управляемости, устойчивости, проходимости.

В данной публикации коснемся вопроса моделирования дифференциальных и планетарных механизмов (ДМ, ПМ), без чего нельзя создать адекватную модель пространственной ДТУ и, следовательно, общую модель ММ.

ДМ и ПМ играют заметную роль в силовых приводах многих ММ и используются в качестве КП, межосевых и межколесных узлов деления силового потока, механизмов поворота и т.д. Конструктивно

ДМ и ПМ состоят из одних и тех же элементов: трех центральных звеньев — водила (*h*), солнечного (*c*) и эпициклического (*k*) центральных зубчатых колес, а также сателлитов (*st*), причем в ПМ одно из звеньев заторможено, и поэтому в "жестких" моделях ПМ обладает одной степенью свободы ("жесткими" назовем модели, не учитывающие динамические упруго-демпфирующие связи между массами). ДМ не содержит заторможенного звена, и, таким образом, характеризуется двумя степенями свободы применительно к "жестким" моделям, причем, в реальных конструкциях, как правило, имеет вход на водило, а выход на центральные колеса.

Обзор научно-технической литературы показал, что доминируют "жесткие" модели ДМ и ПМ. При этом считается, что на вход ДМ или ПМ подается приведенный через передаточное число крутящий момент двигателя, что является неприемлемым допущением, искажающим сущность физического процесса, поскольку в трансмиссии крутящий момент двигателя (по существу, статическая величина) преобразуется в динамический момент упруго-демпфирующих сил, имеющий сугубо колебательный характер с зонами отрицательных значений. Таким образом, "жесткие" модели вполне уместно назвать статическими, так как они не содержат упругих связей, запасающих потенциальную энергию, и поэтому атрибутивно не приспособлены к описанию динамических колебательных процессов, физической основой которых является "перекачка" энергий типа Т-П-Т (кинетическая—потенциальная—кинетическая). Это противоречит фундаментальному принципу научных исследований — принципу объективной реальности. Например, введение упруго-демпфирующих связей *n* сателлитов при двух независимых координатах для каждого из них приводит к описанию ДМ с $3 + 2n$ степенями свободы, а не с двумя, как в "жесткой" модели. Учет динамических взаимодействий качественно меняет математическую модель ДМ и ПМ, существенно усложняя ее, но вследствие этого модель приобретает принципиально иной уровень, переходя из класса статических "жестких" моделей в класс динамических. В последней формуле числа 3 и 2 — количество независимых координат соответственно центральных звеньев и каждого сателлита, вращающегося одновременно вокруг собственной оси o' и центральной оси o механизма.

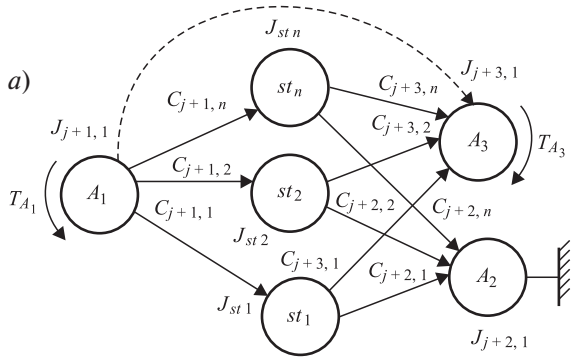
В некоторых моделях динамические связи все же учитываются, но другой крайностью является пренебрежение сателлитами. Это, как минимум, нелогично, так как именно сателлиты связывают центральные звенья механизма воедино и именно сателлиты благодаря двум степеням свободы доставляют ему свойство дифференциализма, позволяя выполнять функции, которыми не обладают рядные передачи.

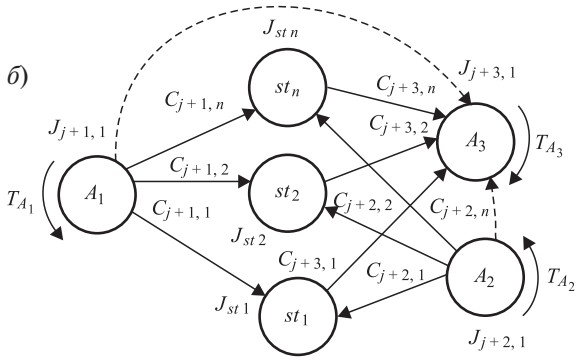
Известны три режима работы сателлитов, при которых происходит трансформация полезного момента: передающий, когда одно звено заторможено, а сателлиты "передают" силовой поток с незаторможенного входного звена на незаторможенное выходное; суммирующий при двух входных и одном выходном звеньях; раздающий при одном входном и двух выходных звеньях, причем первый режим характерен для ПМ, а остальные для ДМ. (Режимы холостого хода и прямой передачи тривиальны и здесь не рассматриваются.)

После сказанного можно сформулировать цель работы: разработать и реализовать динамическую модель ДМ (и как частный случай — ПМ), включающую описание работы сателлитов в общем виде, т.е. для всех указанных режимов.

Для математического описания работы механизма его расчетную схему целесообразно представить в виде орграфа, где сплошными стрелками указывается направление силовых потоков через сателлиты, задающее вполне определенный режим работы ДМ или ПМ. На рис. 1, *а*, *б*, *в*, даны динамические орграфы в передающем, суммирующем и раздающем режимах. При этом пусть в первом случае силовой поток направлен к водилу при заторможенном любом центральном колесе, во втором — к водилу, в третьем — от водила. Во всех случаях считаем, что массой A_1 является входная масса (в суммирующем режиме — массы A_1 и A_2); выходной — A_3 (в раздающем A_3 и A_2); если есть заторможенное звено, то это масса A_2. Входной будем называть массу, на которую приходит силовой фактор; выходной является масса, с которой момент упруго-демпфирующих сил уходит на следующий участок силовой цепи. Массы обладают моментами инерции *J*, которые, как и крутильные жесткости *C* связей, имеют двойную индексацию, где первый индекс означает порядковый номер вала, второй — номер элемента на данном валу. При этом в целях общности отсчет порядковых номеров элементов локальной модели механизма начинается с некоторого *j*-го вала; сателлиты обладают своим рядом номеров, не совпадающим ни с каким другим. Кроме того, для облегчения понимания на рис. 1 присутствуют вспомогательные пунктирные стрелки, указывающие направление силовых или кинематических связей непосредственно между входной (входными) и выходной (выходными) массами.

Для всех трех случаев выложим дифференциальные уравнения (ДУ), записанные относительно





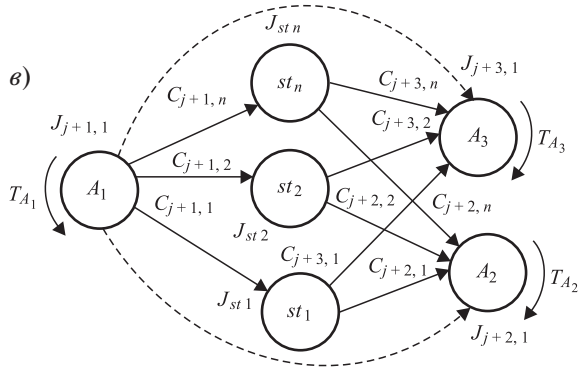


Рис. 1. Орграфы:

а — ПМ в передающем режиме работы сателлитов; *б* — ДМ в суммирующем; *в* — ДМ в раздающем. Для всех схем — коэффициенты *K* демпфирования, учитывающие диссипацию энергии, имеют те же индексы, что и коэффициенты жесткости, но на схемах не показаны

независимых координат α. Причем первые три ДУ описывают вращение центральных звеньев вокруг центральной оси *o* механизма, последующие — вращение *i*-х, $i = 1, ..., n$, масс сателлитов вокруг собственных осей *o′* и оси *o* соответственно.

$$\left.\begin{aligned}
&J_{j+1,1}\ddot{\alpha}_{j+1,1} = T_{A_1} - \sum^{i=n} T_{j+1,i};\\
&J_{j+3,1}\ddot{\alpha}_{j+3,1} = \sum^{i=n} T_{j+3,i} - T_{A_3};\\
&\dot{\alpha}_{j+2,1} = 0;\\
&J_{st\,i\,o'}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o'} = -\left(T_{j+1,i}/r_{A_1}\right)r_{st\,i}u_{k,st} + \left(T_{j+2,i}/r_{A_2}\right)r_{st\,i};\\
&J_{st\,i\,o}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o} = P_{j+1,i}r_{A_1}u_{k,st} + P_{j+2,i}r_{A_2} - P_{j+3,i}r_{A_3}.
\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

$$\left.\begin{aligned}
&J_{j+1,1}\ddot{\alpha}_{j+1,1} = T_{A_1} - \sum^{i=n} T_{j+1,i};\\
&J_{j+2,1}\ddot{\alpha}_{j+2,1} = T_{A_2} - \sum^{i=n} T_{j+2,i};\\
&J_{j+3,1}\ddot{\alpha}_{j+3,1} = \sum^{i=n} T_{j+3,i} - T_{A_3};\\
&J_{st\,i\,o'}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o'} = -\left(T_{j+1,i}/r_{A_1}\right)r_{st\,i}u_{c,st} +\\
&+\left(T_{j+2,i}/r_{A_2}\right)r_{st\,i}u_{k,st};\\
&J_{st\,i\,o}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o} = P_{j+1,i}r_{A_1}u_{c,st} + P_{j+2,i}r_{A_2}u_{k,st} - P_{j+3,i}r_{A_3}.
\end{aligned}\right\} \quad (2)$$

$$\left.\begin{aligned}
&J_{j+1,1}\ddot{\alpha}_{j+1,1} = T_{A_1} - \sum^{i=n} T_{j+1,i};\\
&J_{j+2,1}\ddot{\alpha}_{j+2,1} = u_{st,c}\sum^{i=n} T_{j+2,i} - T_{A_2};\\
&J_{j+3,1}\ddot{\alpha}_{j+3,1} = u_{st,k}\sum^{i=n} T_{j+3,i} - T_{A_3};\\
&J_{st\,i\,o'}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o'} = -\left(T_{j+2,i}/r_{A_2}\right)r_{st\,i} + \left(T_{j+3,i}/r_{A_3}\right)r_{st\,i};\\
&J_{st\,i\,o}\ddot{\alpha}_{st\,i\,o} = P_{j+2,i}r_{A_2} + P_{j+3,i}r_{A_3} - P_{j+1,i}r_{A_1}.
\end{aligned}\right\} \quad (3)$$

Здесь T_{A_m}, $T_{j+m,i}$, $m = 1, 2, 3$ — моменты внешних сил и внутренних связей, где

$$T_{j+m,i} = C_{j+m,i}\left(\alpha_{j+m,1} - \alpha_{st\,i\,o'}u_{A_m,st}\right) +$$
$$+ K_{j+m,i}\left(\dot{\alpha}_{j+m,1} - \dot{\alpha}_{st\,i\,o'}u_{A_m,st}\right)$$

и

$$T_{j+m,i} = C_{j+m,i}\left(\alpha_{st\,i\,o'} - \alpha_{j+m,1}u_{st,A_m}\right) +$$
$$+ K_{j+m,i}\left(\dot{\alpha}_{st\,i\,o'} - \dot{\alpha}_{j+m,1}u_{st,A_m}\right),$$

если момент направлен от ведущего *m*-го звена к ведомому *i*-му сателлиту и от ведущего *i*-го сателлита к ведомому *m*-му звену соответственно; *r* — радиус массы (делительной окружности), указанной в индексе; *u* — передаточное число между звеньями,

например, $u_{c,st} = \dot{\alpha}_c/\dot{\alpha}_{st}$; P — упруго-демпфирующая сила связи, отмеченной в первом индексе, например, в последнем уравнении системы (3) без учета знака $P_{j+2,i} = T_{j+2,i}/r_{A_2}$. В (1)—(3) и везде далее индексы при координатах α и их производных совпадают с индексами масс, которым они принадлежат.

Системы (1)—(3) потенциально являются частью общей системы ОДУ, описывающей работу двигательно-трансмиссионной установки [1]. Однако сначала следует убедиться в адекватности локальной модели механизма и ее ЭВМ-реализации, и только тогда она может быть встроена в общую модель.

На рис. 2—4 для всех трех случаев (1)—(3) применительно к ГМ даны результаты ЭВМ-решений системы ОДУ с помощью стандартной подпрограммы

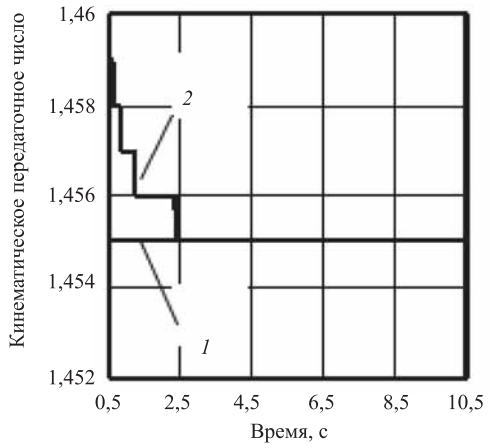


Рис. 2. Зависимости $u_{ст}$, $u_{кин} = f(\tau)$ от эпицикла к водилу при заторможенном солнце:

1 — статическое (не изменяющееся во времени) передаточное число; *2* — кинематическое передаточное число

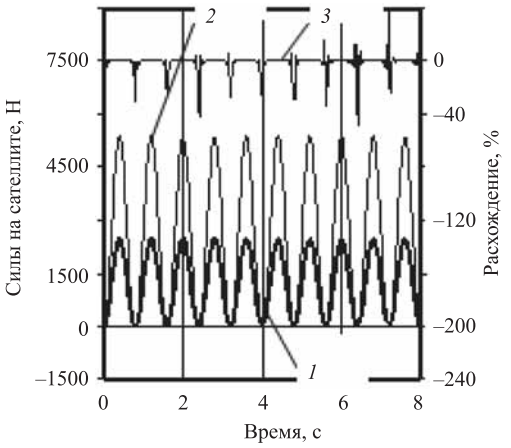


Рис. 3. Процессы протекания активных сил на сателлите и их расхождения с силовым фактором на выходе

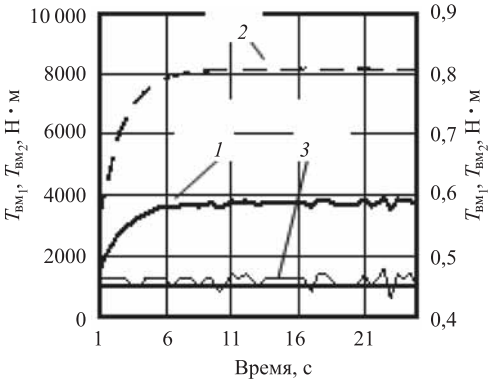


Рис. 4. Зависимости выходных моментов и их соотношения от времени

HPCG, реализующей метод Рунге—Кутты 4-го порядка с предикт-корректором Милна—Хемминга; для всех представленных здесь и далее иллюстраций ЭВМ-расчеты осуществлялись с шагом интегрирования $\Delta\tau = 0{,}001$ с. При этом адекватность модели оценим схождением $u_{кин}$ и $u_{ст}$ для системы (1); расхождением $\{[(P_{c,st} + P_{k,st}) - P_{h,st}]/P_{h,st}\}100$ % активных сил на сателлите — для системы (2); схождением отношений $T_{вм\,c}/T_{вм\,k}$ и r_c/r_k для системы (3), индекс "вм" означает принадлежность параметра к выходной массе механизма.

Крутящий входной момент имитировался без учета работы ФС как мгновенно прикладываемый к ведущей массе приведенный момент $T_{дв}$ двигателя (для системы при двух входах $T_{A_1} = T_{A_2} = T_{дв}/2$), а выходной — как приведенный момент сопротивления движению; моменты инерции центральных звеньев имитируют инерционные свойства отброшенных ведущей (ведущих) и ведомой (ведомых) ветвей ДТУ. Значения динамических параметров в каждом из трех случаев одинаковы: моменты инерции для входной, выходной масс и сателлита $J_{h,k,c} = 372$, $J_{h,k,c} = 42$, $J_{st} = 0{,}012$ кг · м^2 (при двух входных или выходных массах соответствующие моменты инерции брались вдвое меньше); коэффициенты крутильных жесткостей и демпфирования связей $C_{st\leftrightarrow c} = 3400$, $C_{st\leftrightarrow k} = 3200$, $C_{st\leftrightarrow h} = 17\,000$ Н · м/рад, $K_{st\leftrightarrow c} = 3{,}7$, $K_{st\leftrightarrow k} = 3{,}2$, $K_{st\leftrightarrow h} = 11{,}6$ Н · м · с/рад (величины $C_{st\leftrightarrow c}$ и $C_{st\leftrightarrow k}$, $K_{st\leftrightarrow c}$ и $K_{st\leftrightarrow k}$ взяты разными, поскольку их теоретическое равенство невозможно реализовать; символ "$\leftrightarrow$" означает, что величина данного динамического параметра берется одной и той же как для направления силового потока от сателлита к центральному звену, так и от центрального звена к сателлиту). Величины конструктивных параметров: масса ГМ $m_а = 13$ т; $r_{st} = 0{,}06$, $r_k = 0{,}22$, $r_c = 0{,}1$ м (для сим-

метричного ДМ $r_{st} = r_k = r_c = 0{,}1$ м); передаточные числа пары постоянного зацепления, коробки передач на 1-й передаче и бортового редуктора равны $u_o = 1{,}5$, $u_{\text{кп}\,1} = 5{,}25$, $u_{\text{р}} = 5{,}5$; радиус ведущей звездочки $r_{\text{к}} = 0{,}31$ м; коэффициент сопротивления качению $f_o = 0{,}1$.

На рис. 2 представлены статическое и кинематическое передаточные числа $u_{\text{ст}} = u^c_{k,h} = 2\, r_h/r_k = 1{,}455$ (прямая *1* с ординатой 1,455) и $u_{\text{кин}} = \dot{\alpha}_{\text{вщ}}/\dot{\alpha}_{\text{вм}}$ (ступенчатая линия *2*; ступенчатый вид зависимости объясняется дискретностью значений аргумента при построении графика значительно большей, чем шаг интегрирования $\Delta\tau$). Как видим, только вначале $u_{\text{кин}} \neq u_{\text{ст}}$, что объясняется мгновенным приложением входного момента. Однако, начиная с $\tau = 2{,}5$ с, равенство $u_{\text{кин}} = u_{\text{ст}}$ соблюдается в точности в рассматриваемом временном диапазоне. Вывод соотношения $u^c_{k,h} = 2r_h/r_k$ представляет собой чисто техническую задачу, и не вдаваясь в подробности скажем, что это делается с помощью известного в теормеханике приема МЦС.

Рис. 3 содержит кривые *1* и *2* колебательного процесса сил $P_{c,st}$ и $P_{k,st}$, действующих на сателлит со стороны ведущих солнечного и эпициклического колес соответственно. Кривая *3* зависимости $\{[(P_{c,st} + P_{k,st}) - P_{h,st}]/P_{h,st}\}$ показывает расхождение в процентах между суммой активных сил и выходной силой $P_{h,st}$ (в идеале должно быть $P_{c,st} + P_{k,st} = P_{h,st}$). Как видно, это расхождение находится вблизи нулевой ординаты, за исключением отдельных пиков, по времени совпадающих с минимальными значениями сил. Это объясняется тем, что даже небольшое несовпадение в последнем равенстве при малых величинах сил, в процентном отношении становится существенным, несмотря на то что в абсолютном исчислении разность $(P_{c,\,st} + P_{k,\,st}) - P_{h,\,st}$ гораздо меньше, чем в других временных интервалах.

Рис. 4 показывает изменение выходных моментов на связях солнца и эпицикла (кривые *1* и *2* соответственно, левая шкала ординат). При этом несимметричность ДМ, равная отношению $r_c/r_k = 0{,}455$ (прямая с ординатой 0,455 по правой шкале), должна совпадать с отношением $T_{\text{вм}\,c}/T_{\text{вм}\,k}$ (ломаная *3*, проходящая вблизи ординаты 0,455). Как видим, расхождение менее 5 %.

Таким образом, во всех случаях наблюдается удовлетворительное схождение проверочных показателей, что говорит об адекватности принятой концепции работы ДМ и ПМ, отраженной в ДУ (1)—(3).

Все предыдущие расчетные схемы и ДУ содержат сателлиты и их связи. Но во многих случаях, например, когда важно знать реакции не столько локальной динамической системы ПМ, сколько общей крутильной системы ДТУ—подвеска, влиянием сателлитов можно пренебречь.

Неучет сателлитов должен быть корректно обоснован. Важно прояснить, насколько это может повлиять на основные силовые или кинематические характеристики ПМ. При этом возьмем наиболее общий случай, имея в виду отсутствие заторможенного звена, характеризующего передающий режим работы сателлитов. Из двух оставшихся режимов — суммирующего и раздающего — остается проанализировать только последний, поскольку суммирующий режим *уже* предполагает знание величин обоих входных моментов, причем для определенности будем считать, что входным звеном является водило, а выходными — солнце и эпицикл, хотя это замечание совершенно не важно, поскольку постоянство соотношения величин выходных моментов, о котором, как о важнейшем факторе обоснования пренебрежением сателлитами, будет идти речь ниже, наблюдается и при других сочетаниях входного и выходных звеньев. (В скобках напомним, что вход на водило, а выход на солнце и эпицикл характерно для ДМ колесных машин.)

Важнейшим свойством ДМ является его способность *автоматически* поддерживать постоянное соотношение моментов на выходных валах солнца и эпицикла, характеризуемое неизменной величиной кинематического параметра p:

$$p = -z_k/z_c = -r_k/r_c, \qquad (4)$$

где z и r соответственно число зубьев и радиус делительной окружности зубчатых колес; индексы "k", "c" означают принадлежность параметра к эпициклическому и солнечному колесам. При этом следует иметь в виду, что параметр p имеет знак "+" при вращении солнца и эпицикла в одну сторону и знак "–" при вращении в разные стороны. В частности, выражение (4) справедливо для ряда типа $2k - h$ при внутреннем зацеплении сателлитов и эпицикла. Отметим, что для симметричного ДМ $z_k = z_c$ и $r_k = r_c$, тогда $p = -1$. Во многих случаях отмеченное выше свойство ДМ лишь констатируется, но механика происходящих при этом взаимодействий остается за кадром. Попробуем разобраться.

Нет необходимости доказывать, что условия работы выходных ветвей ДМ лишь теоретически принимаются неизменными (статическими). На самом деле в силу разных причин эти условия беспрерывно меняются, но, тем не менее, ДМ не изменяет указанное соотношение. Почему это происходит? Ответ на этот вопрос во многом проясняет дальнейшие усилия по разработке математической модели работы ДМ.

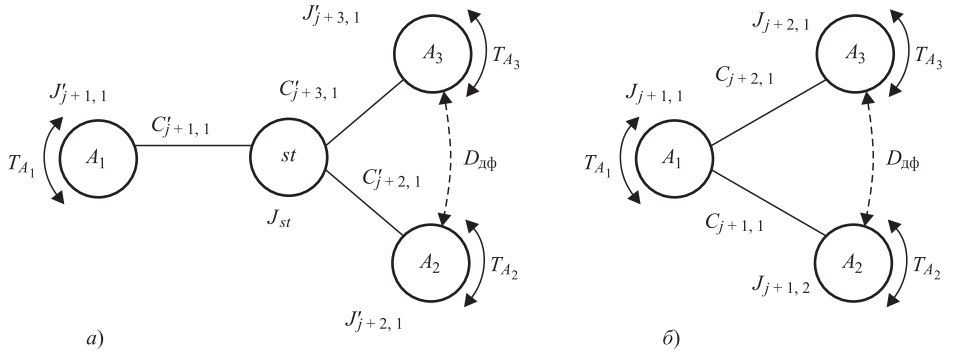


Рис. 5. Графы ДМ:
а — с одним сателлитом; *б* — усеченный граф

Пусть при ведущем водиле по каким-либо причинам (например, вследствие неравенства величин крутильных жесткостей полуосей, при движении по кривой, неравенства по бортам радиусов колес и т.д.) возникла или постоянно присутствует несимметричность силовых возмущений на валах солнца и эпицикла. Это приводит к неравенству выходных моментов ДМ. Сателлит, который можно рассматривать как равноплечий равносильный рычаг 1-го рода (под равносилием понимается равенство сил на концах рычага) с опорой в своей оси, при возникновении несимметричности из равноплечего равносильного с соотношением реакций $R_{c,st} = R_{k,st}$ превращается в неравносильный при $R_{c,st} \neq R_{k,st}$. При этом, пренебрегая трением в оси, возникает восстанавливающий момент $T = (R_{c,st} - R_{k,st})r_{st}$, поворачивающий сателлит вокруг его оси на некоторый угол в сторону большей силы до возвращения свойства равносилия, что в симметричных ДМ приводит к восстановлению равенства выходных моментов, а в несимметричных — заданного их соотношения относительно оси механизма.

Таким образом, если суть работы сателлитов идентифицировать постоянством отношения моментов на выходных валах, то при разработке общей модели ДТУ оказывается возможным пренебречь влиянием сателлитов. Это не только корректно упрощает математическую модель ДМ, но и позволяет дезавуировать силовую связь между выходными массами солнца и эпицикла. В то же время связь между этими массами целесообразно учитывать в виде кинематического передаточного числа $u_{кин} = \dot{\alpha}_{вщ}/\dot{\alpha}_{вм}$, где индексы "вщ" и "вм" принадлежат солнцу или эпициклу в зависимости от того, какая из этих масс является ведущей, а какая ведомой. Также следует подчеркнуть, что величина $u_{кин}$ в общем случае не должна совпадать с величиной параметра p, поскольку они характеризуют разные стороны взаимодействий в ДМ. Так, в частности, при движении на повороте скорости полуосевых шестерен симметричного ДМ различны, и, следовательно, $u_{кин} \neq 1$, но величина параметра p, как показано, поддерживается механизмом неизменной во времени и равной единице.

Не следует считать описанный процесс силовых взаимодействий дискретным. Если пренебречь трением в оси сателлита и инерцией его массы, то поворот сателлита происходит при бесконечно малой величине восстанавливающего момента, и именно поэтому водитель не чувствует резких толчков или рывков со стороны ДМ, а машина не теряет таких важных качеств, как устойчивость и управляемость. По существу, сателлит постоянно находится в угловом движении, так как нарушаются силовые соотношения, и сателлит призван их восстанавливать. Даже при движении на прямой траектории, например, сателлит межколесного симметричного ДМ испытывает колебательное движение с незначительно малыми перемещениями вокруг своей оси.

Последовательность преобразований системы (см. рис. 1) с целью исключения сателлитов состоит в том, что сначала их число уменьшается до одного (рис. 5, *а*) путем суммирования моментов инерции и параллельно включенных упруго-демпфирующих связей сателлитов:

$$J_{st} = \sum^{i=n} J_{st\,i};\ C'_{j+m,1} = \\ = \sum^{i=n} C_{j+m,i};\ K'_{j+m,1} = \sum^{i=n} K_{j+m,i}, \tag{5}$$

а затем инерционно-упругие параметры пересчитываются по следующим зависимостям (в окончательном виде усеченный граф ДМ показан на рис. 5, *б*):

$$\left.\begin{aligned} &J_{j+1,1} = J'_{j+1,1} + J_{st}\left[e_{21}/(e_{11}+e_{21})\right];\\ &J_{j+1,2} = J'_{j+2,1}/u^2_{st,A_2} + 0,5J_{st}\left[e_{12}/(e_{12}+e_{22})\right];\\ &J_{j+2,1} = J'_{j+3,1}/u^2_{st,A_3} + 0,5J_{st}\left[e_{12}/(e_{12}+e_{23})\right];\\ &C_{j+1,1} = \\ &= 0,5C'_{j+1,1}\left(C'_{j+2,1}/u^2_{st,A_2}\right)/\left(0,5C'_{j+1,1} + C'_{j+2,1}/u^2_{st,A_2}\right);\\ &C_{j+2,1} = \\ &= 0,5C'_{j+1,1}\left(C'_{j+3,1}/u^2_{st,A_3}\right)/\left(0,5C'_{j+1,1} + C'_{j+3,1}/u^2_{st,A_3}\right), \end{aligned}\right\} \tag{6}$$

где при входном водиле:

$$C'_{j+1,1} = Cr_h^2,\ \ e'_{j+1,1} = 1 / C'_{j+1,1},$$

здесь C — линейная жесткость подшипниковой опоры сателлита; $e_{11} = e'_{j+1,1}$; $e_{12} = 2e'_{j+1,1}$; $e_{22} = e'_{j+2,1}u^2_{st,A_2}$;

$$e_{21} = \left(e'_{j+2,1}u^2_{st,A_2}e'_{j+3,1}u^2_{st,A_3}\right) / \left(e'_{j+2,1}u^2_{st,A_2} + e'_{j+3,1}u^2_{st,A_3}\right);$$

$$e_{23} = e'_{j+3,1}u^2_{st,A_3}.$$

Что касается коэффициентов демпфирования, то по данным ряда работ они определяются рассеянием в подшипниковых опорах сателлитов и равны

$$\left.\begin{aligned} K_{j+1,1} &= 2C_{j+1,1}K_{st}/C_{st}; \\ K_{j+2,1} &= 2C_{j+2,1}K_{st}/C_{st} \end{aligned}\right\},$$

где $C_{j+1,1}$, $C_{j+2,1}$ — жесткости графа из (6); $K_{st} = Kr_h^2$, $C_{st} = Cr_h^2$ — приведенные к крутильным линейные коэффициенты K и C демпфирования и жесткости подшипниковой опоры сателлита. Заметим, что графически моменты T_A изображены в виде двухсторонних стрелок, имея в виду, что при описании в общем виде на одну и ту же массу (например, водила) в разных структурных состояниях механизма может действовать как входной (движущий) момент, так и выходной момент сопротивления.

В (6): динамические параметры с надстрочным индексом "′" берутся из рис. 5, *а*; величины моментов инерции J_{st} сателлитов при их присоединении к солнечному и эпициклическому колесам вычисляются относительно собственной оси, а при присоединении к водилу — относительно оси механизма по формуле $J_{st\,o} = J_{st\,o'} + m_{st}(r_{st} + r_c)^2$, где $J_{st\,o'}$ — собственный момент инерции сателлита относительно собственной оси o'; m_{st} — масса сателлита. Суть соотношений (6) состоит в приведении динамических параметров ДМ к валу массы A_1, которой чаще всего является водило.

Здесь следует обратить внимание на то, что обычно, например, в [2], считается, что все связи треугольного графа (см. рис. 5, *б*) являются силовыми, т.е. такими, на которых возникает силовой фактор; конструктивными носителями силовой связи в ДТУ являются либо вал, либо зубья зацепления. В то же время можно привести качественный пример, показывающий, что связь между выходными массами A_2 и A_3 может быть только кинематической, но не силовой; на рис. 5 кинематическая связь обозначена как $D_{дф}$. Известно, что при остановленном водиле выходные массы солнца и эпицикла в симметричном ДМ вращаются в разные стороны (этот случай соответствует прекращению вращения карданного вала при торможении трансмиссионным стояночным тормозом). Ясно, что в этом случае силовая связь между выходными массами невозможна.

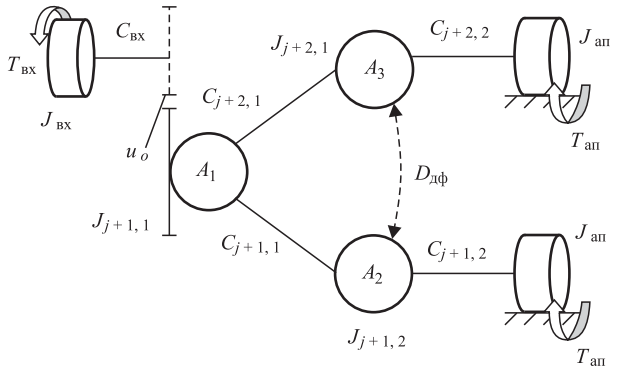


Рис. 6. Усеченная модель ДТУ:

$T_{вх}$, $J_{вх}$, $C_{вх}$ — параметры отброшенной додифференциальной части ДТУ; u_o — передаточное число; A_1 — водило, A_2 — солнце, A_3 — эпицикл. Коэффициенты K демпфирования имеют тот же индекс, что и коэффициенты жесткостей, но на схеме не отображены

В целом динамический граф (рис. 5, *б*) вполне пригоден для составления ДУ, однако в практических задачах он должен быть встроен в ДТУ (рис. 6). Параметры с подстрочным индексом "вх" эквивалентны додифференциальной (входной) части ДТУ с учетом передаточного числа u_o пары главной передачи центрального редуктора, если это межколесный ДМ, или соответствующей пары раздаточной КП, если это межосевой ДМ, поскольку, как правило, корпус ДМ (водило) связан с ведомой шестерней этой пары; в случае отсутствия передачи $u_o = 1$. Коэффициенты крутильной жесткости $C_{j+1,2}$, $C_{j+2,2}$ и моменты инерции $J_{а\,л}$, $J_{а\,п}$ имитируют левую (индекс "л") и правую (индекс "п") выходные ветви усеченной системы ДТУ. Безынерционная краевая масса, примыкающая к $C_{вх}$ и изображенная пунктиром, осуществляет только кинематическую связь. Введение безынерционных масс является обычным приемом при составлении динамических расчетных схем, и, не вдаваясь в подробности, отметим, что здесь эта масса выполняет чисто формальную функцию и не влияет на существо рассматриваемой темы.

Представим ДУ усеченной системы ДТУ, изображенной на рис. 6 ($u_р$ — передаточное число бортового редуктора, при его отсутствии $u_р = 1$):

$$\left.\begin{aligned} J_{вх}\ddot{\alpha}_{вх} &= T_{вх} - T_{уд\,вх}; \\ J_{j+1,1}\ddot{\alpha}_{j+1,2} &= T_{уд\,вх}u_o - T_{уд\,j+1,1} - T_{уд\,j+2,1}; \\ J_{j+1,2}\ddot{\alpha}_{j+1,2} &= T_{уд\,j+1,1} - T_{уд\,j+1,2}; \\ J_{j+2,1}\ddot{\alpha}_{j+2,1} &= T_{уд\,j+2,1} - T_{уд\,j+2,2}; \\ J_{а\,л}\ddot{\alpha}_{а\,л} &= T_{уд\,j+1,2} - T_{а\,л}/u_р; \\ J_{а\,п}\ddot{\alpha}_{а\,п} &= T_{уд\,j+2,2} - T_{а\,п}/u_р. \end{aligned}\right\} \quad (8)$$

Внешние силовые факторы $T_{\text{вх}}$, $T_{\text{а л}}$, $T_{\text{а п}}$ описываются по принятым законам, например, первый из них может быть приведенным крутящим моментом ДВС, а последние два — моментами сопротивления движению движителей левого и правого бортов.

Выражения для моментов $T_{\text{уд вх}}$, $T_{\text{уд } j+1,2}$, $T_{\text{уд } j+2,2}$ упруго-демпфирующих сил на участках с коэффициентами крутильных жесткостей $C_{\text{вх}}$, $C_{j+1,2}$, $C_{j+2,2}$ тривиальны:

$$T_{\text{уд вх}} = C_{\text{вх}}\left(\alpha_{\text{вх}} - \alpha_{j+1,1}u_o\right) + \\ + K_{\text{вх}}\left(\dot{\alpha}_{\text{вх}} - \dot{\alpha}_{j+1,1}u\right)_o; \quad (9)$$

$$T_{\text{уд } j+1,2} = C_{j+1,2}(\alpha_{j+1,2} - \alpha_{\text{а л}}) + \\ + K_{j+1,2}(\dot{\alpha}_{j+1,2} - \dot{\alpha}_{\text{а л}}); \quad (10)$$

$$T_{\text{уд } j+2,2} = C_{j+2,2}\left(\alpha_{j+2,2} - \alpha_{\text{а п}}\right) + \\ + K_{j+2,2}\left(\dot{\alpha}_{j+2,2} - \dot{\alpha}_{\text{а п}}\right). \quad (11)$$

Исключение составляют моменты $T_{\text{уд } j+1,1}$, $T_{\text{уд } j+2,1}$, привносящие собственно дифференциальные связи в систему, в связи с чем выражения для них составляются с учетом уравнения Виллиса:

$$\left.\begin{aligned} &T_{\text{уд } j+1,1} = C_{j+1,1}\left[(1-p)\alpha_{j+1,1} - \left(\alpha_{j+1,2} - p\alpha_{j+2,1}\right)\right] + \\ &+ K_{j+1,1}\left[(1-p)\dot{\alpha}_{j+1,1} - \left(\dot{\alpha}_{j+1,2} - p\dot{\alpha}_{j+2,1}\right)\right]; \\ &T_{\text{уд } j+2,1} = C_{j+2,1}\left[(1-p)\alpha_{j+1,1} - \left(\alpha_{j+2,1} - p\alpha_{j+1,2}\right)\right] + \\ &+ K_{j+2,1}\left[(1-p)\dot{\alpha}_{j+1,1} - \left(\dot{\alpha}_{j+2,1} - p\dot{\alpha}_{j+1,2}\right)\right]. \end{aligned}\right\} \quad (12)$$

Для симметричного ДМ при $p = -1$ эти выражения вырождаются в

$$T_{\text{уд } j+1,1} = C_{j+1,1}\left[2\alpha_{j+1,1} - \left(\alpha_{j+1,2} + \alpha_{j+2,1}\right)\right] + \\ + K_{j+1,1}\left[2\dot{\alpha}_{j+1,1} - \left(\dot{\alpha}_{j+1,2} + \dot{\alpha}_{j+2,1}\right)\right];$$

$$T_{\text{уд } j+2,1} = C_{j+2,1}\left[2\alpha_{j+1,1} - \left(\alpha_{j+2,1} + \alpha_{j+1,2}\right)\right] + \\ + K_{j+2,1}\left[2\dot{\alpha}_{j+1,1} - \left(\dot{\alpha}_{j+2,1} + \dot{\alpha}_{j+1,2}\right)\right].$$

Здесь обратим внимание на одно принципиальное обстоятельство. Выражения (10) и (11) представляют собой динамические моменты на участках с коэффициентами крутильных жесткостей $C_{j+1,2}$ и $C_{j+2,1}$ (см. рис. 6). В то же время эти участки являются ветвями привода движителей левого и правого бортов (с равным правом можно говорить и о межосевом приводе). Таким образом констатируется, что представленная модель ДМ (разумеется, при ее реализации) приводит не только к более глубокому пониманию явления, не только превращает плоскостную модель в пространственную, что само по себе чрезвычайно важно, но, и как видим, автоматически решает фундаментальную прикладную задачу распределения *динамических* моментов по ветвям привода. Подчеркнем — динамических моментов, т.е. реальных моментов упруго-демпфирующих сил изменяющихся во времени, а не статических крутящих моментов, не существующих в действительности.

Работу усеченного графа ДМ можно описать и применительно к случаю суммирующего режима. Если за основу взять рис. 6, то входными массами системы и ДМ будут $J_{\text{а л,п}}$ и $J_{j+1,1}$, $J_{j+2,1}$ соответственно при выходной массе $J_{j+1,1}$. Учитывая противоположное направление силового потока и не касаясь простого вопроса составления ДУ, запишем выражения для моментов УДС на участках $j + 1{,}1$ и $j + 2{,}1$:

$$\begin{aligned} &T_{\text{уд } j+1,1} = C_{j+1,1}\left[\left(\alpha_{j+1,2} - p\alpha_{j+2,1}\right) - (1-p)\alpha_{j+1,1}\right] + \\ &+ K_{j+1,1}\left[\left(\dot{\alpha}_{j+1,2} - p\dot{\alpha}_{j+2,1}\right) - (1-p)\dot{\alpha}_{j+1,1}\right]; \\ &T_{\text{уд } j+2,1} = C_{j+2,1}\left[\left(\alpha_{j+2,1} - p\alpha_{j+1,2}\right) - (1-p)\alpha_{j+1,1}\right] + \\ &+ K_{j+2,1}\left(\left(\dot{\alpha}_{j+2,1} - p\dot{\alpha}_{j+1,2}\right) - (1-p)\dot{\alpha}_{j+1,1}\right). \end{aligned} \quad (13)$$

При этом контрольным соотношением должно быть равенство суммы данных моментов и момента на следующем участке по ходу потока мощности с учетом передаточного числа. Из сравнения (12) и (13) видно, что эти выражения отличаются лишь знаками слагаемых в квадратных скобках, характеризующими противоположные направления силового потока.

Корректная реализация математической модели — это первостепенная задача любого исследования, поскольку декларированная модель не имеет самостоятельной ценности. От этого зависит не только доверительность к модели, но и в конечном итоге ценность любого исследования.

В реальных конструкциях ГМ и КМ динамические параметры имеют разную величину по ветвям привода как в силу прежде всего структуры трансмиссии, но также и по другим здесь не обсуждаемым причинам. В силу несимметрии система также должна ответить асимметричной реакцией (в симметричной системе и кинематические, и силовые реакции ветвей одинаковы). В плоскостных схемах ДТУ эти различия невозможно учесть, в то время как пространственная модель обязана отражать эти взаимодействия.

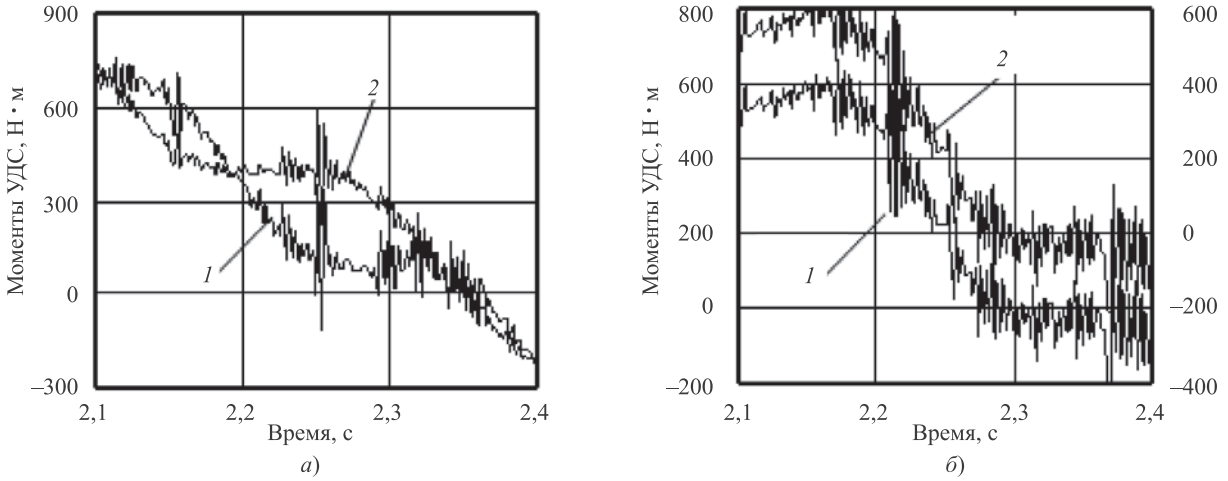


Рис. 7. Иллюстрация динамических процессов в ветвях привода:

а — при разных (штатных) значениях коэффициентов жесткостей; *б* — при одинаковых.
Для обоих рисунков: *1* — момент на участке левой ветви, *2* — на участке привода правого борта. Разгон на 1-й передаче на ровной горизонтальной дороге; симметричные модель и схема подвески; в планетарных механизмах включена прямая передача

За доказательствами обратимся к рис. 7, *а*, *б*, на которых изображены зависимости протекания моментов упруго-демпфирующих сил (УДС) на выходных участках вторичного вала двухвальной ОКП гусеничного вездехода на базе БМП-1, являющихся одновременно входными в ПМП гусениц левого и правого бортов. Конструктивно они имеют разные величины коэффициентов крутильных жесткостей как на каждой передаче, так и по передачам (на 1-й исследуемой передаче 30,0 и 26,3 кН · м/рад соответственно).

Из рис. 7, *а*, видно, что как характер, так и величины динамических моментов существенно различаются. Это негативно влияет на протекание динамических процессов в ДТУ и, следовательно, в целом на процесс движения машины. Перераспределение моментов на участках ДТУ означает, что один борт работает в режиме торможения по отношению к другому, когда момент на ведущем колесе этого борта меньше, чем на другом, и наоборот. Это ухудшает и управляемость, и устойчивость, и проходимость, и энергосберегающие свойства ГМ.

В то же время при одинаковых величинах жесткостей динамические процессы протекают симметрично (см. рис. 7, *б*). Если привести обе кривые к одному масштабу (на рисунке моменту на участке привода левой гусеницы соответствует левая ось ординат, на участке привода правой — правая), то они сольются. К одинаковому характеру протекания динамических моментов в симметричных ветвях привода следует стремиться, но это возможно только при равенстве величин их динамических параметров. Однако, например, в отношении исследуемой машины конструктивными мерами выполнить требование равенства жесткостей на всех передачах на вторичном выходном валу ОКП невозможно — надо менять ее структуру.

Многие классы машин имеют механизмы блокировки ДМ. Из (12) видно, что для этого достаточно положить $p = 0$. В этом случае дифференциальные связи рвутся, поскольку выражения для моментов упруго-демпфирующих связей механизма приобретают структуру, характерную для цепной системы. Кроме прямого назначения, в частности, это можно использовать при организации разветвления цепной системы, известного под названием "разветвление на массе", но без дифференциальной связи между выходными массами.

При этом заметим, что формальное истолкование выражения $p = r_k/r_c = 0$ недопустимо, ибо понятно, что радиус (или число зубьев) зубчатого колеса не может быть равен нулю. По существу, речь идет о том, что при блокировке ПМ или ДМ система переходит в другое структурное состояние, при котором уменьшается число независимых координат, поскольку массы водила, солнечного и эпициклического колес, а также сателлитов начинают вращаться с одинаковой скоростью. В этом случае равенство $p = 0$ с точки зрения реализуемого ЭВМ-алгоритма означает, что в некоторый момент времени, соответствующий началу движения системы в блокированном режиме, значения углов поворота масс механиз-

ма обнуляются (при запоминании "старых" величин), а в дальнейшем рассчитываются как обычно. При выходе из режима блокировки "старые" значения углов поворота масс ДМ суммируются с теми, которые были получены в момент окончания движения в этом состоянии.

Выводы по работе

Научная ценность. Переход от статической модели ДМ и ПМ к динамической означает не только большую адекватность пространственной модели, но и выводит ее на качественно иной уровень, позволяющий глубже проникнуть в сущность явлений, происходящих при движении ММ. Представленная модель отличается: учетом упруго-демпфирующих связей всех элементов системы; введением в модель сателлитов с их динамическими связями; описанием работы сателлитов во всех режимах — передающем, суммирующем, раздающем; выражениями для моментов УДС, реализующих собственно свойство дифференциализма, с учетом уравнения Виллиса; дезавуированием силовой связи между выходными массами.

Практическое значение. ЭВМ-реализация модели позволяет решать прикладные задачи, касающиеся проектирования как собственно ДМ и ПМ, так и всего силового привода, включая задачу распределения *динамических* моментов по его ветвям. В оптимизационной постановке вопроса это приводит к улучшению многих технико-эксплуатационных показателей, в том числе и энергосберегающих характеристик обновленной конструкции ММ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Блинов Е. И.** К основам создания динамической теории сложноструктурированных механических систем. Тяговая динамика (двигательно-трансмиссионная установка). Ж-л "Грузовик", 2015, № 6.
2. **Силовые** передачи транспортных машин: Динамика и расчет/ С. В. Алексеева, В. Л. Вейц, Ф. Р. Геккер, А. Е. Кочура. — Л.: Машиностроение, Ленингр. отд., 1982. — 256 с.

Специалисты ЧЕТРА провели экспертизу запасных частей

Сотрудники "ЧЕТРА-Промышленные машины" и завода "Промтрактор" провели анализ качества комплектующих собственного производства, а также аналогов и контрафакта, чтобы наглядно продемонстрировать — в долгосрочой перспективе приобретение неоригинальной запасной части может дорого обойтись владельцу спецтехники.

Специалисты "ЧЕТРА-ПМ" выявили ряд "зацепок" котрые позволят потребителям быть более бдительными и идентифицировать оригинальные запчасти.

1. Отсутствие самоклеящейся этикетки на изделии или групповой упаковке запасных частей, отражающие конкретные характеристики изделия и дату упаковки.

2. Отсутствие уникального штрих-кода, что обеспечивает идентификацию каждой единицы продукции, позволяет накапливать информацию об истории производства, выходного контроля, перемещения запчасти на рынке. Даже одинаковые запчасти имеют различные внутренние штрих-коды, с помощью которых легко проверить подлинность, дату производства, когда и кому отгружены.

3. Отсутствие сертификата качества — упаковочного листа изделия, который в обязательном порядке учитывается в информационной системе завода-производителя и ОАО "ЧЕТРА-ПМ" и заверяется штампом ОТК.

В свою очередь, "ЧЕТРА ПМ" предприняла меры по защите собственной оригинальной продукции: запасные части маркируются этикеткой с двумя уникальными штрих-кодами, с помощью которых легко проверить подлинность, дату производства, когда и кому они отгружены; продукцию сопровождает сертификат качества, в котором прописаны гарантийные обязательства "ЧЕТРА-ПМ" и завода-изготовителя детали.

Пресс-служба компании "ЧЕТРА"

УДК 621.436, 621.352.6

В. А. Марков, В. М. Сивачев, С. М. Сивачев, И. Г. Маркова

ТОПЛИВНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ДЛЯ ТРАНСПОРТА

Представлены предпосылки применения топливных элементов в автомобильных силовых установках, принцип их действия и особенности работы. Рассмотрены возможные области применения топливных элементов и выполненные конструкции автомобилей с топливными элементами. Проведен анализ преимуществ и недостатков использования топливных элементов в качестве автомобильных силовых установок, а также перспектив внедрения топливных элементов на транспорте.

Ключевые слова: *автомобиль, силовая установка, двигатель внутреннего сгорания, топливный элемент, топливная экономичность, токсичность отработавших газов.*

V. A. Markov, V. M. Sivachev, S. M. Sivachev, I. G. Markova

FUEL CELLS FOR TRANSPORT

Basis for the usage of fuel cells in automobile power installations, the principle and features of their functioning are presented. Possible fields of the usage of fuel cells and the designed structures of automobiles with fuel cells are considered. Analysis of advantages and disadvantages of the usage of fuel cells as automobile power installations, and also of opportunities of fuel cells usage in vehicles is carried out.

Keywords: *vehicle, automobile power installation, internal combustion engine, fuel cell, fuel efficiency, exhaust gases toxicity.*

Поиск альтернативных источников энергии для транспорта

Неизбежное истощение мировых запасов нефти и других полезных ископаемых, постоянно возрастающий спрос на моторные топлива и необходимость удовлетворения все более жестких требований к показателям токсичности отработавших газов (ОГ) автомобильных двигателей вынуждают двигателестроителей вести интенсивные поиски нетрадиционных энергоносителей для транспорта [1—3]. В ряде стран для автомобильной техники уже достаточно широко применяются такие альтернативные топлива, как природный газ, сжиженный углеводородный газ (пропан-бутановые смеси), биотоплива (биодизельное топливо, биоэтанол) [4—6]. Проводятся исследования и по другим альтернативным топливам (синтетические топлива из различных сырьевых ресурсов, эфиры, газообразный и сжиженный водород, биогаз) [7—9].

Отдельное направление исследований в области альтернативных источников энергии для транспорта представляют поисковые работы по применению топливных элементов — устройств, генерирующих электроэнергию непосредственно на борту транспортного средства за счет процесса, обратного гидролизу [8—13]. При этом в процессе реакции водорода и кислорода образуется вода и вырабатывается электрический ток, используемый для привода колес автомобиля. В качестве водородсодержащего топлива, как правило, используется либо сжатый водород, либо метанол.

Уже в ближайшей перспективе прогнозируется широкомасштабное использование различных альтернативных топлив. Евросоюзом планируется к 2020 г. перевести около четверти (23 %) всего автомобильного парка Европы на альтернативные топлива: природный газ — 10 % (23,5 млн автомобилей), биогаз — 8 % (18,8 млн автомобилей), водород (топливные элементы) — 5 % (11,7 млн автомобилей) [4].

История появления топливных элементов

Топливные элементы (ТЭ) были открыты еще в первой половине XIX века английским физиком и химиком Уильямом Гроувом (1811—1896), занимавшимся электролизом (разложением) воды с получением водорода и кислорода. При проведении опытов с водородом и кислородом в 1838—1839 гг. он обнаружил, что при отключении электролитической ячейки от батареи электроды начали поглощать выделившийся газ и вырабатывать ток. Однако мощность лабораторной установки была очень маленькой даже по меркам того времени, поэтому на открытие Гроува практически не обратили внимания. Сам термин "топливный элемент" (Fuel Cell) был предложен в 1889 г. Людвигом Мондом и Чарльзом Лангером, которые создавали устройство для выработки электричества из воздуха и угольного газа. Только в 1952 г. английский инженер Френсис Т. Бэкон создал первую, представляющую практический интерес, батарею водно-щелочных водородно-кислородных топливных элементов мощностью 5 кВт.

В начале XX века топливными элементами заинтересовалась космическая отрасль. В 1965 г. щелочные топливные элементы были испытаны в США на космическом корабле "Джемини-5", в дальнейшем — на кораблях "Аполлон" для полетов на Луну и по программе "Шатл". Ведущими разработчиками топливных элементов были корпорации UTC Fuel Cells, Siemens и Union Carbide [14].

В СССР с 1966 г. РКК "Энергия" разрабатывала топливные элементы для советской лунной программы. В конце 80-х гг. прошлого века в СССР на Уральском электрохимическом комбинате (УЭХК) был создан модуль электрохимического генератора "Фотон" на щелочных топливных элементах с номинальной мощностью 10 кВт для многоразового орбитального корабля "Буран". Энергетическая установка корабля состояла из четырех модулей (для увеличения общей мощности установки за счет объединения нескольких модулей). КПД энергоустановки достигал 60 %, гарантированный ресурс составил 2000 ч.

Следующий этап развития топливных элементов начался в 90-е гг. прошлого века в связи с проблемой ухудшающейся экологической обстановки, усиливающегося парникового эффекта, а также истощением запасов полезных ископаемых [4, 15]. Так как в топливном элементе конечным продуктом сгорания водорода является вода, то они считаются наиболее чистыми с точки зрения влияния на окружающую среду.

Основы принципа действия топливных элементов

Топливный элемент представляет собой электрохимический генератор, служащий для прямого преобразования химической энергии углеводородного топлива в электрическую энергию непосредственно на борту автомобиля. Этот генератор содержит гальванический элемент в виде анода и катода, разделенных электролитом (проводник ионов), обеспечивающий окислительно-восстановительную реакцию при непрерывной подаче водорода и кислорода в зону реакции. В среде электролита находятся два электрода — катод и анод, к которым поступают окислитель и восстановитель (топливо) соответственно. Чаще всего окислителем служит кислород, а восстановителем — водород. В качестве электролита обычно применяется щелочная среда. Электроды соединены проводом, служащим в энергоустановках внешней цепью нагрузки.

Электрическая энергия генерируется путем подачи топлива на анод, а на катод поступает окислитель. Особенность работы электрохимического генератора заключается в разделении на катализаторе анода атома водорода на протоны и электроны. В дальнейшем протоны проходят через мембрану к катоду, а электроны поступают во внешнюю цепь, так как мембрана пропускает только протоны. На катализаторе молекула кислорода соединяется с электроном и протоном с образованием воды.

Принцип работы топливного элемента основан на следующих электрохимических процессах (рис. 1) [8—14]. На аноде электрохимического генератора водород реагирует с гидроксид-ионами, т. е. идет реакция электрического окисления водорода

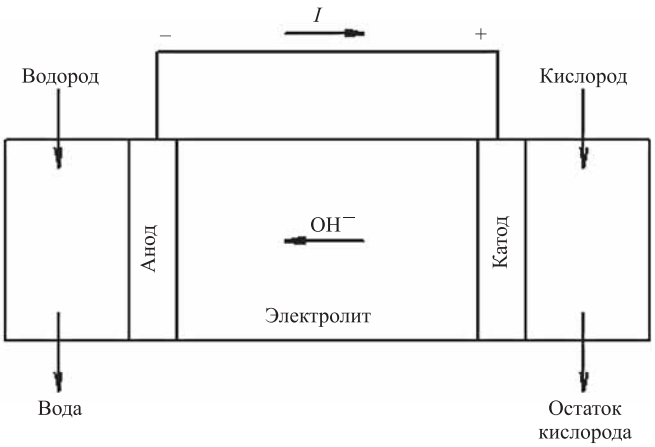


Рис. 1. Схема работы кислород-водородного топливного элемента

с образованием воды и свободных электронов, которые по проводнику двигаются к катоду:

$$2H_2 + 4OH^- \rightarrow 4H_2O + 4e^-.$$

На катоде протекает реакция электрического восстановления кислорода:

$$4e^- + O_2 + 2H_2O \rightarrow 4OH^-.$$

Таким образом, результирующей будет следующая окислительно-восстановительная реакция:

$$2H_2 + O_2 \rightarrow H_2O^-.$$

Очевидно, что результирующая реакция идентична обычной реакции окисления водорода (такой процесс называют "холодным горением" топлива). Однако в данном случае процесс получения электрического тока, протекающего от анода к катоду топливного элемента, отличается большей эффективностью, нежели это происходит на тепловых электростанциях или в дизельных электрогенераторах. В этих энергетических установках тепловая энергия переходит в механическую, которая только потом преобразуется в электрическую (рис. 2). В топливных элементах отсутствует непосредственное сгорание топлива, а также последующие поэтапные преобразования полученной энергии в механическую и электрическую энергию. То есть сама "реакция горения" заменяется движением электронов от окисляющегося водорода к восстанавливающемуся кислороду. В результате такие электрохимические генераторы имеют очень высокий КПД.

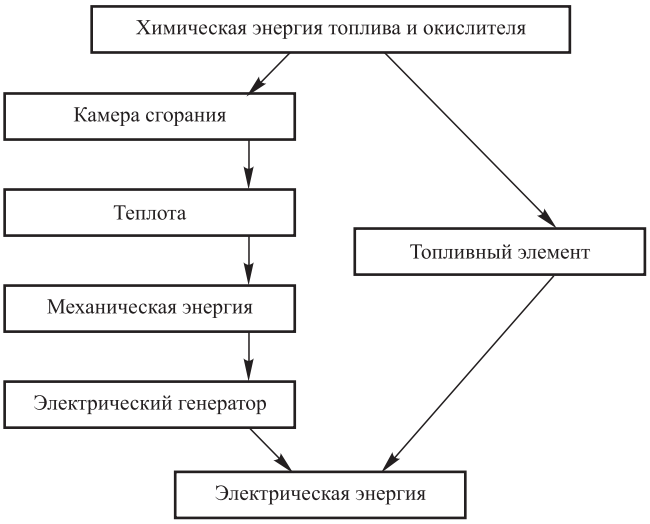


Рис. 2. Схема сравнения превращения химической энергии в электрическую в тепловых энергетических установках и в топливном элементе

Виды топливных элементов и области их применения

На сегодняшний день разработан целый ряд топливных элементов. Они различаются видом топлива и электролита, рабочей температурой, вырабатываемой мощностью и КПД. Основные типы известных топливных элементов и их параметры приведены в табл. 1 [13, 14].

С точки зрения вырабатываемой мощности, рабочей температуры и стоимости к наиболее вероятным ТЭ для транспорта относятся щелочные топливные элементы (ЩТЭ). Они относятся к низкотемпературным ТЭ, рабочим при температурах до 100 °С.

Таблица 1

Типы топливных элементов и их параметры

Тип топливного элемента	Рабочая температура, °С	Электролит	Топливо	Мощность	КПД, %
Прямой метанольный ТЭ (ПМТЭ)	60—130	Полимерная мембрана	Смесь воды с метанолом, этанолом	Менее 10 кВт	40
Щелочной ТЭ (ЩТЭ)	50—100	Гидроксид калия	Водород	50—100 кВт	45—60
ТЭ с протообменной мембраной (ТЭПМ)	Ниже 100	Полимерная мембрана	Водород, метан, метанол, бензин	1—250 кВт	40—60
Фосфоркислый ТЭ (ФКТЭ)	160—210	Фосфорная кислота	Водород	50 кВт — 400 МВт	40—50
Твердооксидный ТЭ (ТОТЭ)	500—1000	Циркониевая керамика	Водород, углекислый газ, метан	200 кВт — 400 МВт	50—65
Примечание. Кроме приведенных в табл. 1, известны также прототипы обратимого топливного элемента (ОТЭ) и расплавного карбонатного топливного элемента (РКТЭ).					

Таблица 2

Области применения топливных элементов различных типов

Тип ТЭ	Области применения
ТЭ с протообменной мембраной (ТЭПМ)	Портативные элементы, автомобили
Твердооксидный ТЭ (ТОТЭ)	Стационарные системы электро- и теплоснабжения
Фосфоркислый ТЭ (ФКТЭ)	Электроснабжение, автобусы
Щелочной ТЭ (ЩТЭ)	Космическая техника, подводный флот, транспорт
Прямой метанольный топливный элемент (ПМТЭ)	Небольшие приборы, телефоны, компьютеры
Обратимые ТЭ (ОТЭ)	Стационарные устройства
Расплавной карбонатный ТЭ (РКТЭ)	Стационарные системы электро- и теплоснабжения

Рабочие давления в ТЭ обычно близки к атмосферным. В качестве электролита в ЩТЭ используется 35—50-процентный водный раствор гидроксида калия KOH. Этот диапазон концентраций обусловлен максимумом проводимости растворов KOH, который смещается в сторону более высоких концентраций при повышении температуры. Выбор KOH в качестве электролита обусловлен его более высокой электропроводностью, а также большим ресурсом по сравнению, например, с более дешевым гидроксидом натрия NaOH.

Топливные элементы находят применение во многих сферах жизни человека: в космических аппаратах, на подводных лодках, в авиации, горной и шахтной технике, в зарядных устройствах и роботах, на электростанциях, в автомобильном, морском и железнодорожном транспорте (табл. 2) [13, 14]. Применительно к транспортным установкам использование топливных элементов вызывает интерес в связи с возможностью создания автомобилей с малым выбросом токсичных компонентов для крупных мегаполисов, в которых экологические проблемы становятся критичными.

Зарубежные разработки топливных элементов для транспорта

Возросший в настоящее время интерес к использованию топливных элементов в автомобильных силовых установках связан с неизбежным истощением мировых запасов нефти, нарастающим дефицитом нефтепродуктов, высокими ценами на моторные топлива и постоянно ужесточающимися требованиями к токсичности отработавших газов (ОГ). Исследованиями этой проблемы занимаются многие ведущие энергетические и автомобилестроительные фирмы [4, 9, 14, 16—20].

Силовые установки, в том числе и автомобильного назначения, разрабатываются ведущими мировыми, энергетическими и двигателестроительными компаниями, среди которых такие известные компании как "Пратт-Уитни" (Pratt & Whitney, США), ЮТК (UTC — United Technologies Corporation, США), "Вестингауз Электрик" (Westinghouse Electric Company, США), "Юнион Корбайд" (Union Carbide, США), "Баллард" (Ballard Power Systems, Канада) и ряд других. Некоторые данные по топливным элементам и установкам с этими ТЭ, разработанным зарубежными фирмами, представлены в табл. 3 [9]. В качестве топлива для ТЭ могут использоваться водород, природный газ (метан), метанол, этанол, диметиловый эфир, бензин и другие энергоносители [4, 9, 13, 14]. У топливных элементов, работающих на водороде при температуре 80—200 °С, электрический КПД достигает 55—70 %. Но при этом удельная мощность установок с ТЭ невелика и составляет

Таблица 3

Основные данные по топливным элементам зарубежных фирм и установкам на их базе

Реагенты	Фирма	Данные одного ТЭ		Данные установки с ТЭ		
		Температура, °С	Напряжение, В	Индикаторная мощность, кВт	Электрический КПД, %	Удельная мощность, Вт/кг
$O_2 + H_2$	«Пратт-Уитни»	180—200	0,90	0,55—2,3	55—70	20—30
$O_2 + H_2$	ЮТК	80—95	0,85	7—21	55—70	64
Воздух + H_2	ЮТК	190—200	0,70	40—11000	35—41	—
Воздух + H_2	Вестингауз	1000	0,80	10—30	50—60	—

20—64 Вт/кг. В связи с тем, что ЭДС одного топливного элемента составляет 0,8—0,9 В, необходимо последовательное соединение элементов для получения приемлемого напряжения 30—220 В.

Разработки ТЭ для автомобилей и автобусов ведутся во многих странах. Фирма "Юнион Корбайд" (США) разработала установку мощностью 32—90 кВт с топливными элементами, электролитом в которых служит гидроксид калия КОН [27]. Запас водорода и кислорода в жидком состоянии обеспечил пробег автофургона 160—240 км при массе установки 1480 кг. Канадская фирма "Баллард" создала установки с ТЭ, работающие на реагентах "H_2 + воздух" при температуре 100 °С. Мощность установки достигала 100 кВт, удельная мощность — 100—200 Вт/кг, объемная мощность — 80—100 кВт/м^3, электрический КПД $\eta_{эл}$ = 0,30—0,37, срок службы 15 000 ч.

В последнее время разработками автомобилей с топливными элементами активно занимались такие автомобильные концерны, как "Хонда" (Honda Motor, Япония), "Тойота" (Toyota Motor, Япония), "Даймлер-Крайслер" (Daimler-Chrysler, Германия) и "Дженерал Моторс" (General Motors, США). Так, компания "Хонда" выпустила около 50 автомобилей, оснащенных водородной силовой установкой мощностью 100 кВт и хорошими массогабаритными характеристиками, однако стоимость производства такого автомобиля составила 120—140 тыс. долларов США. Фирма "Даймлер-Крайслер" ассигновала 700 млн евро на разработку топливных элементов, работающих на водороде. По заданию правительства Германии в этом же направлении проводят исследования фирмы БМВ (BMW, Германия), МАН (MAN, Германия) и Фольксваген (Volkswagen, Германия) [4].

Отечественные разработки топливных элементов для транспорта

Исследования по проблемам использования топливных элементов на транспорте проводятся и в нашей стране [14, 20—23]. В 70—80-е гг. прошлого века НПО "Квант" совместно с рижским автобусным заводом РАФ работали над созданием водородного микроавтобуса на щелочных топливных элементах. Прототип такого микроавтобуса с щелочными ТЭ был изготовлен в 1982 г. и был продемонстрирован на ряде выставок. Однако впоследствии эти работы на долгое время были приостановлены.

Лишь в конце 90-х гг. прошлого века специалистами РКК "Энергия" совместно с Уральским электрохимическим комбинатом была разработана силовая установка для автомобиля на основе электрохимического генератора "Фотон".

Рис. 3. Электромобиль "Лада — АНТЭЛ-1" (АНТЭЛ — автомобиль на топливных элементах)

Рис. 4. Электромобиль "ВАЗ-2111 — АНТЭЛ-2"

В 2001 г. на автосалоне в Москве был представлен электромобиль "Лада — АНТЭЛ-1" (рис. 3), в котором использовалась энергетическая установка на щелочных топливных элементах, работающая на сжатом водороде и кислороде [14].

Следующей моделью автомобиля на топливных элементах стал электромобиль "ВАЗ-2111 АНТЭЛ-2" (рис. 4) [14]. Главное отличие этого автомобиля от предшественника состояло в том, что вместо громоздких кислородных баллонов были установлены компактный компрессор для забора воздуха из атмосферы и система его очистки от CO_2.

Преимущества использования топливных элементов на транспорте

Несомненным преимуществом ТЭ является их высокий КПД. Причем, в отличие от тепловых двигателей, у топливных элементов нет жесткого ограничения на топливную экономичность (у тепловых

машин КПД определяется разностью между минимальной и максимальной температурами цикла). За счет непосредственного превращения энергии топлива в электричество КПД установок с топливными элементами достигает 60—80 %.

При использовании топливных элементов в силовых установках автомобилей в окружающую среду выделяется лишь водяной пар. В связи с этим по экологическим показателям традиционные поршневые ДВС, да и двигатели с нетрадиционным рабочим процессом (например, двигатели с HCCI-процессом — двигатели с гомогенным смесеобразованием), выбрасывающие в атмосферу оксиды азота, углекислый и угарный газы, а также другие вредные вещества, не могут конкурировать с топливными элементами. Поэтому топливные элементы иногда называют источниками энергии с нулевой эмиссией вредных веществ.

Еще одним достоинством топливных элементов являются их хорошие эксплуатационные качества. Они производят меньше шума (в них нет движущихся деталей), меньше нагреваются и, как отмечено выше, более эффективны с точки зрения потребления топлива. Последнее обстоятельство позволяет устанавливать на автомобилях топливные баки меньшего объема и иметь на борту транспортного средства меньшие запасы топлива.

Следует также еще раз отметить возможность использования для работы ТЭ различных видов топлива — водорода, природного газа, спиртовых топлив (метанол, этанол) и эфиров (диметиловый эфир), бензина и других энергоносителей, включая возобновляемые энергетические ресурсы.

Проблемы использования топливных элементов на транспорте

Одна из основных проблем, связанных с использованием топливных элементов на транспорте, заключается в том, что реакция окисления восстановителя (топлива) при нормальных условиях (при атмосферных температуре и давлении) протекает очень медленно. Чтобы ускорить катодную и анодную реакции, происходящие в топливном элементе, нужно либо использовать катализатор, либо поднять температуру ячейки.

Лучшим катализатором для обоих электродов оказалась платина, тонким слоем которой покрывают электроды. В этом случае в качестве электролита применяется полимерная электролитная мембрана (ПЭМ) — пленка, состоящая из молекул поливалентной кислоты, в которой к углеродной скелетной цепи сбоку прикреплены группы кислотного остатка [$—SO_3$], а протоны свободно движутся по полимеру.

Отсюда возникает вторая проблема использования топливных элементов — их стоимость. Применение платины в качестве катализатора, а также водорода в качестве топлива делает кислород-водородный элемент очень дорогим. В настоящее время стоимость крупномасштабного производства топливно-элементных систем пока на порядок превышает стоимость, которую необходимо иметь для конкурентоспособности с поршневыми ДВС [20].

Стоимость только платины в современной системе с топливными элементами мощностью 50 кВт оценивается величиной 57 долл./кВт. Только эта составляющая стоимости выше величины, которую должна была иметь вся силовая установка в начале XXI века (50 долл./кВт). Потребности в платине, необходимой для создания каталитического покрытия электродов топливных элементов, слишком велики и не могут быть обеспечены промышленностью.

В топливных элементах, работающих на водороде, важную роль играет качество подаваемого водорода, так как примеси, содержащиеся в нем, отравляют катализатор. Для реализации возможности использования технического водорода, содержащего 1—2 % угарного газа, в качестве электролита применяют 100-процентную фосфорную кислоту и возникает необходимость повышения температуру топливного элемента до 150—200 °С.

Еще одной проблемой использования ТЭ, работающих на водороде, являются его необычные физические свойства. Водород обладает высокой проникающей способностью — его молекулы сравнительно легко проникают через стенки газобаллонного оборудования автомобилей. Поэтому его длительное хранение в компримированном виде в баллонах практически трудноосуществимо. Кроме того, у газообразного водорода очень низка энергоемкость на единицу объема (даже с учетом большой энергоемкости на единицу веса — низшая теплота сгорания водорода составляет около 120 МДж/кг против 42,5 МДж/кг у нефтяного дизельного топлива). Ожижение могло бы решить задачу "сгущения" водорода, но температура его ожижения очень низка — в жидком виде (бесцветная легкая жидкость) водород существует в очень узком интервале температур от –252,8 до –259,2 °С. Такая температура ожижения водорода делает метод его хранения в жидком виде трудноосуществимым в транспортных средствах.

С целью решения этой проблемы продолжаются поиски топлива, которое имело бы высокую плотность энергии, было дешевым и безопасным. Лучше всего этим требованиям удовлетворяет метанол — он дешев, смешивается с водой в любых пропорциях, легко раз-

лагается в очистных сооружениях и обладает в два раза большей объемной плотностью энергии, чем даже жидкий водород. Реакция, протекающая на аноде такого топливного элемента, выглядит следующим образом:

$$CH_3OH + H_2O \rightarrow CO_2 + 6H^+ + 6e^-.$$

Эта реакция многостадийна: молекула метанола сначала адсорбируется на электроде, затем, в ходе окисления, теряет один за другим протоны и превращается в прочно адсорбированную карбонильную группу, которая далее не окисляется. Поэтому платина плохо ускоряет данную реакцию. Однако применение Pt/Ru-сплава частично решило эту проблему. Образующиеся на атомах платины карбонильные группы мигрируют на соседний рутениевый атом, где и окисляются. Рутений окисляет карбонильные группы, но он — плохой катализатор для окисления метанола, платина же окисляет метанол, но отравляется угарным газом.

Существует и еще ряд проблем, которые необходимо решить при создании автомобилей с топливными элементами. К недостаткам топливных элементов относятся также их малая удельная мощность, составляющая 20—200 Вт/кг (или 5—50 кг/Вт), недостаточная долговечность компонентов этих элементов (менее 5000 ч), большое время подготовки их к работе (6—20 мин), отсутствие инфраструктуры для получения, хранения и распределения водорода, метанола и ряда других топлив. Причем эти проблемы настолько серьезны, что не дают оснований на перспективы массового внедрения этих силовых установок на транспорте в ближайшие 10—15 лет. Однако этот энергетический источник является перспективным не только для космических объектов, где цена вырабатываемой энергии не имеет первостепенного значения, но и для наземных энергетических установок, включая силовые установки для транспорта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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. — 464 с.
2. **Машиностроение.** Энциклопедия. Том IV. Двигатели внутреннего сгорания / Л. В. Грехов, Н. А. Иващенко, В. А. Марков и др. Под ред. А. А. Александрова, Н. А. Иващенко. — М.: Машиностроение, 2013. — 784 с.
3. **Автомобильные двигатели:** Учебник для вузов / М. Г. Шатров, К. А. Морозов, И. В. Алексеев и др. Под ред. М. Г. Шатрова. — М.: Издательский центр "Академия", 2013. — 464 с.
4. **Альтернативные топлива для двигателей внутреннего сгорания** / А. А. Александров, И. А. Архаров, В. А. Марков и др. Под ред. А. А. Александрова, В. А. Маркова. — М.: ООО НИЦ "Инженер", ООО "Онико-М", 2012. — 791 с.
5. **Льотко В., Луканин В. Н., Хачиян А. С.** Применение альтернативных топлив в двигателях внутреннего сгорания. — М.: Изд-во МАДИ (ТУ), 2000. — 311 с.
6. **Использование растительных масел и топлив на их основе** в **дизельных двигателях** / В. А. Марков, С. Н. Девянин, В. Г. Семенов и др. — М.: ООО НИЦ "Инженер", ООО "Онико-М", 2011. — 536 с.
7. **Гайворонский А. И., Марков В. А., Илатовский Ю. В.** Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. — М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2007. — 480 с.
8. **Кириллов Н. Г.** Альтернативные моторные топлива XXI века // Автогазозаправочный комплекс + альтернативное топливо. — 2003. — № 3. — С. 58—63.
9. **Вальехо Мальдонадо П. Р.** Энергосберегающие технологии и альтернативная энергетика: Учебное пособие для вузов. — М.: Изд-во РУДН, 2008. — 204 с.
10. **Фильштих В.** Топливные элементы. — М.: Мир, 1968. — 416 с.
11. **Коровин Н. В.** Электрохимическая энергетика. — М.: Энергоатомиздат, 1991. — 264 с.
12. **Лаврус В. С.** Источники энергии. — М.: Наука и техника. 1997. — 560 с.
13. **Козлов С. И., Фатеев В. Н.** Водородная энергетика: современное состояние, проблемы, перспективы / Под ред. Е. П. Велихова. — М.: ООО "ИРЦ Газпром", 2009. — 520 с.
14. **Козлов С. И., Фадеев В. Н.** Топливные элементы — перспективные химические источники электрической энергии // Транспорт на альтернативном топливе. — 2014. — № 2. — С. 7—22. — № 3. — С. 9—22.
15. **Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И.** Токсичность отработавших газов дизелей. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002. — 376 с.
16. **Smitha B., Sridhar S., Khan A. A.** Synthesis and characterization of proton conducting polymer membranes for fuel cells // Journal of Membrane Science. — 2003. — № 225. — P. 63—76.
17. **Meyer A. P., Gorman M. E., Flanagan D. M.** et al. Progress in the Development of PEM Fuel Cell Engines for Transportation // SAE Technical Paper Series. — 2001. — № 2001-01-0540. — P. 1—4.
18. **Meyer A. P., King J. M., Kelly D.** Progress in Development and Application of Fuel Cell Power Plants for Automobiles and Buses // SAE Technical Paper Series. — 1999. — № 1999-01-0533. — P. 1—4.
19. **Pischinger S., Schonfelder C., Bornscheuer W.** et al. Integrated Air Supply and Humidification Concepts for Fuel Cell Systems // SAE Technical Paper Series. — 2001. — № 2001-01-0233. — P. 1—7.
20. **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. — 464 с.
21. **Ерохов В. И., Николаенко А. В.** Применение электрического привода наземного транспортного средства // Транспорт на альтернативном топливе. 2011. — № 2. — С. 10—16.
22. **Метод определения степени затопления твердополимерного топливного элемента** путем снятия потенциодинамических кривых / В. В. Багров и др. // Грузовик. — 2014. — № 3. — С. 14—16.
23. **Мирзоев Г. К., Казаров А. П.** Разработка электромобилей ОАО "АвтоВаз" // Журнал автомобильных инженеров. — 2010. — № 1. — С. 18—25.

УДК 621.436.03

Л. В. Грехов, д-р техн. наук, профессор, e-mail: lgrekhov@mail.ru, МГТУ им. Н. Э. Баумана, г. Москва
Ю. Е. Драган, канд. техн. наук, доцент, ВлГУ, г. Владимир

ФОРМИРОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВПРЫСКИВАНИЯ ТОПЛИВА С ПОМОЩЬЮ АККУМУЛЯТОРНОЙ ТОПЛИВНОЙ СИСТЕМЫ ДЛЯ МАЛОТОКСИЧНЫХ ДИЗЕЛЕЙ НАЗЕМНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Проведен анализ экспериментальных данных по особенностям работы электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливных систем дизелей (Common Rail). Выявлено существенное влияние деформаций элементов форсунок при достигнутых уровнях давлений подачи на процесс впрыскивания топлива. Предложено математическое описание действительных гидромеханических процессов в форсунках. Сделаны выводы, полезные для нужд безразборного диагностирования существующих и для проектирования новых топливных систем.

Ключевые слова: *электрогидравлическая форсунка, аккумуляторная топливная система, дизель, впрыскивание топлива, электронное управление, игла, клапан.*

L. V. Grekhov, Y. E. Dragan

INJECTION RATE SHAPING WITH COMMON RAIL FOR LOW-EMISSION DIESEL ENGINES OF GROUND VEHICLES

Common Rail injectors' operation features were analyzed. Significant impact of injector parts deformations at injection process has been explored. Mathematical model of real hydromechanical processes in injectors has been proposed. Conclusions are useful both for in-place diagnostics of existing fuel injection systems and for new systems design.

Keywords: *injector, Common Rail, diesel, fuel system, electronic control, needle.*

В целях снижения вредных выбросов с отработавшими газами и эксплуатационного расхода топлива на дизелях наземного транспорта — автомобилях, сельскохозяйственных машинах, строительных и дорожных машинах и даже спецтехнике — наблюдается широкое внедрение топливных систем с электронным управлением, в первую очередь, аккумуляторных (Common Rail). Другим важнейшим направлением развития топливных систем дизелей является повышение давления впрыскивания. В последние годы оно выросло относительно привычного на протяжении предыдущих 50...60 лет в 3...5 раз и достигло к 2015 г. уровня 250 МПа в образцах серийной продукции. В этих условиях стал актуальным вопрос о влиянии деформаций форсунок Common Rail на особенности их работы.

Один из авторов статьи — Ю. Е. Драгин — впервые обратил внимание на аномальное поведение электрогидравлических форсунок (ЭГФ) аккумуляторной топливной системы с электронным управлением Common Rail (в дальнейшем CR) в рамках совместной работы с МГТУ им. Н. Э. Баумана по созданию экспериментальной аккумуляторной системы [1, 2]. В экспериментальной форсунке CR были установлены датчики перемещения управляющего клапана и иглы форсунки (рис. 1). Сама форсунка, с современных позиций, является типовой. Она близка к наиболее популярным автотрактор-

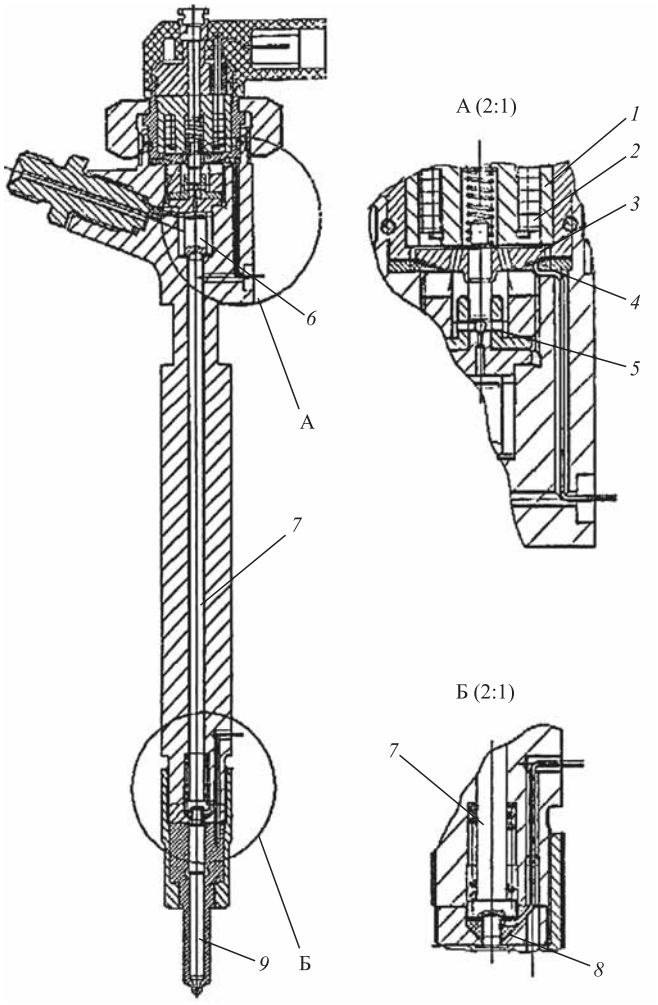


Рис. 1. ЭГФ с датчиками перемещения управляющего клапана (А) и иглы распылителя (Б):

1 — магнитопровод; *2* — якорь; *3* — якорь; *4* — датчик подъема клапана; *5* — шариковый управляющий клапан; *6* — плунжер мультипликатора запирания; *7* — штанга мультипликатора; *8* — датчик подъема иглы; *9* — игла

ным конструкциям. Важно то, что они, как правило, весьма вытянуты по длине и снабжены плунжерным мультипликатором запирания иглы, представляющим длинную штангу малого сечения с плунжером в самой верхней части. Это важно потому, что в рабочем состоянии в период между впрыскиваниями игла снизу и мультипликатор сверху сжимаются давлением топлива, равным давлению в аккумуляторе ($P_{акк}$). Вследствие этого детали, имеющие небольшое поперечное сечение, ощутимо сжимаются (при давлениях 180 МПа на 0,1 мм), что соизмеримо с геометрическим ходом. Корпусные детали форсунки также деформируются, но в сторону растяжения. С учетом толщины стенок современных форсунок, этим нельзя пренебречь.

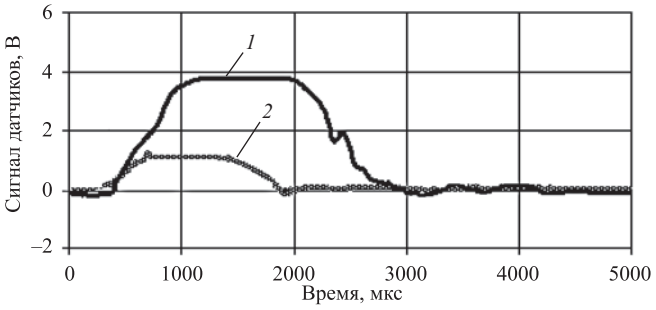


Рис. 2. Подъем иглы и управляющего клапана ЭГФ при напряжении форсирования 150 В, напряжения размагничивания 100 В, времени удержания 0,8 мс, давлении в аккумуляторе 80 МПа, цикловой подаче 56,7 мм^3:

1 — подъем иглы; *2* — подъем управляющего клапана

Датчики перемещений элементов форсунки позволяли фиксировать реальный ход клапана и иглы (рис. 2), а сопоставление этих перемещений с геометрическими значениями в реальном образце форсунки — оценивать деформацию элементов форсунки. В процессе обработки результатов выполненных испытаний обнаружено, что деформация штанги мультипликатора запирания существенна даже при относительно невысоких рабочих давлениях и несомненно зависит от их величины (рис. 3).

Поскольку сжимаемость топлива проявляется в какой-либо полости, то по физической сущности в плане влияния на процесс подачи топлива, она

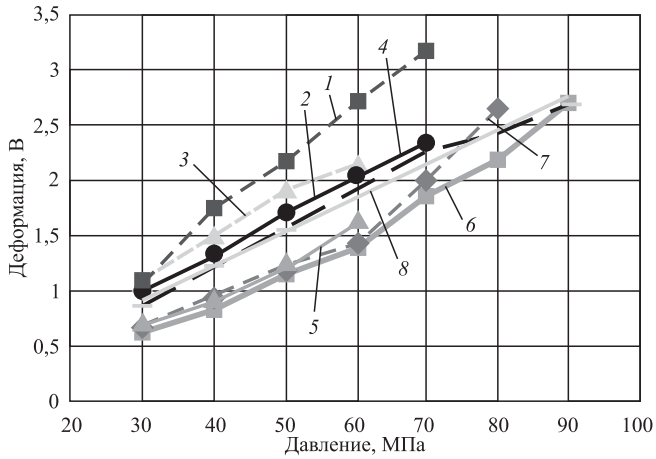


Рис. 3. Деформация штанги мультипликатора запирания в функции давления в аккумуляторе для разных вариантов исполнения ЭГФ

1 — форсунка НИКТИД-МГТУ с электромагнитным приводом ЭМП-70; *2* — форсунка Delphi EJBR04701D; *3* — форсунка R. Bosch A6120700087; *4* — форсунка R. Bosch 0445115067; *5* — форсунка Denso R61540080017A; *6* — форсунка НИКТИД-МГТУ с электромагнитным приводом ЭМП-150; *7* — форсунка R. Bosch 0445110012; *8* — оцененное среднее значение деформации штанги мультипликатора

близка к деформации этой полости (проявляются одновременно и совместно влияют на процесс, аккумулируя потенциальную энергию сжатия топлива и деформации стенок полости). Поэтому часто общее воздействие сжатия топлива и деформации полости оценивали эквивалентным коэффициентом сжимаемости [3, 4].

Таким образом удается учесть увеличение объема камеры управления с соответствующим изменением характера протекающих процессов [2].

Однако концепция эквивалентного коэффициента сжимаемости не всегда точна. Например, она никогда не вызывала возражений в формуле Ротрока для оценки коэффициента сжимаемости топлива в податливом бесконечно длинном трубопроводе ввиду простоты и корректности учета деформации трубы [4]. К сожалению, для полостей сложной геометрии количественная оценка эквивалентного коэффициента сжимаемости становится проблемной. Важно и другое: продольная податливость форсунки проявляется также и в виде иных эффектов. Так, влияние деформации штанги не одинаково проявляется в камерах управления объемами разной величины, а также различных форм в камерах. Как будет показано ниже, не менее важно и то, что увеличивается действительный ход иглы.

Таким образом, возникает необходимость учета податливости деталей форсунки при наиболее важных воздействиях на процесс подачи топлива, а модель процесса должна легко вписываться в общую гидродинамическую модель процесса топливоподачи [4].

Уточним физические особенности процесса. При подаче высокого давления в ЭГФ система "игла — мультипликатор запирания" сжимаются, а корпусные детали растягиваются. В результате объем камеры управления увеличивается в соответствии с суммой продольных деформаций деталей. Одновременно на эту же величину увеличивается потенциальный максимальный подъем иглы.

При впрыскивании топлива, камера управления частично разгружается, но в подыгольной полости (в кармане распылителя) остается приблизительно то же высокое давление (точно — мгновенное и постоянно вычисляемое при расчете давление в кармане). Снижение сжимающей силы сверху от давления в камере управления компенсируется возникновением механической реакции — силы от упора. Поэтому мультипликатор не может принять исходное недеформированное состояние, а остается сжатым. Аналогичным образом корпусные детали остаются в состоянии растяжения. В этом положении логично за вызывающую деформацию силу принять гидравлическую силу, поднимающую иглу за вычетом усилия запорной пружины.

Податливость деталей форсунки приводит к изменению величины объема камеры управления и действительного максимального хода иглы. Эти величины непостоянны. Они зависят не только от $P_{акк}$, но и от изменяющихся в полостях форсунки давлений, т. е. времени.

Математическая модель топливоподачи, в том числе в ЭГФ аккумуляторной системы, известна и с существенными уточнениями описана в [4]. Здесь остановимся только на ее особенностях при учете продольной податливости деталей ЭГФ. Скорость звука в стали превышает скорость звука в топливе (более 5000 м/с), а длина штанги — не превышает 0,1 м, также в камере управления давление изменяется относительно медленно. Поэтому предложения специалистов ХАДИ об учете нестационарности распространения возмущений по штанге выглядит совершенно излишним. Это также неоправданно замедляет счет.

С учетом противоположного влияния на плотность топлива температуры и давления, использование уравнений объемного баланса до недавнего времени удовлетворяло требованиям точности практических расчетов. В общем виде для любой из полостей объемом V_i уравнение объемного баланса имеет вид:

$$\frac{dP_i}{dt} = \frac{1}{V_i \beta_i^{эфф}} \left[\sum Q_{i-k} + \sum U_{i-j} f_j + \sum \frac{dV_{i-n}}{dt} \right], \quad (1)$$

где $\beta_i^{эфф} = \beta_i^{топл} + k_{деф}$; $k_{деф}$ — коэффициент деформации полости; Q_{i-k} — перетечки в (из) k-ю полость; dV_{i-n} — изменение объема под действием перемещения n-го элемента; U_{i-j} — скорость втекания топлива из (в) j-го канала.

Так, для камеры управления над иглой или мультипликатором запирания обычно оно имеет вид:

$$\frac{dP_{ку}}{dt} = \frac{1}{V_н \beta_н^{эфф}} \left[\mu_{жикл} f_{жикл} \sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_ф - P_{ку}\right)} - Q_{ут}^{мульт} - \mu_{кл} f_{кл} \sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_{ку} - P_{слив}\right)} + f_{мульт} \frac{dC_u}{dt} \right]. \quad (2)$$

Здесь $\mu_{жикл} f_{жикл}$ — эффективное сечение входного жиклера; $\mu_{кл} f_{кл}$ — эффективное сечение управляю-

щего клапана; $P_{ку}$ — давление в камере управления, $P_ф$ — давление на входе в форсунку; $Q_{ут}^{мульт}$ — расход утечек через плунжер мультипликатора, $C_и$ — скорость иглы.

С учетом наличия продольной податливости деталей, которая приводит к дополнительному смещению плунжера мультипликатора относительно камеры управления, увеличивающему ее объем на величину $f_{мульт}^{*}\Delta x_и^{деф}$, обусловливая неравенство скоростей мультипликатора и иглы, уравнение (2) имеет вид:

$$\frac{dP_{ку}}{dt} = \frac{1}{V_и^{деф}\beta_н^{эфф}}\left[\mu_{жикл}f_{жикл}\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_ф - P_{ку}\right)} - Q_{ут}^{мульт} - \mu_{кл}f_{кл}\sqrt{\frac{2}{\rho}\left(P_{ку} - P_{слив}\right)} + f_{мульт}\frac{dC_{мульт}}{dt}\right], \quad (3)$$

где

$$V_и^{деф} = V_и^{мертв} - f_{мульт}\left(x_и - x_и^{деф}\right); \quad (4)$$

$$x_и^{деф} = x_и + \Delta x_и^{деф} = x_и + S_{сж}k_{подат}/E_{стали};$$

$$\left(x_и^{деф}\right)^{max} = \left(x_и\right)^{max} + \Delta x_и^{деф} = \left(x_и\right)^{max} + S_{сж}k_{подат}/E_{стали}. \quad (5)$$

Усилие сжатия мультипликатора $S_{сж}$ удобно вычислять так:

$$S_{сж} = P_{ку}f_{мульт}$$

для иглы на седле $x_и = 0$;

$$S_{сж} = P_{расп}f_и^{диф} + P_{впр}\left(f_и - f_и^{диф}\right)$$

для иглы вне седла $x_и > 0$.

Под $k_{подат}$ в общем случае понимаем не просто податливость собственно штанги, как наиболее нежесткого звена, но приведенную податливость, отражающую нежесткость всей системы "корпус — игла — штанга — плунжер". Если для штанги $k_{подат}$ легко оценить как частное длины к ее сечению, то для упомянутой деформируемой системы общая податливость может быть определена:

$$k_{подат} = \sum_i\left(k_{подат}\right)_i = \sum_k\left(\frac{l_i}{f_i}\right). \quad (6)$$

Для более точной, чем по формуле (6) оценки $k_{подат}$, может решаться деформационная задача методом конечных элементов. Таким образом, теперь с использованием (4) учитывается изменение объема камеры управления, с использованием (5) — увеличение хода иглы.

Как же продольная деформация ЭГФ влияет на ее работу? Рассмотрим ситуацию на примере хорошо известной ЭГФ с неразгруженным шариковым клапаном фирмы R. Bosch с соплами распылителя 5×0,182 мм. При использовании давления в аккумуляторе 135 МПа на номинальном режиме, как это было в первых моделях систем CR, подъем иглы изменяется согласно рис. 4. Условия расчета отнесены к дизелю с номинальной частотой коленчатого вала 4200 мин$^{-1}$, цикловой подачей 60 мг. За расчетный вариант "*a*" принят случай отсутствия продольной податливости, $k_{подат} = 0$. Вариант "*b*" отражает реальное значение суммарной продольной податливости ЭГФ $k_{подат}$ = 9,5 мм$^{-1}$. Вариант "*c*" соответствует удвоенной податливости $k_{подат}$ = 19 мм$^{-1}$.

Представляет интерес поведение ЭГФ на современном уровне давлений подачи. Сегодня это обычно 180 МПа. С некоторым опережением для анализа рассмотрен уровень 200 МПа (рис. 5 и 6).

Из приведенных иллюстраций можно сделать следующие выводы. Продольная податливость проявляется, прежде всего, в увеличении хода иглы распылителя. В рассмотренных случаях при $P_{акк}$ 135 и 200 МПа он увеличивался на 35 и 38 %.

Изменение процесса в камере управления, связанное с изменением ее объема, не столь существенное. Это объяснимо: деформация увеличивает объ-

Рис. 4. Зависимость действительного подъема иглы ЭГФ R.Bosch при $P_{акк}$ = 135 МПа и различных коэффициентах податливости:

a — $k_{подат}$ = 0 мм$^{-1}$; *b* — $k_{подат}$ = 9,5 мм$^{-1}$; *c* — $k_{подат}$ = 19 мм$^{-1}$

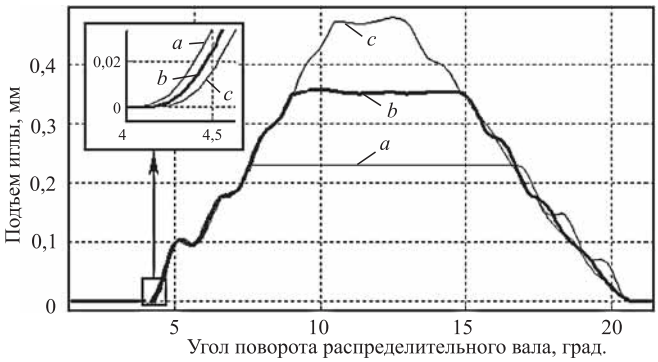


Рис. 5. Зависимость действительного подъема иглы ЭГФ R. Bosch при $P_{акк}$ = 200 МПа и различных коэффициентах податливости:

a — $k_{подат}$ = 0 мм$^{-1}$; *b* — $k_{подат}$ = 9,5 мм$^{-1}$; *c* — $k_{подат}$ = 19 мм$^{-1}$

Рис. 6. Зависимость давления впрыскивания ЭГФ R. Bosch при $P_{акк}$ = 200 МПа и различных коэффициентах податливости:

d — $k_{подат}$ = 0 мм$^{-1}$; *e* — $k_{подат}$ = 9,5 мм$^{-1}$; *f* — $k_{подат}$ = 19 мм$^{-1}$

ем камеры управления в рассматриваемом случае на 5...6 %, а сам объем при его малых значениях влияет на показатели подачи уже не столь значительно. Так, давление впрыскивания несколько увеличивается с учетом деформаций. Это обусловлено большим сечением в запорном конусе и меньшими гидравлическими потерями в нем.

Существеннее учитывать сдвиг фаз впрыскивания под действием деформаций. Еще в экспериментальных системах, выполненных авторами [1], было отмечено, что подъем иглы запаздывает относительно ожидаемого. Это важно при создании программ управления и при диагностике. Задержка зависит как от конструктивных особенностей ЭГФ, так и от $P_{акк}$, т. е. режима работы дизеля. В рассмотренных случаях эта задержка составляла от 0,04 до 0,14 град поворота распределительного вала (3...11 мкс).

Заключение

1. Продольная деформация деталей ЭГФ, заключающаяся в сжатии иглы и мультипликатора запирания и растяжении корпусных деталей, — специфическое явление в аккумуляторных топливных системах.

2. В наибольшей степени продольная деформация проявляется в увеличении хода иглы. Величина суммарной продольной деформации соизмерима с ходом иглы. В экспериментальной форсунке и ЭГФ R. Bosch она увеличивала ход на 37...50 %.

3. Ввиду увеличения хода иглы и снижения гидравлических потерь в запорном конусе иглы при наличии продольной податливости ЭГФ, при ее проектировании целесообразно закладывать низшее значение максимального хода, что обеспечит больший ресурс распылителей.

4. Деформация ЭГФ незначительно увеличивает давление впрыскивания, сокращает его продолжительность, смещает процесс в сторону запаздывания.

5. Деформация ЭГФ в сочетании с известными способами разделения хода иглы на два разных этапа является возможным средством реализации управления передним фронтом характеристики впрыскивания.

6. Значительная податливость (коэффициент $k_{подат}$ более 20...30 мм$^{-1}$) провоцирует неустойчивость счета, для чего нужны специальные численные методы.

7. Податливость ЭГФ ввиду роста фазовой задержки и хода иглы затрудняет организацию многоразового впрыскивания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Драган Ю. Е.** Экспериментальные исследования электрогидравлических форсунок аккумуляторных топливных систем высокооборотных автомобильных двигателей // Матер. межд. науч.-практ. конф. 8—11.10.2002 "Прогресс транспортных средств и систем-2002", Ч. 2. — Волгоград, 2002. — 340 с.
2. **Драган Ю. Е.** Анализ исследований гидродинамических процессов в электрогидравлических форсунках дизелей // Двигатели внутреннего сгорания, 2012, № 2. С. 3—7.
3. **Топливные системы и экономичность дизелей** / И. В. Астахов, Л. Н. Голубков, В. И. Трусов и др. — М.: Машиностроение, 1990. — 288 с.
4. **Грехов Л. В., Габитов И. И., Неговора А. В.** Конструкция, расчет и технический сервис топливной аппаратуры современных дизелей: Учебное пособие. — М.: Изд-во Легион-Автодата, 2013. — 292 с.

УДК 621.43

Д. Ю. Батыщев, e-mail: batyshhev@bk.ru,
В. А. Рыжиков, д-р техн. наук, профессор, e-mail: rigikov54@mail.ru, ИСОиП ФГБОУ ВПО Донской государственный технический университет, г. Шахты Ростовской обл.,
Ю. М. Ляшенко, д-р техн. наук, профессор,
Шахтинский институт (филиал) РГПУ (НПИ) имени М. И. Платова,
А. С. Череповский, студент, e-mail: cherepovsky.alexander@yandex.ru,
ИСОиП ФГБОУ ВПО Донской государственный технический университет

ВЛИЯНИЕ ТОПЛИВНЫХ ПРИСАДОК НА РАБОЧИЕ ПРОЦЕССЫ И ДИНАМИКУ РАБОТЫ ДВС

Проведен сравнительный анализ влияния топливных присадок на эксплуатационные свойства и тепловые процессы автомобильных двигателей. Приведена общая классификация топливных присадок, влияющих на физико-химические процессы внутри цилиндра ДВС.

Ключевые слова: *двигатели внутреннего сгорания, топливные присадки, октановое число, детонационная стойкость, температура сгорания, цетановое число, окисление.*

D. Yu. Batyshchev, V. A. Ryzhikov, Yu. M. Liashengko, A. S. Cherepovsky

INFLUENCE FUEL ADDITIVESON THE WORKING PROCESSES AND DYNAMICS OF INFERNAL COMBUSTION ENGINES

A comparative analysis of the impact of fuel additives on the performance properties and thermal processes of automobile engines. Shows general classification of fuel additives affecting the physical and chemical processes within the cylinder engine.

Keywords: motors, internal combustion engines, fuel, additives, octane number, detonation, resistance, temperature, combustion, the cetane number, oxidation.

Для повышения долговечности двигателя при различных условиях эксплуатации, используют топливные присадки. Основной задачей применения топливных присадок, наряду с оптимизацией рабочих параметров, является стабилизация физико-химических процессов и снижение тепловой загруженности деталей цилиндропоршневой группы.

Классификация основных групп топливных присадок, применяемых для улучшения работы двигателей, показана на рис. 1.

Антидетонационные присадки

Автомобильные присадки данного типа имеют непосредственное отношение к процессу горения внутри камеры сгорания, поскольку они влияют на детонационную стойкость бензинового топлива и прирост октанового числа (ОЧ).

Данный тип присадок применяют преимущественно в промышленных условиях на нефтеперерабатывающих заводах. Добавление присадок в состав топлива, позволяет обеспечить выработку топлив с фиксированным уровнем детонационной стойкости.

Основное назначение антидетонационных присадок заключается в корректировке октанового числа путем изменения химического состава продуктов горения и повышении концентрации неустойчивых пероксидов внутри камеры сгорания [3—5]. Наиболее распространенными присадками данного типа на основе эфира являются: метил-трет-бутиловый эфир (МТБЭ), этил-трет-бутиловый эфир (ЭТБЭ) и трет-амилметиловый эфир (ТАЭ).

Для антидетонационных присадок основным показателем эффективности является октановое число. Одной из наиболее часто применяемых антидетонационных присадок является монометиланилин (ММА, N-метиланилин). На рис. 2 показана зависимость антидетонационной стойкости бензина от концентрации монометиланилина.

Влияние антидетонаторов прежде всего сказывается на продуктах предпламенного окисления, которые подвержены взрывному разложению, происходящему еще до начала нормального горения рабочей смеси [5].

В момент такта сжатия, внутри камеры сгорания образуется большое количество пероксидов, вследствие

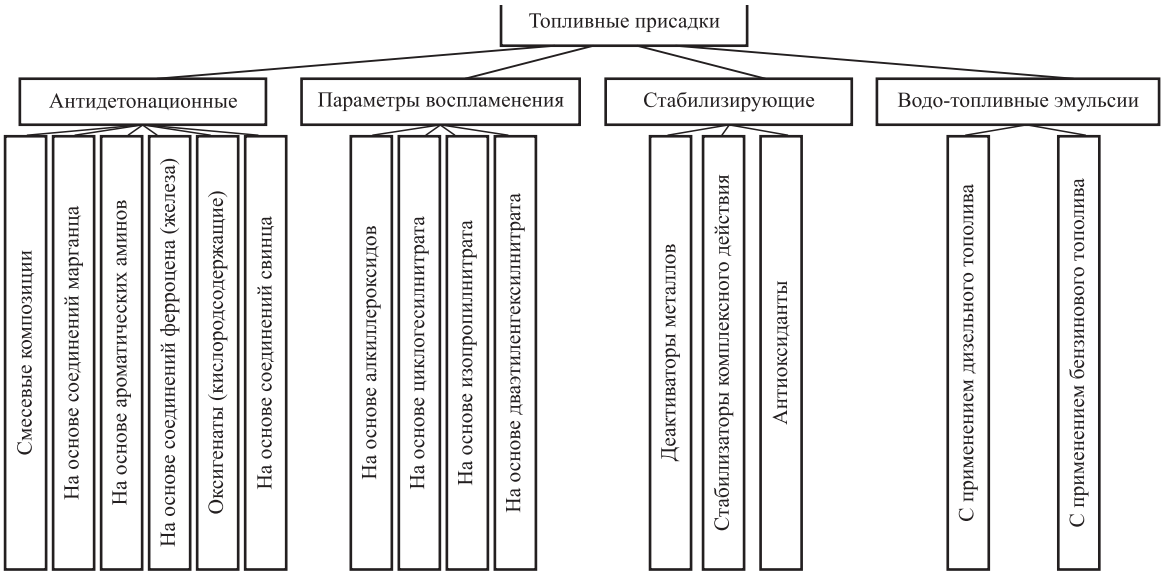


Рис. 1. Классификация топливных присадок

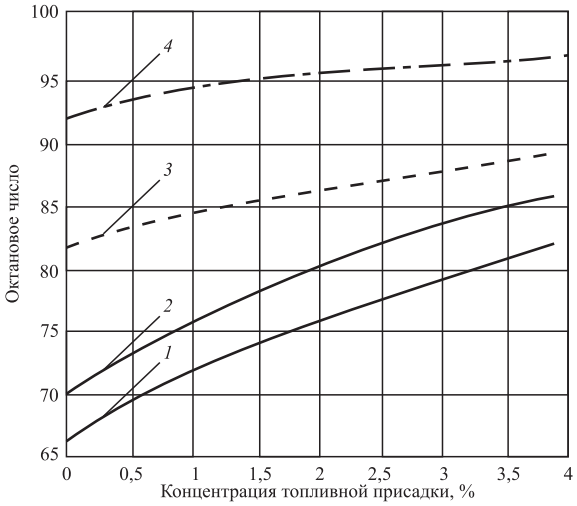


Рис. 2. Изменение антидетонационной стойкости в зависимости от концентрации антидетонационной присадки:
1 — присадка ММА-66; *2* — присадка ММА-70; *3* — присадка ММА-82; *4* — присадка ММА-92

чего наступает окисление предельных углеводородов. Этот процесс способствует появлению высокой температуры. Разложение пероксидов сопровождается взрывом, поскольку их состояние является химически нестабильным. Их появлению и накоплению препятствуют антидетонаторы. Благодаря этому процессу горение топливной смеси протекает в "нормальных" условиях с минимальным детонационным эффектом [3, 5].

Промоторы воспламенения

Применение промоторов ограничивается дизельным топливом, поскольку они имеют непосредственное влияние как на токсичность отработавших газов (ОГ), так и на рабочий процесс дизеля в целом.

Область применения промоторных присадок распространяется на топлива, полученные из нефти нафтенового основания, среднедистиллятных и высокоароматизированых соединений, вне зависимости от их происхождения.

Основное назначение данного типа присадок заключается в увеличении цетанового числа (ЦЧ) посредствам повышения уровня воспламеняемости и оптимизации процесса горения внутри камеры сгорания. При помощи добавления промоторов в топливо, можно сократить время запуска двигателя в холодное время года и уменьшить эмиссию ОГ, которая свойственна периоду пуска двигателя. На рис. 3 показано изменение продолжительности времени пуска и дымности ОГ ДВС при работе на топливе с добавлением алкилнитратной присадкой.

Скорость воспламеняемости дизельного топлива в значительной мере зависит от периода задержки воспламенения (ПЗВ). Если ЦЧ имеет слишком высокий показатель, это может привести к снижению ее скорости, что негативно скажется на процессе сгорания новых порций топлива, поскольку доступ кислорода будет затруднен. В этом случае новые порции топлива будут подаваться в горящую смесь, которая содержит продукты сгорания. И напротив, более низкий показатель ЦЧ в значительной мере увеличивает ПЗВ, что сопровождается более качественной подготовкой топливной смеси. В этом случае нарастание давления внутри камеры сгорания будет происходить интенсивнее. Вследствие повышенной динамики рабочего цикла это может привести к ускоренному износу трущихся поверхностей деталей, прорыву картерных газов и поломке поршневых пальцев [4, 5].

Промоторные добавки оказывают влияние на образование свободных радикалов, которые ини-

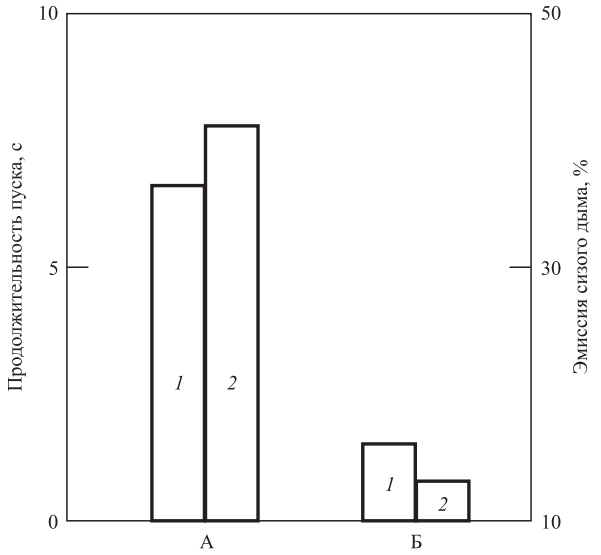


Рис. 3. Влияние промотора воспламенения на время пуска и эмиссию отработавших газов:

1 — время пуска, *2* — дымность ОГ; А — дизельное топливо без присадки; *Б* — топливо с присадкой

циируют процесс возгорания. Их воспламенение происходит благодаря частичному распаду молекул пероксидов и нитратов по связи O-O и O-N с учетом малой энергии активации. Данные присадки получили характерное название благодаря влиянию на процесс горения только на начальных стадиях рабочего цикла ДВС. К наиболее распространенным присадкам данного типа относятся: Zenteum ZR 668 и Kerobrisol EHN немецкого производства.

Стабилизирующие присадки

Данный класс топливных добавок напрямую влияет на ПЗВ, поскольку контролирует как степень, так и скорость окисления углеводородов во время нормального горения топливной смеси. К основным видам окислителей относятся: 24М6В, 26ВУМ, БАФ, ПОД ФА, ФДА, УСА, ДСА, а-нафтал.

Стабилизирующий эффект этих соединений основан на взаимодействии отдельных процессов, вызванных этими присадками.

Снижение КПД двигателя может быть вызвано неполнотой сгорания топливной смеси, что приведет к увеличению эмиссии в остаточных газах. Эффективность фильтруемости и прокачиваимости топлива также снижаются по причине избыточного количества осадков. При длительном хранении топлива возникает опасность окисления, при котором образуются пероксиды. Повышение уровня пероксидов снижает ОЧ бензинового топлива. Окисление топлива вызывает весьма ощутимый эффект, поскольку снижение ОЧ может изменяться от 3 до 5 единиц. Для снижения скорости окисления углеводородов применяют антиоксидантные присадки, которые снижают эффект воздействия кислорода на высокомолекулярные образования. Эти образования вступают в реакцию поликонденсации и полимеризации с такими кислородосодержащими соединениями, как спирты, пероксиды и кислоты. Они составляют отдельную фазу и содержатся в топливе в виде смол. Засорение топливной системы и камеры сгорания объясняется их высокой концентрацией и отложениями на стенках элементов топливной аппаратуры. Наличие антиоксидантной присадки позволяет оптимизировать процесс горения и смесеобразования благодаря снижению концентрации засоряющих смол.

Следует отметить, что полимеризация непредельных соединений и окисление предельных углеводородов не являются единственными процессами появления смол и отложений. Существует целый ряд углеводородных топлив, содержащих разнопородные активные соединения, в которых процесс появления уплотнений инициируется реакциями иного характера. Появление подобных соединений в составе топлива в основном объясняется деструктивным процессом переработки нефти. К таким соединениям можно отнести среднедистиллятные фракции [3]. Применение стабилизатора окисления в таком топливе не даст ощутимого эффекта, поскольку концентрация радикалов, с которыми взаимодействует присадка, будет минимальна [4].

Посредствам взаимодействия с радикалами, антиоксидант обрывает цепи окисления углеводородов, что приводит к локализации процесса появления пероксидов.

Главными показателями эффективности антиоксидантной присадки являются — химическая стабильность и индукционный период. Время сопротивления топлива окислению кислородом называется индукционным периодом.

Чтобы достигнуть экономического эффекта от снижения расхода антиоксиданта, применяют деактиваторы металлов. Их применение обусловлено оптимизацией стабилизирующего действия антиоксидантов и одновременным снижением их концентрации в топливе.

Принцип действия основан на создании прочных комплексов с металлами. Деактиваторы в значительной мере снижают каталитическое действие металлов путем воздействия на окислительный процесс углеводородов. Это позволит снизить содержание антиоксидантов в топливе на 35—75 % [4, 5].

Как было рассмотрено ранее, присадки антиоксидантного типа не всегда позволяют достичь желаемого эффекта снижения скорости окисления углеводородов. Их применение ограничено различными процессами образования уплотнений в зависимости от способа получения топлива. В случае низкой эффективности антиоксидантов на основе ингибиторов горения, применяют соединения с более высокой хи-

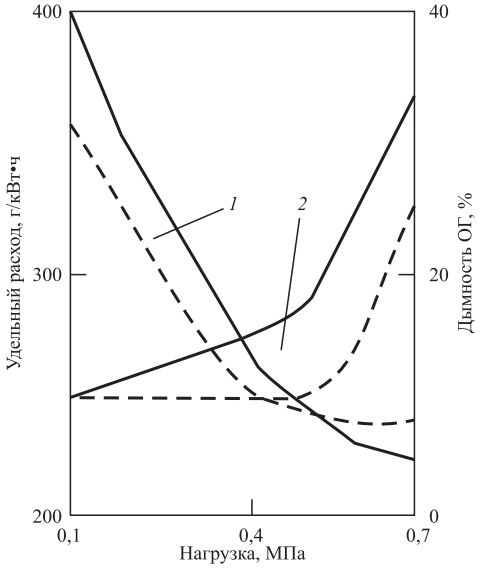


Рис. 4. Зависимость дымности ОГ и удельного расхода дизельного топлива от нагрузки:

1 — дымность ОГ; *2* — расход топлива; сплошная линия — дизельное топливо; пунктирная линия — ВТЭ, содержащая 10 % воды

мической и термоокислительной стабильностью — стабилизаторы комплексного действия.

Водотопливные эмульсии

При создании ДВС в настоящее время большое внимание уделяют повышению их экономичности и снижению выбросов вредных веществ в окружающую среду. Одним из наиболее перспективных способов является добавление воды в топливную смесь.

Применение топливно-водяных смесей зависит от нескольких факторов. К ним можно отнести: условия эксплуатации двигателя, тип применяемого топлива, способ образования топливно-воздушной смеси и т. д. В случае применения ВТЭ на основе дизельного топлива, дымность отработавших газов и содержание СО снижается, а также увеличивается концентрация предельных углеводородов. Содержание оксидов азота уменьшается. Следует отметить, что подача воды в бензиновую систему питания, противодействует детонационному сгоранию. Однако при работе двигателя на топливно-водяных смесях, срок службы топливной аппаратуры и деталей цилиндропоршневой группы значительно снижается [1]. Понижение предела выносливости стенок цилиндров и образование коррозионной среды, наблюдается в случае применения ВТЭ как на бензиновом двигателе, так и на дизельном. На рис.4 показаны графики изменения дымности и удельного расхода дизельного топлива при работе двигателя на водотопливной эмульсии.

Присадка воды к рабочему телу в процессе сгорания, применяется главным образом для снижения тепловой напряженности греющихся поверхностей [2]. Пары воды охлаждают не только поверхность камеры сгорания, но и собственно топливную смесь. Следует отметить, что реализация данного способа подачи ВТЭ позволяет достичь частичного увеличения индикаторного давления, однако вследствие отвода теплоты и испарения воды, происходит снижение индикаторного КПД. Это явление имеет место, когда поршень находится вблизи ВМТ.

Присадка воды к свежему заряду дизельного топлива, оказывает влияние на снижение концентрации окислов азота и токсичности ОГ, что является актуальным показателем для двигателей с внутренним смесеобразованием. Применение данного способа позволяет увеличить топливную экономичность благодаря оптимизации процесса смесеобразования. Вследствие снижения температуры топливной смеси происходит снижение скорости горения в цилиндрах, а также не возникают условия для создания детонации.

Выводы

- Применение антидетонационных присадок в бензиновых ДВС и водотопливных эмульсий позволяет снизить детонационный эффект и является наиболее эффективным методом повышения октанового числа бензинового топлива.
- Присадка воды к дизельному топливу позволяет снизить дымность ОГ на 20—30 %, а так же уменьшить содержание сажи. Так же можно отметить незначительное снижение КПД и уменьшение концентрации оксидов азота и углерода.
- Использование стабилизирующих присадок позволяет снизить эффект фракционного расслоения, вызванного понижением температуры, повышением количества воды и снижением концентрации ароматических углеводородов, что является вынужденной необходимостью при использовании ВТЭ или водометанольных топливных смесей в бензиновых ДВС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Асмус Т. У.** Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Т. У. Асмус, К. Боргнакке, С. К. Кларк и др.; под. ред. Д. Хиллиарда, Дж. С. Спингера: пер. с англ. А. М. Васильева; под. ред. А. В. Кострова. — М.: Машиностроение, 1988. — 504 с.
2. **Воинов А. Н.** Сгорание в быстроходных поршневых двигателях: 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1977. — 277 с.
3. **Григорьев Е. Г.** Газобаллонные автомобили / Е. Г. Григорьев, Б. Д. Корубаев, В. И. Ерохов и др. — М.: Машиностроение, 1989. — 216 с.
4. **Данилов А. М.** Классификация присадок и добавок к топливам // Нефтепереработка и нефтехимия. — 1997. — № 6. — С. 11—14.
5. **Данилов А. М.** Присадки к топливам. Разработка и применение в двигателях внутреннего сгорания // Химия и технология топлив и масел. — 2002. — № 6. — С. 43—50.

УДК 625.7/.8

С. П. Аржанухина, канд. техн. наук, **А. В. Бобков,** ФАУ "РОСДОРНИИ",
Ш. Н. Валиев, канд. техн. наук, доцент, Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ),
А. В. Кочетков, д-р техн. наук, профессор, e-mail: soni.81@mail.ru,
Пермский национальный исследовательский политехнический университет

АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ КОМПЛЕКСЫ ХРАНЕНИЯ И ПОДГОТОВКИ ПРОТИВОГОЛОЛЕДНЫХ РЕАГЕНТОВ ДЛЯ СОДЕРЖАНИЯ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДОРОГ И МОСТОВ

Рассматривается важная прикладная задача размещения автоматизированных комплексов хранения и подготовки противогололедных материалов на сети автомобильных дорог общего пользования. Комплексный подход по внедрению технологии зимнего содержания автомобильных дорог включает: строительство инфраструктурных объектов для содержания автомобильных дорог; обслуживание складских комплексов и оборудования; поставку противогололедных материалов, отвечающих современным требованиям; разработку нормативной и методической документации; обучение дорожных специалистов.

Ключевые слова: *автомобиль, автомобильная дорога, реагент, противогололедный материал, комплекс хранения, подготовка, автоматизация.*

S. P. Arzhanukhina, A. V. Bobkov, Sh. N. Valiyev, A. V. Kochetkov

AUTOMATED COMPLEXES OF STORAGE AND PREPARATION OF DEICING REAGENTS FOR THE MAINTENANCE OF HIGHWAYS AND BRIDGES

The important applied problem of placement of the automated complexes of storage and preparation of deicing materials on a network of public highways is considered. The integrated approach on introduction of technology of winter maintenance of highways includes: building of infrastructure objects for the maintenance of highways; service of warehouse complexes and equipment; supply of the deicing materials meeting the modern requirements; development of standard and methodical documentation; training of road experts.

Keywords: *car, highway, reagent, deicing material, storage complex, preparation, automation.*

Одной из "белых" тем в дорожном хозяйстве, еще не получивших ожидаемого уровня развития, оказалась важная прикладная задача размещения автоматизированных комплексов хранения и подготовки противогололедных реагентов (ПГР) на сети автомобильных дорог общего пользования. В связи с переходом зарубежных технологий зимнего содержания автомобильных дорог на применение "чистых" солей такие комплексы уже получили свое место на сети дорог США, Канады, Западной Европы. Между тем в России их применение связано с обычными солебазами, новые технические решения применяются лишь фрагментарно, по отдельным модулям, либо основаны на устаревших технологиях [1—5].

Технический подход компании "ИСТ" (Санкт-Петербург) совместно с ФАУ "РОСДОРНИИ" основан на изучении и анализе данной отрасли в России и в зарубежных странах, поиске лучших технологий и их адаптации непосредственно к особенностям регионов [6].

Предлагается внедрение современных технологий зимнего содержания автомобильных дорог, направленных на максимальный результат в борьбе с

зимней скользкостью; применение жидких ПГР и твердых ПГР со смачиванием. Комплексный подход по внедрению технологии зимнего содержания автомобильных дорог включает: строительство инфраструктурных объектов для содержания автомобильных дорог; обслуживание складских комплексов и оборудования; поставку ПГР, отвечающих современным требованиям; разработку нормативной и методической документации; проведение семинаров, тренингов и обучение дорожных специалистов всех уровней.

Применяемая технология основана на одновременном распределении твердых ПГР со смачиванием жидким раствором хлорида натрия или кальция в пропорции 70 к 30 % (70 % — твердый ПГР, преимущественно соль, NaCl); 30 % — жидкий ПГР, раствор NaCl 22 % или $CaCl_2$ 26 %) или на превентивной обработке дорожного полотна жидкими ПГР [1, 2].

Основные преимущества применяемой технологии:

— уменьшение расхода ПГР до 30—40 % за счет снижения потерь при распределении;

— равномерное распределение ПГР за счет лучшего прилипания соли к поверхности дорожного покрытия (или к снежно-ледяному образованию);

— быстрый эффект за счет сокращения времени растворения;

— расширение диапазона рабочих температур по сравнению с сухой солью до –25 °С;

— обеспечение эффекта "черный асфальт" или "в чистом виде";

— снижение экологической нагрузки на окружающую среду и влияния на объекты дорожной инфраструктуры;

— возможность использования технологии при любых погодных условиях.

На рис. 1 представлен предлагаемый к внедрению комплекс зимнего содержания автомобильных дорог "ИСТ Дорога".

"ИСТ Дорога" — это автоматизированный комплекс, предназначенный для эксплуатации дорожного покрытия в зимний период и выполняющий следующие функции: хранение и оперативная загрузка в комбинированные дорожные машины твердых противогололедных реагентов (ПГР); приготовление, хранение и раздача жидких ПГР, контроль расходования ПГР. Данные комплексы устанавливаются вдоль обслуживаемых трасс на территории дорожных предприятий, и позволяют значительно оптимизировать процесс зимнего содержания улично-дорожной сети. Автоматизированный комплекс совмещает в себе передовые европейские технологии зимнего содержания дорог, адаптированные под российскую специфику содержания.

В состав комплекса входит: крытый бетонно-деревянный склад для длительного хранения твердых ПГР, силос для хранения и оперативной загрузки твердых ПГР, пневматический транспортер с загрузочным бункером для перемещения твердых ПГР из склада в силос, автоматические солерастворные установки для приготовления жидких ПГР, узел длительного хранения и заправки жидких ПГР. Все узлы комплекса взаимосвязаны и работают как единая система, что позволяет поддерживать комплекс в постоянной оперативной готовности.

Рис. 1. Комплекс "ИСТ Дорога"

Сухие ПГР хранятся внутри крытого склада прямоугольной формы (рис. 2). Площадь склада в каждом отдельном случае рассчитывается под конкретные условия. В среднем она составляет 600 м^2, что позволяет хранить до 4000 т твердых ПГР. Конструктивно нижняя часть склада состоит из бетонного основания и бетонных стен высотой 0,5 м. Все бетонные конструкции обрабатываются защитными составами. Основной материал верхней части склада — это обработанное специализированными составами дерево на основе бруса ЛВЛ. Выбор дерева, как основного материала конструкции склада, позволяет осуществлять постоянный естественный воздухообмен, благодаря которому влажность внутри склада поддерживается на требуемом уровне, и твердые ПГР дольше сохраняют свои свойства.

Деревянные стены имеют теплопроводность в 3—5 раз ниже, чем у бетона и кирпича, что положительно сказывается на поддержании температурного режима. Внутри склада гладкое асфальтобетонное покрытие пола. Высота до нижнего пояса фермы 9 м, что позволяет самосвальной технике легко работать внутри. В складе предусмотрены решетчатые оконные проемы на тыловом фасаде и решетчатые въездные

Рис. 2. Деревянный склад для длительного хранения твердых ПГР

ворота, что увеличивает естественный воздухообмен для длительного хранения реагентов в сухом состоянии. Имеется внутреннее и наружное освещение. Склад оборудован распашными деревянными воротами с шириной проезда 5,4 м, а также отдельным входом.

Из склада в силос сухие ПГР перемещаются при помощи пневматического транспортера. Такой вид транспортеров используется для перемещения сыпучих реагентов и по сравнению с другими наиболее удобен в эксплуатации, обслуживании и ремонте. Загрузочный бункер, изготовленный из нержавеющей стали, загружается материалом при помощи погрузочной техники. Габариты бункера: ширина — 2,5 м, глубина — 2,5 м, высота 2,9 м, полезный объем более 6 м^3. Бункер может оборудоваться системой дробления комков и площадочным вибратором для встряхивания соли, что значительно уменьшает участие человека в процессе загрузки. Из загрузочного бункера при помощи горизонтального шнекового или роторного питателя материал равномерно поступает в пневмолинию, изготовленную из нержавеющей стали, где роторной воздуходувкой создается избыточное давление около 0,5 атм. Под действием избыточного давления материал вместе с воздухом перемещается в силос. Данный вид транспортера позволяет положительно воздействовать на материал в процессе транспортировки (устраняет комки, проветривает, подсушивает, при этом не измельчает в пыль), вследствие чего улучшаются эксплуатационные свойства сухих ПГР. Мощность пневмотранспортера может быть разной, от 15 до 100 кВт. В среднем фактически потребляемая электрическая мощность около 35 кВт. При такой мощности производительность составляет до 25 т соли в час.

Для хранения и оперативной загрузки сухих ПГР в состав автоматизированного комплекса входит деревянный силос (рис.3) с полезным объемом от 5 до 600 м^3, что позволяет хранить в готовом к загрузке состоянии необходимое количество соли. Основание силоса — бетонный ростверк, рассчитанный на вес заполненного силоса и снаряженной коммунальной техники. В комплект силоса входит деревянная лестница с площадкой обслуживания и платформа оператора для визуального контроля загрузки твердых ПГР, где находятся все органы управления силосом. В стандартной комплектации силос оснащен ручным загрузочным клапаном, противоветренным загрузочным рукавом и деревянным молотом (клопфером) для удаления солевых пробок при загрузке коммунальной техники. Силос оснащается дополнительными опциями:

- система тензометрических датчиков для измерения веса твердых ПГР в силосе, позволяет вести строгий учет расходования твердых ПГР;

Рис. 3. Деревянный силос для хранения и оперативной загрузки твердых ПГР

- система дистанционного управления загрузочным клапаном и загрузочным рукавом с помощью пневмо- и электроприводов, площадочный вибратор для устранения солевых пробок при загрузке;
- электронная система автоматической загрузки коммунальной техники твердыми ПГР с использованием чип-карт с привязкой к каждой единице техники. Выдача информации о количестве отгруженных ПГР на внешние устройства для автоматического ведения статистики.

Комплекс "ИСТ Дорога" оборудован станциями для приготовления растворов, модель Quanto NaCl и Quanto $CaCl_2$ (рис. 4). Производительность таких станций регулируется в диапазоне от 500 до 3500 л/ч. Производство раствора полностью автоматизировано. Конструктивно установка состоит из цилиндрической емкости диаметром от 2,4 до 3 м и шкафа управления. Материал изготовления емкости — армированный стеклопластик, устойчивый к атмосферным воздействиям, температуре и другим внешним факторам. Стеклопластик долговечен в эксплуатации (расчетный срок службы более 30 лет). В верхней части емкости выделен конусообразный отсек для растворения. В нижней части емкости накапливается готовый раствор. В шкафу управления расположен циркуляционный насос, электрифицированные запорные клапаны, электронный плотномер, элементы системы управления и автоматики.

Производство раствора NaCl непрерывно, соль напрямую из силоса поступает в конусообразный отсек для растворения. В нижнюю часть отсека подается вода. Уровень воды растет, образуется концентрированный раствор. Через систему фильтров раствор поступает в нижнюю часть емкости. Концентрацию раствора в процессе приготовления контролирует электронный плотномер. Автоматически управляе-

Рис. 4. Станция приготовления солевых жидких ПГР

Рис. 5. Накопительный резервуар для жидких ПГР

мый регулирующий клапан поддерживает концентрацию раствора в нижней части емкости на заданном значении. Готовый раствор автоматически перекачивается в емкость длительного хранения жидких ПГР. Приготовление раствора $CaCl_2$ циклично. Следует обеспечивать процесс подвозом необходимого количества твердых ПГР, так как загрузка осуществляется через загрузочный бункер погрузчиком. При помощи шнекового транспортера твердые ПГР подаются в установку для приготовления солевых растворов. Частота оборотов шнекового транспортера автоматически регулируется с помощью частотного преобразователя, это необходимо для равномерной и постепенной загрузки твердых ПГР в процессе растворения $CaCl_2$. Готовый раствор автоматически перекачивается в накопительные емкости.

Накопительные резервуары (рис. 5) поставляются в вертикальном исполнении объемом от 10 до 50 м^3. Изготавливаются они, как и установки для приготовления солевых растворов, из армированного стеклопластика. Стеклопластик обладает рядом преимуществ по сравнению с конкурирующими материалами, такими как металл или различные пластмассы, а также невысок по стоимости.

Система мониторинга уровня в накопительных резервуарах контролирует текущий уровень в каждой емкости, а также дискретные сигналы с датчиков аварийного уровня. Имеется возможность вывести данные по уровням на внешние устройства унифицированными токовыми сигналами. При заполнении накопительных емкостей производство раствора в установках приостанавливается до момента расходования жидких ПГР, после чего производство автоматически возобновляется. Установки для приготовления солевых растворов требуется запустить в начале сезона и отключить лишь в конце. Остальной процесс приготовления и перекачки в накопительные емкости полностью автоматизирован.

В состав комплекса "ИСТ Дорога" включена станция заправки жидкими ПГР (рис. 6). В зависимости от модели станции заправки, одновременно могут заправляться одна или две единицы техники. Скорость загрузки по одной линии от 30 до 75 м^3/ч в зависимости от модели заправочной станции. На месте загрузки устанавливаются Г-образные шланговые держатели с закрепленными на них шлангами. При помощи станции заправки жидкие ПГР перекачиваются из накопительных емкостей в баки коммунальной техники. Имеется функция автоматического завершения процесса заправки при условии наличия в баке автомобиля поплавкового датчика заполнения. Иначе процесс происходит под постоянным визуальным контролем оператора. Так же в станции заправки жидкими ПГР имеется функция

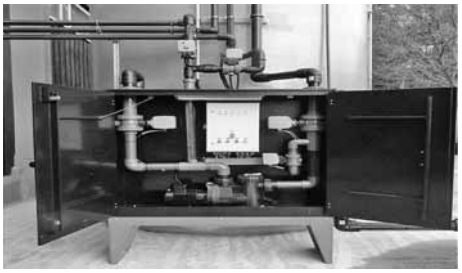


Рис. 6. Станция заправки жидкими ПГР на одну единицу техники

перемешивания раствора в накопительных емкостях (запускается автоматически раз в неделю), функция обратной перекачки раствора из бака коммунальной техники в накопительные емкости. Опционально заправочная станция может оснащаться интеллектуальной системой с использованием чип-карт.

Значительно автоматизирует и упрощает процесс загрузки как твердыми, так и жидкими ПГР цифровая система автоматизации загрузки. К каждой единице техники привязывается чип-карта. При идентификации карты система знает, с какими параметрами техника встала на погрузку. Загрузка твердых и жидких ПГР может осуществляться одновременно. При загрузке твердых ПГР с использованием интеллектуальной системы загрузки, автоматически на нужную высоту опускается противоветренный загрузочный рукав силоса, открываются створки загрузочного клапана силоса. При срабатывании датчика заполнения кузова процесс загрузки автоматически останавливается. Данные о количестве загруженных твердых ПГР поступают на внешние цифровые устройства для ведения статистики по каждой единице техники. При загрузке жидких ПГР процесс протекает в автоматическом режиме и данные о количестве загруженных ПГР поступают на внешние цифровые устройства. Интеллектуальная система позволяет всем элементам комплекса "ИСТ Дорога" работать как единое целое, что обеспечивает качество, оперативность, простоту контроля и учета, экономичность и комфорт в работе дорожно-эксплуатационных служб.

В данный момент разрабатывается автоматизированная система контроля дорожного обслуживания, осуществляющая обработку следующей информации: расход ПГР при загрузке спецтехники; расход ПГР при распределении на автодороги; маршрут и скорость движения спецтехники; расход топлива. Интеграция системы в АСУДД дает полную картину содержания автомобильных дорог в реальном времени.

Компания ИСТ осуществляет проектирование современных дорожно-эксплуатационных баз и поставку автоматизированных комплексов зимнего содержания "ИСТ Дорога" или его отдельных компонентов. Предлагается разработка, комплектация и поставка автоматизированного комплекса или его отдельных компонентов в соответствии с требованиями заказчика: деревянные склады для хранения твердых солей; деревянные силосы для хранения твердых солей и оперативной загрузки КДМ; автоматические станции приготовления солевых растворов (жидких ПГР); армированные стеклопластиковые накопительные емкости для хранения жидких ПГР.

Основные преимущества применения автоматизированного комплекса дорожными службами: оперативность реагирования на опасные зимние погодные условия, сокращение времени уборки автомобильных дорог; контроль и экономичный расход твердых и жидких ПГР с помощью автоматизированной системы учета; внедрение инновационных и эффективных технологий зимнего содержания (работа растворами, превентивная обработка дорог жидкими ПГР, технология смачивания соли); автоматизация и оптимизация процессов, сокращение затрат на содержание, контроль за системой содержания дорог; повышение безопасности дорожного движения; увеличение пропускной способности; поддержание общей мировой тенденции перехода на "чистые соли" с применением растворов.

Протяженность участка автомобильной дороги, обслуживаемого одним комплексом — до 70 км. В разработке комплекса принимали участие ведущие специалисты России, Швейцарии и Германии. В настоящее время производство значительной части узлов и компонентов локализовано в России. Все компоненты комплекса отвечают передовым мировым технологиям зимнего содержания автомобильных дорог. Главными особенностям комплекса являются функциональность, надежность и конкурентоспособная цена. При необходимости комплекс может быть перестроен на противогололедные материалы, разрешенные к применению на мостовых сооружениях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Аржанухина С. П.** Совершенствование технологий применения противогололедных материалов при зимнем содержании автомобильных дорог. — Волгоград. Дисс. на соиск. канд. техн. наук. 2009. — 180 с.
2. **Проблемы долговечности цементных бетонов** / Рапопорт П. Б., Рапопорт Н. В., Кочетков А. В., Васильев Ю. Э., Каменев В. В. // Строительные материалы. 2011. № 5. С. 38—41.
3. **Диагностика и паспортизация элементов** улично-дорожной сети системой видеокомпьютерного сканирования / Васильев Ю. Э., Беляков А. Б., Кочетков А. В., Беляев Д. С. // Интернет-журнал Науковедение. — 2013. — № 3 (16). — С. 5.
4. **Шероховатые поверхности:** нормирование, проектирование и устройство / Кочетков А. В., Суслиганов П. С. // Автомобильные дороги. — 2005. — № 1. — С. 54.
5. **Аржанухина С. П.** Отраслевые особенности применения хлорида кальция // Строительные материалы. — 2010. — № 10. — С. 60—61.
6. **Аржанухина С. П.** Современное состояние вопросов зимнего содержания автомобильных дорог // Строительные материалы. — 2010. — № 5. С. 16—19.
7. **Интернет-ресурс** www.ist-c.com.

УДК 629.113
Дэн Чэнгун, аспирант, МАДИ
E-mail: 605661710@mail.ru

РОЛЬ АВТОМОБИЛЬНОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПОНЕНТНОГО РАЗВИТИЯ ЭКОНОМИКИ КНР

В статье рассматриваются анализ развития автомобильной промышленности Китая. В эволюции автомобильной промышленности КНР, в зависимости от целей и задач, поставленных государством по развитию отрасли, автор выделяет пять этапов. В процессе развития экономики страны важную роль играет развитие автопромышленности.

Ключевые слова: *автомобильная промышленность, экономика страны, Китай.*

Deng Chenggong

THE ROLE OF THE AUTOMOTIVE INDUSTRY IN THE PROCESS OF EXPONENTIAL DEVELOPMENT OF CHINA'S ECONOMY

The article deals with the analysis of the development of China's auto industry. In the evolution of the automobile industry of China, depending on the goals and targets set by the state on the development of the industry the authors identify five stages and the important role played by the automotive industry in the economic development of the country.

Keywords: *the automotive industry, the economy, China.*

Роль автомобильной промышленности в современной национальной экономике, а также перспективы развития этой отрасли зависят от того, какое место занимает автомобильный транспорт в инфраструктуре страны, какова его роль в социально-экономическом развитии страны. Автомобилестроение напрямую воздействует на научно-технический прогресс. В свою очередь, показатель обеспеченности легковыми автомобилями свидетельствует о покупательной способности населения, а значит, и об уровне жизни.

Эволюция мирового автомобилестроения показала, что на современном этапе эта отрасль стала действительно глобальной, влияющей на развитие других отраслей мировой промышленности и экономики. В совокупности эта отрасль способствует высокому уровню занятости в развитых странах, являющихся основными центрами автомобилестроения. В указанной группе стран вклад автомобилестроения в ВВП составляет около 10 % [1].

История автомобилестроения в КНР существенно отличается от особенностей эволюционного развития других отраслей промышленности этой страны, связанных с производством массовой продукции. Дело в том, что большую часть потребительских товаров КНР стал экспортировать уже тогда, когда внутренний рынок страны был достаточно узок. Производство автомобилей в КНР, напротив, стало интенсивно развиваться лишь в последние полтора десятилетия, в условиях роста доходов населения и увеличения внутреннего спроса со стороны населения на автомобили.

В 2014 г. в Китае было произведено свыше 23,7 млн автомобилей. Кроме того, автомобильная промышленность продолжает демонстрировать высокие темпы роста как и рост ВВП страны (в 2014 г. рост производства автомобилей составил 7,3 % [2], а рост ВВП —7,4 %). Очевидно, что успехи автомобильной промышленности связаны с благоприятной экономической конъюнктурой в стране. При этом, как указывается в исследованиях, при таких высоких темпах роста автомобильные корпорации КНР были не заинтересованы в выходе на конкурентные рынки США и ЕС, стагнирующие в последние годы.

Более того, в отличие от Японии и Южной Кореи, китайскими являются автомобили как местного производства, так и все импортные автомобили. На последние приходится свыше 70 % продаж.

В эволюции автомобильной промышленности КНР, в зависимости от целей и задач, поставленных государством по развитию отрасли, автор выделяет следующие этапы.

Этап 1. 50—60 годы. Развитие автомобильной промышленности КНР на основе ориентации на потребности ВПК. История китайской автомобильной промышленности начинается с 1953 г., когда был основан первый автомобильный завод в г. Чанчуне (провинция Цзилинь). 1956 год можно считать годом рождения автопрома КНР, когда в г. Чанчунь при участии советских специалистов завода FAW (First Automobile Works — Первый автомобильный завод) был выпущен первый грузовик Jiefang ("Освобождение"), являющийся копией автомобиля ЗИС-150. Сборку в Китае удалось наладить исключительно с помощью спонсорской поддержки СССР.

Этап 2. 60—70 годы. Период ориентации на собственные силы. В 1965 г. правительство Мао Дзэдуна принимает решение об аннулировании обязательств Советского Союза по оказанию технического содействия в строительстве промышленных предприятий, отказавшись таким образом от научно-технической помощи СССР. Страну ждала политика "Большого скачка" с опорой на собственные силы. В результате, по идеологическим мотивам производство легковых автомобилей было практически прекращено. Попытка заменить профессионализм энтузиазмом народных масс во всех отраслях тяжелой промышленности привела к тому, что работа автомобильных заводов все больше сводилась к функциям авторемонтных предприятий.

Этап 3. Конец семидесятых годов. Период "большого скачка" на основе привлечения иностранных инвестиций. В 1978 г. под руководством Коммунистической Партии Китая, фактически возглавляемой Дэн Сяопином, начались преобразования, получившие название "Политика реформ и открытости", направленные на оживление экономики и ликвидацию негативных последствий экспериментов периода "Большого скачка". Начальный этап реформы характеризовался отсутствием какого-либо четкого стратегического плана проведения и был мерами, позволяющими решать текущие проблемы.

В 1980-е годы в стране появились крупнейшие мировые автомобильные ТНК, которые стали как организовывать совместные предприятия, так и строить собственные заводы по производству легковых автомобилей. Этот период корпоративного оживления отрасли КНР завершился открытием страны для привлечения иностранных инвестиций на основе развития сотрудничества с ведущими автомобильными ТНК.

Этап 4. Девяностые—"нулевые" годы. Развитие собственных автомобильных марок. Примечательно, что до середины 1990-х гг. автомобильная промышленность КНР развивалась крайне неравномерно, и только с 1994 г. начался период стабильного развития. Уже в 2003 г. КНР вышел на четвертое место в мире по производству автомобилей, выпустив 4,44 млн единиц, а в 2006 г. с общим объемом выпуска в 5,5 млн автомобилей опередил Германию.

Большое значение в деле либерализации автомобильной промышленности и привлечения иностранных инвестиций в эту отрасль стала реализация новой промышленной политики в автомобилестроении, которая была принята в 1994 г. в рамках десятилетней Программы развития автомобильной промышленности [4].

В соответствии с этой программой, в Китае должно было существовать девять крупных производителей продукции автомобилестроения.

Одновременно вводился ряд ограничений для совместных предприятий, выпускающих продукцию для внутреннего рынка. Так, эти предприятия не могли принадлежать иностранным концернам более чем наполовину, хотя такое требование не распространялось на производителей автомобильных компонентов с иностранным участием. Целью Программы было стимулирование развития национальных производителей и создание условий для проведения НИОКР и последующего производства качественной продукции на основе использования передового зарубежного опыта. Правительство страны, поддерживая производителей, стремилось и к развитию компаний-поставщиков комплектующих и материалов.

Результатом реформ, указанных выше, в середине девяностых годов было образовано совместное предприятие между General Motors (GM) и Shanghai Automotive Industry Corporation (SAIC), а также ряд других совместных предприятий. В настоящее время в Китае насчитывается свыше 25 таких предприятий с участием иностранных инвесторов, выпускающих готовые автомобили [5] и значительно больше предприятий, выпускающих оборудование и комплектующие для сборки автомобилей [6]. Несмотря на это, каждому совместному предприятию необходимо получить одобрение со стороны правительства.

Этап 5. Двухтысячные годы по настоящее время: Это этап развития внешней торговли автомобилями. В 2000-е гг. автомобильная промышленность Китая идет по пути замещения зарубежных производителей собственными автомобильными заводами, 100 % капитала которых принадлежит государству либо частным компаниям [7]. По состоянию на сегодняшний день из более чем 130 производителей продукции автомобилестроения лишь одна четверть приходится на предприятия с участием иностранного капитала. Тем не менее иностранные инвесторы не снижают своей активности в Китае, поскольку их привлекает в КНР высокая норма прибыли на уровне 30 %.

Развитие рынка автомобилей КНР в последние полтора десятилетия в немалой степени было обусловлено присоединением страны к ВТО, которое дало серьезный толчок социально-экономическому развитию Китая, который к 2013 г. вышел на второе место в мире по объему производимого ВВП (13,3 трлн долл. по паритету покупательной способности) [8].

За период 2000—2013 гг. Китай переместился из нижней группы стран со средним доходом населения в среднюю, а индекс развития человеческого потенциала в этой стране составил 0,7.

Для стратегии производителей автомобилей в КНР на современном этапе характерны оптимальная и успешная комбинация аутсорсинга из ведущих развитых стран с развитием собственного производства [9]. Примечательно, что китайцы часто прибегают к копированию моделей автомобилей, наиболее успешно реализуемых на внутреннем рынке, а также копируют способ продвижения собственной продукции на мировой рынок с постепенным переходом от заимствования лишь идеи автомобиля с последующей ее разработкой самостоятельно, но по более низкой цене. Исторически сложившаяся дешевизна трудовых ресурсов КНР, а также ориентация значительной части населения на массовые недорогие автомобили, обусловливают высокую рентабельность, однако низкую степень индивидуализированности производства.

Важную роль во внешнеэкономических связях автомобильной промышленности КНР играет его участие в слияниях и поглощениях. На протяжении всей своей истории Китай участвовал в различного рода трансграничных сделках по слияниям и поглощениям, а также в стратегических альянсах. Основные из этих сделок систематизированы в таблице.

На современном этапе развития сделок слияний и поглощений компаний в автомобильной промышленности технологические мотивы характерны для компаний из Китая и Индии. Примерами таких сделок явля-

Участие КНР в процессах реструктуризации автомобильной промышленности

Год	Тип сделки	Компании-участницы	Особенности сделки
1958	Поглощение	(1) Shanghai Powcrtrain Machinery Manufacturing Company, (2) Shanghai Internal Combustion Engine Components Company и (3) Shanghai Powcrtrain Equipment Manufacturing Company	(1) поглощает (2) и (3)
1984	Совместное предприятие	SAIC, Volkswagen	Создание совместного предприятия на территории Китая под названием Shanghai Volkswagen Automotive Company (SVAC), доли обеих компаний составляют по 50 %
1997	Совместное предприятие	SAIC, General Motors	Создание совместного предприятия Shanghai General Motors Company Limited (Shanghai GM), доли в которой составили по 50 %
1998	Стратегический альянс	General Motors, Suzuki	Создание на территории Китая стратегического альянса Chongqing Chang'an Suzuki Automobile
2002	Совместное предприятие	Hyundai, Beijing Automotive Industry Holding	
2005	Поглощение	Nanjing Automobile Corporation, MG Rover Group Ltd.	Nanjing Automobile Corporation приобрела MG Rover за 53 млн фунтов стерлингов. Компания SAIC пыталась приобрести торговую марку Rover за 11 млн фунтов стерлингов у немецкой BMW Group, но торговая марка была продана Ford
2007	Слияние	SAIC Motor, Nanjing Automobile Corporation	SAIC Motor приобрела 50 % акций Nanjing Auto у итальянской компании Fiat.
2010	Поглощение	Zhejiang Geely, Volvo Car Corporation	

ются продажа шведской компании Volvo Car Corporation в 2010 г. китайскому холдингу Zhejiang Geely, а также покупка индийской компанией Tata Motors в 2008 г. британской компании Jaguar Land Rover [10].

Национальные производители автомобилей КНР активно участвуют в сделках по слиянию и поглощению предприятий автопрома. Они планируют активно участвовать в завоевании внешних рынков уже в ближайшие годы. Речь идет главным образом о росте своего присутствия в Индии, России и странах Юго-Восточной Азии. Тем не менее не исключены и поглощения китайскими производителями западных. Так, например, компания Dongfeng уже приобрела в феврале 2014 г. 14 % французской группы PSA Peugeot-Citroen [11].

Возвращаясь к вопросу динамики спроса на автомобили на рынке КНР, отметим, что все годы правительство проводило последовательную политику, направленную на ограничение роста автомобилей на дорогах, в результате чего в условиях роста производства уже в 2004 г. замедлился рост продаж. Поэтому китайские производители впервые стали переориентироваться на внешние рынки, в первую очередь на США и ЕС, что происходило, в частности, под давлением иностранных конкурентов.

Экспортная ориентация автомобильной промышленности КНР возникла стихийно, в отличие, например, от Южной Кореи и Японии, где ориентация на экспорт была задумана изначально. Со стороны Китая мировому рынку были предложены те автомобили, которые пользовались значительным спросом на внутреннем рынке. Так, в девяностые годы это были небольшие японские микроавтобусы, производимые в КНР по лицензии; большие лицензионные внедорожники. Качество и потребительские свойства экспортной продукции были продиктованы внутренним рынком и уровнем развития автомобильной промышленности десять лет назад. В настоящее время в Китае популярен такой тип автомобиля, как современный седан-"гольф" с двигателем до 2 л и стоимостью до 16 тыс. долл.

Инвестиционные процессы в автомобильной промышленности КНР увязываются отечественными исследователями в рамках "парадигмы летящих гусей", предложенной японским экономистом К. Акамацу и объясняющим три фазы развития отрасли. Так, считается, что автомобилестроение КНР прошло первую фазу, когда продукция поступает в экономику через импорт зарубежных производителей; вторую — когда удовлетворение национального спроса способствует открытию новых местных производств. Сегодня автомобильная промышленность КНР находится в третьей фазе, когда излишки производимой продукции экспортируются на внешние рынки [12].

В целом, характеризуя динамику рынка автомобилей в КНР за последние полвека, можно отметить, что в ней прослеживается два этапа: этап экстенсивного развития (1956—1999 гг.) с минимальными темпами прироста, и этап интенсивного развития (2000—2013 гг.) с темпами прироста продукции, превышающими темпы прироста ВВП страны (рисунок).

В условиях принятия на себя обязательств ВТО, а также, руководствуясь политикой государственного регулирования отрасли, Китай не наращивает объемы импорта готовой продукции автомобилестроения,

Динамика производства автомобилей в КНР в 1956—2014 гг.

Составлен автором по: Automotive Statistics [Электронный ресурс]. — China Association of Automobile Manufacturers, 2015. — Режим доступа: http://caam.org.cn/english/newslist/a101-1.html

а ориентируется на импорт основных узлов и комплектующих. Речь идет, прежде всего, о машинокомплектах для сборочных производств, в то время как объем импорта собранных в рамках имеющихся квот автомобилей растет невысокими темпами.

Что касается конкуренции на рынке автомобилей КНР, то основными конкурентами для китайских производителей остаются ведущие автомобильные ТНК. Предприятия с участием иностранного капитала выгодны КНР, так как они позволяют на базе моделей ведущих автомобильных концернов выпускать собственные автомобили. Тем не менее, китайские заводы продолжают сталкиваться с растущей конкуренцией со стороны сборочных предприятий ведущих автомобильных ТНК. Таким образом, конкурентные отношения на рынке постепенно преобразуются в процесс конкуренции между иностранными производителями, выпускающими автомобили местной сборки. Это предопределит возможную реструктуризацию в отрасли на основе перестройки государственного регулирования ее развития.

Таким образом, успехи в автомобильной промышленности КНР во многом были достигнуты благодаря грамотному заимствованию передового зарубежного опыта развития автомобилестроения. На новейшем этапе своего развития автомобильную промышленность КНР характеризует возрастающая степень интернационализации, что реализуется в форме экспорта, инвестиционного сотрудничества в форме совместных предприятий, научно-технического взаимодействия между китайскими производителями и ведущими автомобильными ТНК. Однако в качестве ключевой формы внешнеэкономических связей отрасли остается международная кооперация производства, предполагающая не простое объединение иностранных инвесторов на базе общих экономических интересов, а, главным образом, организацию широкого производства промежуточной продукции (преимущественно автомобильных компонентов) и привязку технических параметров готовой продукции ее составляющих, обеспечивающих унификацию и взаимозависимость изделий с учетом общепринятых международных технических стандартов.

Вывод

Эффективность развития автомобилестроения в КНР заключается в специфической комбинации таких предпосылок, как значительные объемы внутренних и иностранных инвестиций, массовое производство и экспорт недорогой продукции относительно высокого качества; копирование необходимых технологий ведущих автомобильных ТНК; использование дешевых автомобильных компонентов собственного производства и дешевой рабочей силы; реализация государственной экспортоориентированной политики развития отрасли.

В некоторой степени стратегия КНР идет в одном русле со стратегиями реформирования автомобилестроения в других крупнейших азиатских странах-производителях — Южной Корее и Японии, позволяет постепенно наращивать экспортную ориентацию. Аналогичное развитие автомобилестроения характерно для других стран БРИКС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сарыгулов М. А.** Об одном эмпирическом показателе инновационного развития отрасли // Проблемы современной экономики. 2013. № 3 (47).
2. **В 2013 г.** в **Китае выпущено более 20 млн автомобилей** [Электронный ресурс]. — ChinaPro — Деловой журнал про Китай, 11.12.2014. — Режим доступа: http://www.chinapro.ru/rubrics/1/10314/.
3. **Морозов С. А., Коробов Д. Г.** Автомобильная промышленность КНР: от истоков к перспективам // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 2 (73).
4. **Бараболина А. И., Хузиятов Т. Д.** Инновационный аспект национальной автомобильной политики КНР на современном этапе // Проблемы современной экономики. 2010. № 3 (31).
5. **Куликов Ю. И.** Автомобильные перевозки: учеб. пособие для вузов / Ю. И. Куликов, И. Н. Пугачев, Г. Я. Маркелов. — Хабаровск: Изд-во ТОГУ, 2010. — 281 с.
6. **Бубнов В. В., Кизим А. А.** Анализ мирового рынка легковых автомобилей // Научный журнал КубГАУ. 2013. № 88 (04).
7. **Морозов** С. **А., Коробов Д. Г.** Автомобильная промышленность КНР: от истоков к перспективам // Журнал автомобильных инженеров. 2012. № 2 (73).
8. **Китай поддержит иностранных инвесторов** высокотехнологичных производств [Электронный ресурс]. — China Logist, 29.06.2013. — Режим доступа: http://chinalogist.ru/book/articles/perevody/kitay-podderzhit-inostrannyh-investorov-vysokotehnologichnyh -proizvodstv
9. **Морозов** С. **А., Коробов Д. Г.** Автомобильная промышленность КНР: от истоков к перспективам // Журнал автомобильных инженеров. 2013. № 2 (73).
10. **Хубиев А. П.** Реструктуризация российской автомобильной промышленности в контексте современного мирового опыта слияний и поглощений: Дисс. канд. экон. наук, 08.00.14. — М.: ГУУ, 2012. С. 4, 16, 21.
11. **Полоцкий А.** Dongfeng Motor получила доступ к секретам французского автопрома [Электронный ресурс]. — RBC-Daily, 11.12.2014. — Режим доступа: http://rbcdaily.ru/world/562949990602012
12. **Долгих И. В.** Автомобилестроение Китая по теории Акамацу [Электронный ресурс]. — Научно-техническая библиотека Томского политехнического университета. — Режим доступа: http://www.lib.tpu.ru/fulltext/c/2013/C23/V1/019.pdf

УДК 629.113

В. Н. Козловский, д-р техн. наук, СамГТУ, г. Самара, **А. В. Заятров,** канд. техн. наук, ТГУ, г. Тольятти,
Д. И. Панюков, канд. техн. наук, ПВГУС, г. Тольятти
E-mail: kozlovskiy-76@mail.ru

ИНФОРМАЦИОННО-АНАЛИТИЧЕСКИЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ КЛЮЧЕВЫХ ПРОБЛЕМ НАДЕЖНОСТИ В АВТОМОБИЛЕСТРОЕНИИ

В статье представлены результаты разработки метода определения ключевых проблем надежности автомобилей в эксплуатации.

Ключевые слова: *качество, надежность, ремонтопригодность, удовлетворенность потребителей, автомобиль.*

V. N. Kozlovskiy, A. V. Zaytrov, D. I. Panyukov

INFORMATION-ANALYTICAL METHOD FOR DETERMINING THE RELIABILITY OF THE KEY ISSUES IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY

The article presents the results of the method for determining the key issues of reliability of cars in operation.

Keywords: *quality, reliability, maintainability, customer satisfaction, the car.*

Оценка эксплуатационно-экономической эффективности продукции автомобилестроения должна интегрировать в себе критерии, связанные с надежностью, через показатели безотказности и ремонтопригодности. Для обеспечения требуемых показателей безотказности продукции в эксплуатации, автопроизводитель, кроме всего прочего, в рамках корпоративной системы менеджмента качества, должен разработать и реализовать информационно-аналитический комплекс ранжирования проблем на этапах проектирования производства и эксплуатации. Такой комплекс, с одной стороны, позволит оперативно вскрывать и решать текущие проблемы качества, а с другой — обеспечивает создание перспективного задела решенных проблем, который создаст фундамент для улучшения качества и конкурентоспособности продукции в будущие периоды [1].

Рассматривая современный высокотехнологичный продукт машиностроения, к числу которых относится автомобиль, можно выделить несколько проблемных вопросов, которые должны быть отражены при решении задачи, связанной с разработкой методологии ранжирования проблем надежности.

Во-первых, современный автомобиль состоит из десятков тысяч деталей, узлов и агрегатов, что требует формализации перечня отказов через стандартизированный кодификатор. Во-вторых, устранение отказов, возникших в сложном техническом объекте, должно быть нормировано с точки зрения трудоемкости и затрат. В-третьих, компания-автопроизводитель должна наладить системную практику получения данных о качестве продукции в процессе проектирования, производства и эксплуатации.

Разрешение выделенных вопросов в современной практике осуществляется путем разработки корпоративных информационных систем, в которых в виде электронных каталогов заносятся соответствующие параметры. Наиболее сложным является решение третьей проблемы, поскольку в данном случае требуется организовать систему постоянного потока данных о проблемах качества продукции в действующем производстве и в эксплуатации, который обеспечивает необходимый информационный объем для проведения мониторинга эффективности качества (рис. 1).

Разработка и реализация организационно-технических мероприятий, решающих выделенные проблемы — это один из основных приоритетов компаний в деле создания и совершенствования корпоративной системы менеджмента качества. Именно на данном этапе встает актуальная задача, связанная

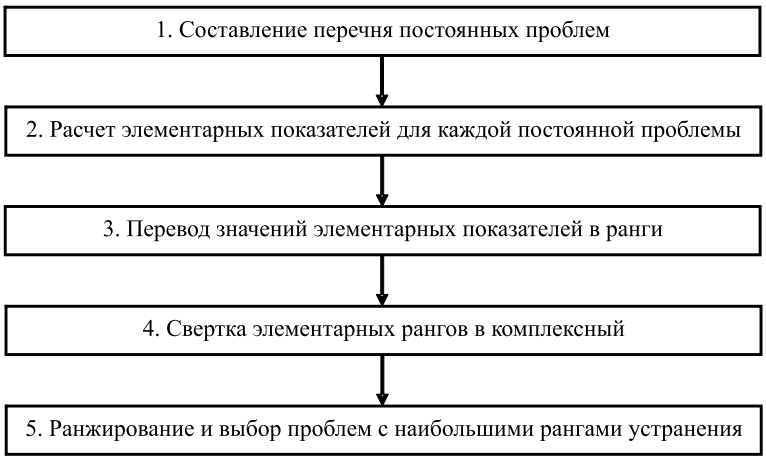


Рис. 1. Общая схема ранжирования проблем

с созданием и внедрением в практику инструментария управлением данными, который обеспечивает быстроту и полноту вскрытия проблем надежности продукции с позиций безотказности и ремонтопригодности.

До недавнего времени, в практике многих российских компаний, при ранжировании проблем надежности, по сути, учитывался один параметр — частота или приведенный, например, к гарантийному парку, уровень отказов по определенному коду кодификатора [1—3]. При этом аспект, связанный с затратами на устранение отказа в условиях предприятий фирменного автосервиса, считался второстепенным. Однако конкурентная среда, в условиях которой сегодня работают национальные автопроизводители, предопределила необходимость многофакторного исследования проблем надежности, исходя из уровня безотказности и денежного эквивалента трудоемкости устранения отказов машиностроительной продукции.

В настоящее время активно развивается методология многофакторного исследования критериев эффективности качества продукции, в решении задачи ранжирования проблем. Именно поэтому в представленной работе предлагается методика вскрытия ключевых проблем надежности автомобилей, ориентированная на предприятия массового производства, реализация которой в виде программных кодов обеспечивает рост эффективности аналитических процессов управления качеством.

Целью данного исследования является разработка метода ранжирования проблем надежности высокотехнологичной продукции автомобилестроения, в массовом производстве, с реализацией разработанных алгоритмов и программных комплексов, обеспечивающих эффективный процесс мониторинга надежности, в практике крупного автопроизводителя [4—6, 8].

Ранжирование проблем надежности используется на подготовительном этапе процесса их решения с помощью известного метода 8D [1, 2], на специально выделенном, подготовительном этапе "Определение проблемы". Предпосылкой существования проблемы является отказ техники в эксплуатации. Под проблемой понимается ситуация, при которой ожидаемый уровень выполнения определенной работы (норматив) не достигается, и причина невыполнения этого норматива не известна. Таким образом, проблема — это дефект, несоответствие или отказ, один из показателей которого (например, частота возникновения, значимость, изменение частоты возникновения) не укладывается в допустимые пределы по неизвестной причине.

Такой подход к идентификации проблемы потребовал бы установления нормативных значений по всем рассматриваемым показателям отдельно, что является очень трудоемким. Он невозможен еще и по причине непостоянства перечня проблем. Именно поэтому для решения задачи вскрытия ключевых проблем надежности используется метод ранжирования. Метод позволяет поставить в соответствие каждой проблеме количественную оценку важности ее устранения как для потребителя, так и для автопроизводителя — приоритетное число риска. Это позволяет установить одинаковое для всех проблем перечня (нормативное) значение по этому показателю (например, 100 баллов) и из всего множества существующих дефектов, несоответствий или отказов выделить проблемы, имеющие высокий приоритет устранения и неизвестную причину возникновения.

Таким образом, ранжирование является своеобразным фильтром, позволяющим (еще до начала процесса 8D) определить проблемы качества продукции, для которых необходимо инициировать процесс решения.

В основу ранжирования положены следующие принципы. Ранжирование проблем производится с целью определения объектов для корректирующих действий. Задача ранжирования состоит в выборе из всего множества проблем готовых автомобилей, определенного перечня, применение корректирующих действий к причинам возникновения которых, является наиболее важным в рассматриваемый момент времени.

Проблемы готовых автомобилей делятся на следующие группы: внешние проблемы, проявляющиеся в гарантийной эксплуатации; внешние проблемы на 0 км пробега, проявляющиеся при проведении предпродажной подготовки (ППП); внутренние проблемы на 0 км пробега, проявляющиеся в процессе производства; проблемы, выявляемые при проведении оценочного осмотра (инспекционного контроля) автомобилей.

Проблемы надежности для ранжирования определяются из перечня постоянных (т.е. встречающихся

в каждом из рассматриваемых месяцев) дефектов, несоответствий, отказов. Под таким перечнем подразумевается множество различных проблем (по сочетанию "код детали", "код дефекта" и "место дефекта"), проявившихся на автомобилях за анализируемый период времени.

Для дальнейшего анализа (причин проблемы и планирования корректирующих действий) для каждого постоянного дефекта, несоответствия или отказа составляется перечень моделей или модификаций автомобилей, на которых он встречается, а также перечень подразделений, на которые относилась проблема за рассматриваемый период времени.

Каждая проблема в области надежности характеризуется набором элементарных показателей: частотой возникновения (количеством дефектов на один выпущенный автомобиль); значимостью (затратами или трудоемкостью устранения); трендом частоты возникновения. Для преобразования значений различных элементарных показателей проблемы в сопоставимые (безразмерные) единицы производится их перевод в ранги с помощью шкал. Ранг показателя проблемы представляет собой результат сопоставления значения элементарного показателя с его граничными значениями (например, минимальным и максимальным). После того как элементарные значения показателей проблемы переведены в соответствующие ранги, производится их свертка в комплексный показатель — приоритетное число риска (ПЧР). Свертка осуществляется по принципу, приведенному в руководстве по FMEA (ГОСТ Р 51814.2), т.е. ПЧР равно произведению элементарных рангов.

При выборе проблемы качества на предмет применения к их причинам корректирующих действий все постоянные дефекты, несоответствия или отказы ранжируются по убыванию ПЧР. Прежде всего следует рассматривать дефекты, занявшие "первые места" в полученном перечне.

Таким образом, алгоритм ранжирования проблем надежности состоит из следующих этапов (см. рис. 1): получение перечня постоянных проблем надежности продукции в анализируемый период; расчет значений элементарных показателей — для каждой постоянной проблемы осуществляется по формулам по всем показателям, входящим в комплексный ранг; перевод значений элементарных показателей в ранги — осуществляется при помощи шкал перевода; свертка элементарных рангов в комплексный — ПЧР; ранжирование проблем по ПЧР и выбор объектов для корректирующих действий.

Формализация задачи ранжирования заключается в следующем. Имеется набор объектов, каждый из которых обладает системой параметров. Набор объектов ранжируется по системе параметров. Менеджер моделирует различные ситуации, управляя способом ранжирования, и производит выбор объекта или группы объектов [7].

Для ранжирования проблем качества используется метод, основанный на принципе, приведенном в руководстве по FMEA: каждому дефекту, несоответствию или отказу ставится в соответствие число — приоритетное число риска (ПЧР), характеризующее их по некоторым факторам (например, частоте его возникновения, значимости для потребителя, сложности устранения или обнаружения и т. п.). По полученным приоритетным числам риска производится ранжирование.

Предлагаемый метод, как и FMEA, основан на правиле теории вероятностей: вероятность наступления нескольких независимых событий одновременно вычисляется как произведение вероятностей наступления каждого из событий. Отличием представленной методики, являются шкалы измерения рангов. Применение разработанного порядка оправдано, так как использование шкал с минимальным значением нуль (как в случае если вероятность события изменяется от 0 до 1 или от 0 до 100 %) приводило бы к получению нулевого ранга в случае равенства нулю хотя бы одного из перемножаемых рангов.

Как показывает практика, ранжирование проблем надежности только по одному признаку (например, массовости или затратам) не является эффективным. Проводить корректирующие действия необходимо как для массовых, но малозначительных, так и для более редких, но значимых (дорогостоящих) дефектов, несоответствий или отказов (рис. 2, 3).

Ранжирование проблем надежности необходимо производить ежемесячно. Месяц, в который производится ранжирование, называется расчетным месяцем.

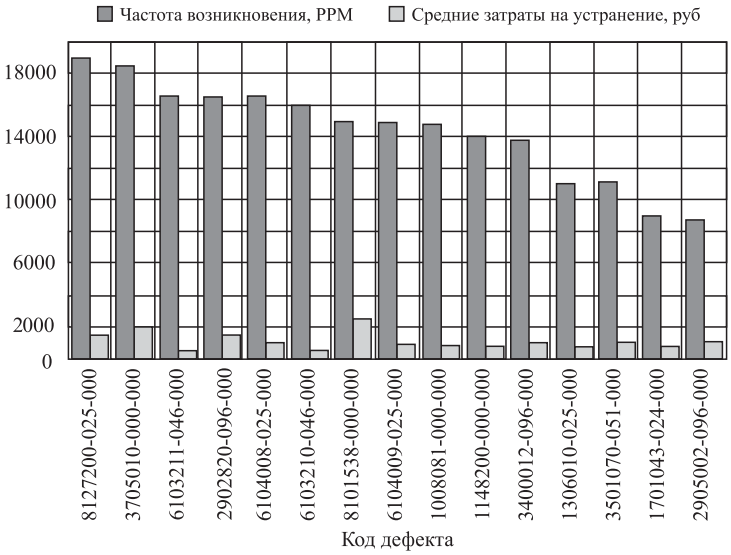


Рис. 2. Ранжирование проблем надежности автомобилей в эксплуатации по частоте возникновения дефектов

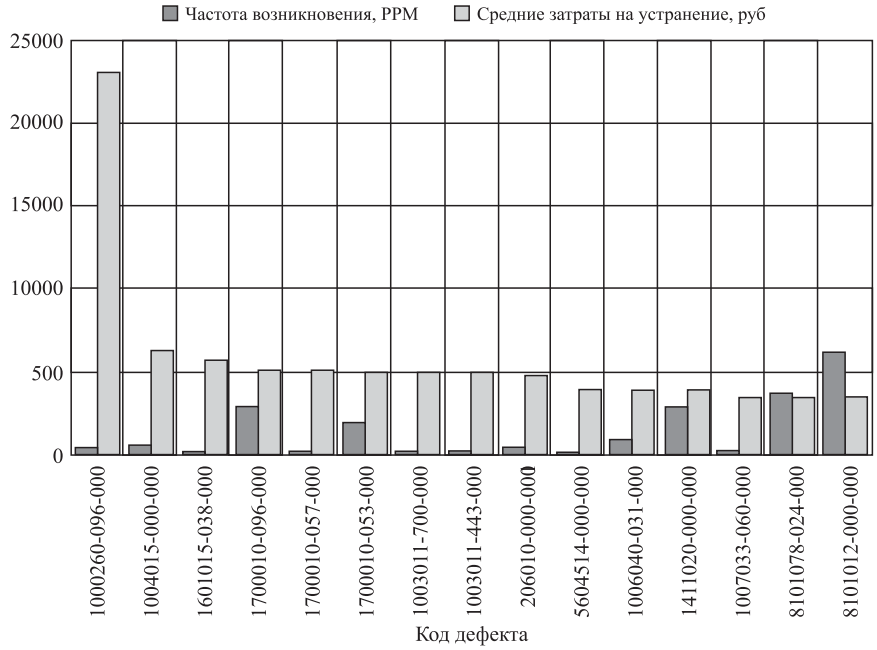


Рис. 3. Ранжирование проблем надежности автомобилей в гарантийной эксплуатации по средним затратам на их устранение

Следовательно, для определения приоритета устранения той или иной проблемы, необходим комплексный показатель, включающей как минимум оценку массовости и оценку значимости (рис. 4).

В качестве оценки массовости проявления проблем надежности в предлагаемом методе рассматривается ранг возникновения или результат перевода в баллы частоты проявлений рассматриваемого дефекта, несоответствия или отказа на одном (выпущенном или проверенном) автомобиле.

В качестве оценки значимости учитывается результат перевода в баллы средних затрат на устранение (или трудоемкости устранения) одного проявления рассматриваемой проблемы. Значимость несоответствия определяется коэффициентом дефектности (по 50-балльной шкале).

Также в последнее время на первый план выходит задача наискорейшего обнаружения проблем, вероятность проявления которых на автомобиле растет (рис. 5). Поэтому для выделения проблем надежности, причины которых необходимо устранить в первую очередь, предлагается также учитывать тренд частоты возникновения или тенденции изменения (роста или снижения) вероятности проявления.

Проявление некоторых проблем подвержено влиянию сезонных факторов, таких как различная интенсивность эксплуатации автомобилей, различные задержки продаж автомобилей (разница между датами выпуска и продажи автомобиля) и т. п. Вероятность проявления таких дефектов изменяется периодически

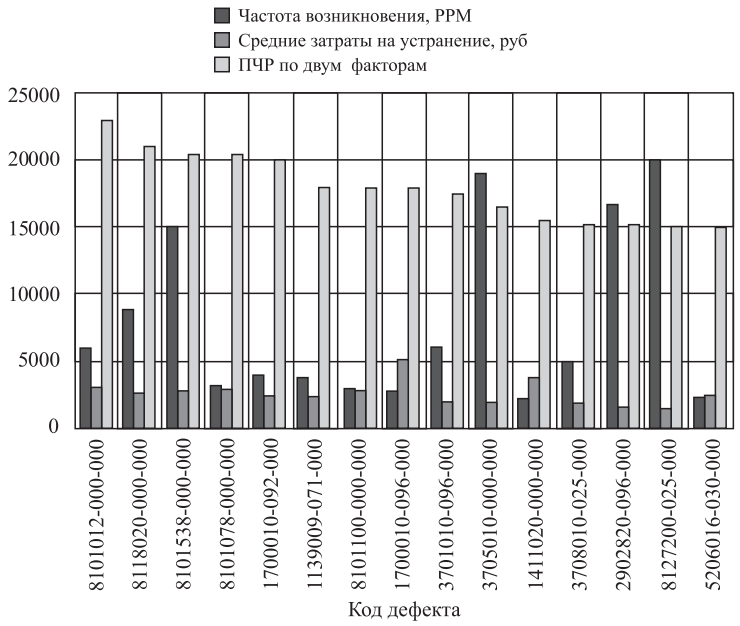


Рис. 4. Ранжирование проблем надежности автомобилей по совокупности двух факторов: частоте возникновения и средним затратам на устранение

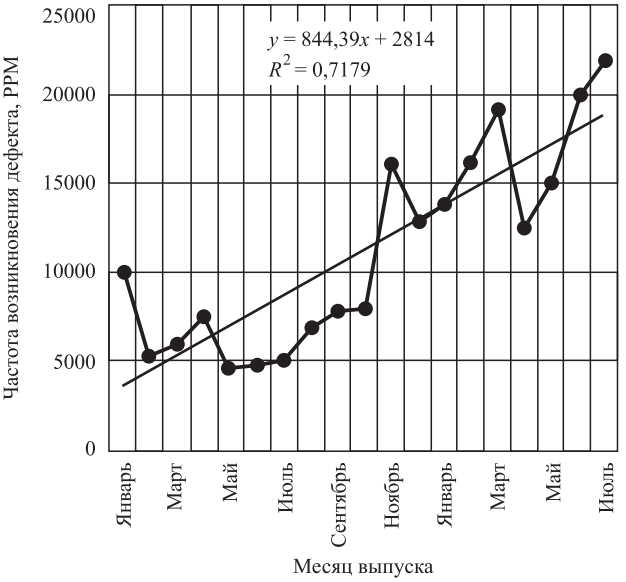


Рис. 5. Динамика частоты возникновения "растущей" проблемы надежности по коду 8127200-025-000

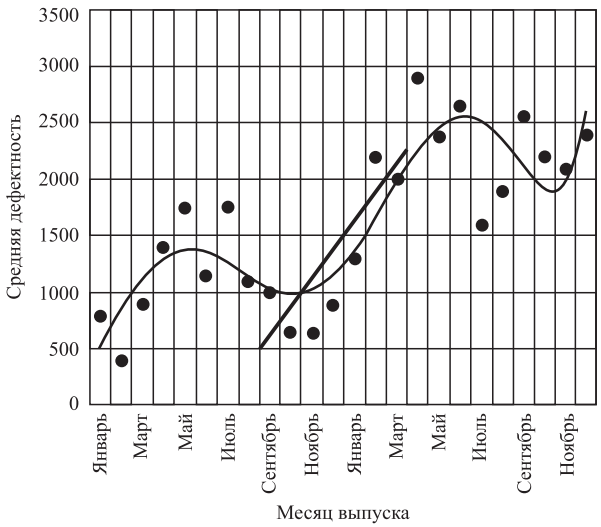


Рис. 6. Иллюстрация влияния сезонности (дефект 6105013-056-001)

(или описывается гармонической функцией). Следовательно, оценивание тенденций изменения проблем будет значительно зависеть от периода года, в который проводится анализ.

Так, например, для временного ряда частоты проявления одного из дефектов линейные тренды, построенные по различным периодам года, значительно отличаются (рис. 6). Следовательно, результаты ранжирования таких дефектов не будут постоянными от месяца к месяцу в течение года, что существенно затруднит планирование и анализ результативности (эффективности) корректирующих действий.

Для снижения влияния сезонных факторов на результаты ранжирования необходимо проанализировать наличие сезонной составляющей во временном ряде, описывающем поведение частоты проявления дефекта, и, в случае ее значимости, провести коррекции с целью снижения влияния сезонности. Необходимо отметить, что сезонность может оказывать влияние не только на частоту проявления дефектов, но и на затраты. В случае необходимости можно провести аналогичные исследования для затрат.

Выбор периода эксплуатации. Проблемы, выявляемые на предпродажной подготовке (ППП), внутренние производственные несоответствия проявляются (и фиксируются в специализированных базах данных) непосредственно после выпуска автомобиля (задержка между обнаружением дефекта и регистрацией информации о нем в базе данных составляет не более недели), поэтому для анализа таких проблем не требуется время. Каждый месяц можно рассматривать (анализировать и ранжировать) проблемы на автомобилях предыдущего месяца выпуска.

Для проявления проблем в период гарантийной эксплуатации требуется время, связанное как с длительностью поступления автомобиля к потребителю (доставка автомобиля до дилера, покупка), так и с началом и интенсивностью фактической эксплуатации (разной для различных потребителей). Таким образом, практика показывает, что получить наиболее полную информацию об эксплуатации автомобиля в гарантийный период, возможно не ранее чем через 30 месяцев после его выпуска. Естественно, что планирование и применение корректирующих действий к этому моменту становится совсем не актуальным. Поэтому предлагается рассматривать проблемы, проявляющиеся на автомобилях только за определенный (укороченный) период эксплуатации (количества полных месяцев, прошедших с даты продажи до даты предъявления дефекта). В качестве периода эксплуатации взяты шесть месяцев, так как за этот период проявляется основная часть дефектов, несущих основную часть затрат.

За шесть месяцев эксплуатации проявляется 70 % дефектов гарантийной эксплуатации (при одногодичной гарантии). Затраты на их устранение также составляют около 70 % общих затрат за период гарантийной эксплуатации.

Выбор длительности периода анализа определяется только исходя из целей ранжирования проблем. При этом не рекомендуется брать длительность периода анализа менее трех месяцев, так как анализ таких линейных трендов не имеет смысла (через две точки можно провести только одну прямую). Рассмотрение слишком длинных периодов анализа и, соответственно, линий тренда параметров проблем может существенно исказить ситуацию, так как происходит значительный "уход в прошлое". В качестве периода анализа рассматривается период, равный шести месяцам.

Схема выбора периода анализа для ранжирования дефектов гарантийной эксплуатации при выбранном периоде эксплуатации шести месяцев приведена на рис. 7.

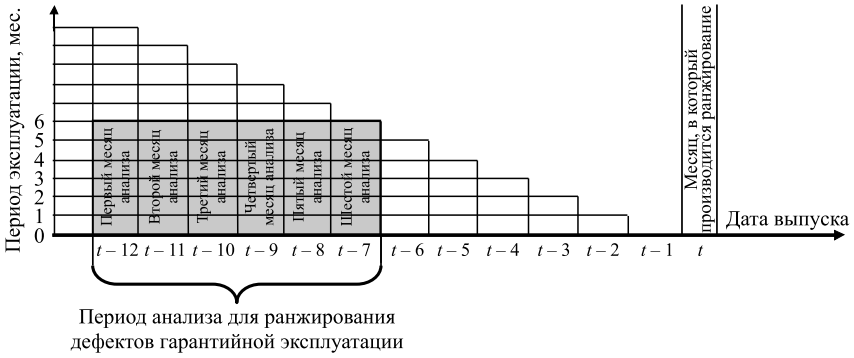


Рис. 7. Определение периода анализа для ранжирования дефектов гарантийной эксплуатации

С увеличением периода эксплуатации увеличивается полнота анализируемых данных (будет рассмотрено больше различных проблем, есть возможность учесть проблемы, которые проявляются в эксплуатации не сразу). Однако при увеличении периода эксплуатации рассматриваются все более "старые" (больше отстоящие в прошлое от расчетного месяца) и, следовательно, не актуальные на момент анализа данные о дефектах.

Для анализа проблем надежности с целью применения к их причинам корректирующих действий нет необходимости исследовать их все. Достаточно взять только "постоянные", так как на них приходится 94,6 % всех проявлений и 92,2 % всех затрат на устранение проблем в гарантии.

Ранжирование проблем надежности автомобилей в период гарантийной эксплуатации. На каждую проблему, выявляемую и устраняемую в ходе предпродажной подготовки и гарантийной эксплуатации автомобиля, оформляется акт гарантийного обслуживания (АГО).

Обработка базы данных АГО осуществляется с помощью информационной системы специализированной корпоративной информационной системы.

Для ранжирования отбираются проблемы, проявившиеся за шесть месяцев эксплуатации. При этом под периодом эксплуатации подразумевается количество полных месяцев, прошедших с даты продажи до даты предъявления дефекта на предприятие сервисно-сбытовой сети. Для автомобилей каждой модели составляется перечень всех эксплуатационных отказов согласно кодификатору. Для каждой проблемы надежности автомобилей рассчитывается количество месяцев выпуска (из периода анализа) с проявлением соответствующей проблемы. Для дальнейшего рассмотрения отбираются только постоянные проблемы, т. е. те, которые проявляются на автомобилях каждого из шести рассматриваемых месяцев выпуска.

Для каждой i-й проблемы рассчитывается количество ее проявлений на автомобилях, выпущенных в каждом месяце периода анализа влияния сезонности $D_1^i, D_2^i, \ldots, D_N^i$, где N — количество месяцев периода анализа влияния сезонности.

Для каждой проблемы вычисляется частота возникновения в каждом месяце анализа по формуле:

$$\bar{d}_n^i = \frac{D_n^i}{V_n} 10^6, \qquad (1)$$

где n — порядковый номер месяца анализа влияния сезонности $\left(n = \overline{1, N}\right)$, V_n — количество автомобилей, выпущенных в каждом месяце.

Тренд частоты возникновения (с учетом его значимости) определяется по формуле:

$$tr^i = \frac{k^i}{b^i + k^i}\left(R^i\right)^2 100\%, \qquad (2)$$

где b^i и k^i — коэффициенты линии тренда частоты возникновения дефекта, которые определяются по формулам, полученным по методу наименьших квадратов, R^i — коэффициент корреляции. Ранг частоты возникновения проблемы $\left(R_{\text{ВОЗН}}^i\right)$ — балльная оценка вероятности появления проблемы надежности на выпущенном автомобиле — рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ВОЗН}}^i = \begin{cases} 10 - 9\left|1 - \dfrac{\bar{d}^i}{\bar{d}^*}\right|^s & \bar{d}^i \leqslant \bar{d}^*; \\ 10, & \bar{d}^i > \bar{d}^*, \end{cases} \qquad (3)$$

где $\bar{d}^*$ — граничное значение частоты возникновения проблемы; s — параметр функции перевода (при $s = 1$ функция перевода линейная, при $s = 2$ функция перевода квадратичная и т. д.).

Ранг значимости $\left(R_{\text{ЗН}}^i\right)$ — балльная оценка затрат на устранение проблемы в гарантийной эксплуатации — рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ЗН}}^i = \begin{cases} 10 - 9\left|1 - \dfrac{\bar{z}^i}{\bar{z}^*}\right|^s, & \bar{z}^i \leqslant \bar{z}^*; \\ 10, & \bar{z}^i > \bar{z}^*, \end{cases} \qquad (4)$$

где $\bar{z}^*$ — граничное значение средних затрат на устранение одного проявления проблемы; s — параметр функции перевода.

Ранг тренда $\left(R_{\text{ТР}}^i\right)$ — балльная оценка тенденций изменения дефектности во времени — рассчитывается по формуле:

$$R_{\text{ЗН}}^i = \begin{cases} 1, & tr_* < tr^i; \\ 10 - 9\left|\dfrac{tr^* - tr^i}{tr^* - tr_*}\right|^s, & tr_* \leqslant tr^i \leqslant tr^*; \\ 10, & tr^i > tr^*, \end{cases} \qquad (5)$$

где tr_* и tr^* — нижнее и верхнее граничные значения трендов; s — параметр функции перевода.

Приоритетное число риска проблемы (ПЧР) определяется по формуле:

$$\text{ПЧР} = R_{\text{ВОЗН}} R_{\text{ЗН}} R_{\text{ТР}}. \qquad (6)$$

Ранжирование всех дефектов производится по убыванию значения ПЧР. Проблемы, имеющие наибольшее ПЧР, следует рассматривать для анализа их причин и планирования корректирующих действий, направленных на устранение наиболее значимых из этих причин.

В качестве примера, в таблице приведены результаты ранжирования проблем надежности автомобилей одного из ведущих брендов.

Таким образом, в результате разработки и реализации методики ранжирования проблем надежности

Результаты ранжирования проблем надежности

№ п/п	Код и наименование проблемы надежности	Частота возникновения	Затраты	Тренд	Ранг возникновения	Ранг затрат	Ранг тренда	ПЧР
1	3701010-096-000 Шум при работе генератора	6253	1568	–0,03	9,8	7,3	5,5	395
2	1700010-092-000 Затруднено переключение передач	4125	2468	–4,03	8,9	8,9	4,6	366
3	8118020-000-000	8982	2076	–6,39	10,0	3,4	4,1	339
4	1411020-000-000	1998	3746	–0,19	6,3	9,8	5,5	338
5	8101538-000-000 Дефект заслонки управления отопителем	15 121	1960	–6,41	10,0	8,2	4,1	331
6	8101078-000-000 Дефект электродвигателя с вентилятором	3573	3191	–6,87	8,5	9,6	4,0	320
7	3705010-000-000	19 068	1370	–3,69	10,0	6,8	4,7	318
8	1008081-000-000	14 407	538	10,99	10,0	3,8	8,0	305
9	3701051-000-000	2664	1605	0,00	7,4	7,4	5,5	301
10	3701010-145-000	2518	1622	0,00	7,2	7,5	5,5	294
11	5604514-227-000	633	2822	80,34	3,1	9,3	10,0	286
12	1700010-053-000	1705	5026	–2,37	5,7	10,0	5,0	285
13	8101100-000-000 Дефект заслонки канала отопителя	3053	2747	–7,08	7,9	9,2	3,9	285
14	3708010-025-000	4661	1306	–3,91	9,3	6,6	4,6	284
15	1701043-024-000	9469	845	–0,01	10,0	5,1	5,5	280
16	3705040-000-000	6058	315	43,92	9,8	2,7	10,0	268
17	3701010-179-002	2258	1589	–0,67	6,8	7,4	5,4	267
18	1139009-071-000	3638	2201	–8,89	8,5	8,6	3,5	255
19	5206016-030000 Разрушено ветровое стекло	2209	2437	–5,38	6,7	8,9	4,3	255
20	2215011-096-000 Шум левого привода передних колес	2550	1901	–5,96	7,2	8,0	4,2	242

высокотехнологичной продукции машиностроения, получен комплексный информационно-аналитический инструмент определения ключевых дефектов, несоответствий или отказов, которые наиболее существенно влияют на конкурентоспособность продукции. В качестве фундамента ранжирования выбраны два показателя, определяющих частоту возникновения и затраты на устранения проблем.

Реализация разработанной методики ранжирования проблем надежности на практике обеспечивает возможности для быстрого и объективного поиска наиболее важных проблем, что создает предпосылки для разработки и реализации глобальных корпоративных программ повышения конкурентоспособности продукции.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Годлевский В. Е., Юнак Г. Л.** Менеджмент качества в автомобилестроении: монография / Под ред. А. В. Васильчука — Самара: ООО "Офорт"; ЗАО "Академический инжиниринговый центр", 2005. — 628 с.
2. **Заятров А. В.** Анализ и оценка взаимосвязей между традиционными показателями надежности и показателями, используемыми ведущими производителями легковых автомобилей [Текст] / А. В. Заятров, В. Н. Козловский // Электроника и электрооборудование транспорта. — 2012. — № 1. — С. 41—43.
3. **Козловский В. Н.** Комплексы количественных показателей, применяемые при организации мониторинга качества легковых автомобилей в эксплуатации [Текст] / В. Н. Козловский, В. И. Строганов // Автомобильная промышленность. — 2013. — С. 4—8.
4. **Козловский В. Н.** Обеспечение качества и надежности электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В. Н. Козловский. — Тольятти: ГОУ ВПО "ТГУ". — 2009. — 274 с.
5. **Козловский В. Н.** Аналитические исследования качества автомобилей в эксплуатации: монография [Текст] / В. Н. Козловский, В. И. Строганов. — Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2013. — 142 с.
6. **Козловский В. Н., Строганов В. И.** Обеспечение качества электромобилей и гибридов в эксплуатации [Текст] / В. Н. Козловский, В. И. Строганов — Saarbrucken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2015. — 397 с.
7. **Немцев А. Д.** Моделирование — инструмент управления качеством. Автомобильная промышленность. Москва. — 2003. — № 10. — С. 1—3.
8. **Панюков Д. И., Козловский В. Н.** Комплекс обеспечения качества системы электрооборудования автомобилей: монография [Текст] / В. И. Панюков, В. Н. Козловский — Saarbrucken, Palmarium Academic Publishing, AV Akademikerverland GmbH&Co., Deutschland, 2014. — 360 с.

УДК 656.13

А. Ю. Громов, Национальный минерально-сырьевой университет "Горный", Санкт-Петербург
E-mail: grom1963@bk.ru

РЕГУЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ НА КОЛЬЦЕВОЙ АВТОМОБИЛЬНОЙ ДОРОГЕ (КАД-СПб)

Проведен анализ дорожно-транспортных происшествий на кольцевой автодороге вокруг Санкт-Петербурга за время ее функционирования и выявлены причины их возникновения. Даны рекомендации для улучшения состояния безопасности движения и увеличения пропускной способности на КАД-СПб.

Ключевые слова: *безопасность дорожного движения, кольцевая автомобильная дорога, дорожно-транспортное происшествие.*

A. Yu. Gromov

REGULATION OF THE MOVEMENT ON RING HIGHWAY (RING ROAD SPB)

The analysis of road accidents on the ring highway round St. Petersburg during its functioning is carried out and the reasons of their emergence are established. Recommendations for improvement of a security status of the movement and increase in capacity at ring road SPb are made.

Keywords: *traffic safety, ring highway, road accident.*

Рисунки на 2-й, 3-й, 4-й полосах обложки

В последние десятилетия роль автомобилей в перевозках пассажиров и грузов возросла в результате активного строительства скоростных автомобильных магистралей, исключающих "транзит" через прилегающие к дороге населенные пункты. Объем транспортных услуг и уровень автомобилизации во многом определяют экономику, развитие производства и социальную жизнь общества, стимулируют прогресс. Автомобилизация, или оснащенность населения автомобилями, в Санкт-Петербурге в 2015 г. достигла 357 автомобилей на 1000 жителей, т. е. приблизилась к европейскому уровню, и продолжает увеличиваться быстрыми темпами. Однако ее рост ведет к увеличению расходов энергоресурсов и сопровождается экономическими потерями, вследствие неудовлетворительной организации дорожного движения.

В городах с высоким уровнем автомобилизации большие перегрузки городских улиц и магистралей стали часто приводить к транспортному коллапсу. Одним из реальных мероприятий по борьбе с заторами на улицах городов, считается строительство вокруг крупных населенных пунктов кольцевых и объездных автомобильных дорог для разгрузки городских транспортных потоков от регионального транспорта и "транзита", а также устранения возникающих противоречий между участниками местных городских перевозчиков. Как правило, кольцевые автодороги крупных городов не ограничиваются местным значением, а являются объединяющим элементом транспортной системы региона и соединяют в единое целое все основные дорожные магистрали, расходящиеся из центра. КАД могут иметь как региональное, так и федеральное значение.

Первые кольцевые дороги появились в Москве и Минске в 1962 г. Московская кольцевая автодорога (МКАД) имеет протяженность 109 км и по 4 полосы движения в обе стороны (после реконструкции 1999 г.). На сегодняшний день строится, проектируется и реконструируется достаточно большое количество кольцевых и объездных (обходных) автомобильных дорог в нашей стране и за рубежом. Наиболее крупные кольцевые автомобильные дороги России представлены в таблице.

В 2008 г. были построены первые участки КАД-СПб. Полностью строительство было завершено

в 2013 г. КАД-СПб — автомобильная магистраль федерального значения (А118), предназначена разгружать центр города от регионального и транзитного автомобильного транспорта. Дорога огибает Санкт-Петербург и соединяет дороги, ведущие в город (рис. 1). К Санкт-Петербургу подходит 10 автомобильных шоссе международного и федерального значения. Построенная КАД-СПб играет важную роль в развитии экономического и социального потенциалов Санкт-Петербурга и Ленинградской области [1].

Введенная в строй кольцевая дорога вывела транзитные автомобильные потоки из исторического центра города и снизила вредное воздействие автомобилей на жителей города и окружающую среду. Распределение автомобилей на подходах к городу улучшило транспортные связи населенных пунктов пригородной зоны с периферийными районами города. Большая часть дороги проходит в окрестностях административной границы города и области и имеет титул "автомагистрали". Протяженность КАД — 142 км, расчетная скорость движения — 120 км/ч, разрешенная — 110 км/ч, количество полос движения от четырех до восьми в обоих направлениях. Ширина проезжей части до 32 м. На трассе 106 мостов, путепроводов, эстакад и тоннелей. Расчетная пропускная способность КАД составляет 190 тыс. автомобилей в сутки, при пропускной способности одной полосы движения 35 000 автомобилей в сутки. На КАД имеется 27 развязок, соединяющих ее с городскими дорогами и федеральными трассами.

Наиболее крупные кольцевые автомобильные дороги в России

Полное наименование (сокращение)	Протяженность, км
Московское большое кольцо (МБК)	~550
Центральная кольцевая автомобильная дорога (проект) (ЦКАД)	~525
Московское малое кольцо (ММК)	~335
Кольцевая автодорога (Ленинградская область)	265,4
Вторая Петербургская кольцевая автомобильная дорога (*проект*)	175,0
Обход города Челябинска (ЧКАД)	151,5 [2]
Петербургская кольцевая автомобильная дорога (КАД-СПб)	142,15
Окружная дорога Магнитогорска	138,8
Калининградская кольцевая автомобильная дорога (*проект*)	123,0 (построено ~38)
Московская кольцевая автомобильная дорога (МКАД)	108,9
Обход города Омска (проект)	75,1 (построено 56,6)
Северный обход Новосибирска	75,0
Объездная дорога города Тюмень	62,9 (построено 50,6)
Обход города Перми	52,5
Обход города Казани	49,5
Кировоградская кольцевая автомобильная дорога	47,5
Большое Казанское кольцо	~34 (построено 22,2)
Обход города Сочи (СКАД)	18,1

К сожалению, безопасность движения на КАД находится в неудовлетворительном состоянии. Статистика дорожно-транспортных происшествий показывает постоянный рост числа аварий. Оценка уровня безопасности движения производится непосредственно по данным фактической аварийности на основании статистического учета ДТП [2]. Статистические методы стали применяться раньше других и по сей день являются наиболее распространенными. Оценка проводится по абсолютным, относительным и удельным показателям аварийности. Абсолютные показатели позволяют оценить опасность участка дороги через общее число ДТП за заданный промежуток времени. На КАД-СПб за время эксплуатации с 2008 по 2014 г. произошло 40 529 дорожно-транспортных происшествий, из которых 1767 (4,35 %) с пострадавшими (рис. 2).

Если в 2008 г. произошло 3977 ДТП, то в 2014 г. их число выросло до 7101. Результаты проведенных исследований отражены на рис. 3, где представлено распределение ДТП по годам на КАД за период 2008—2014 гг. Учету подлежат все дорожно-транспортные происшествия [3]. В работе особое внимание уделено ДТП с пострадавшими, как к одному из условий квалификации — наличие вредных последствий и занесения сведений в специальную карточку учета [4].

Рост количества происшествий зависит от нескольких факторов — это и рост автомобилизации населения, и постепенное открытие участков КАД, и как следствие, увеличение интенсивности и плотности транспортных потоков. Рассматривая дорожно-транспортные происшествия с пострадавшими (рис. 4), наблюдается тенденция роста, что дает основание для более тщательного изучения проблемы,

а также разработки мероприятий по предотвращению возможности их возникновения. Анализ ДТП на километровых участках КАД (рис. 5) показал, что основная их масса происходит на юго-восточном направлении в районе Вантового моста, а также в районе развязки с Таллиннским шоссе.

Это связано с большой интенсивностью движения грузового автотранспорта и частных легковых автомобилей от Московского шоссе в сторону Выборгского шоссе и в обратном направлении. Этот участок дороги проходит рядом со "спальными" районами города — Фрунзенским и Невским. Здесь же находятся грузовые терминалы, продуктовые базы и машиностроительные предприятия, что и объясняет повышенную интенсивность движения на протяжении 24 ч в сутки.

В 2014 г. было проведено натурное обследование КАД-СПб. Автострада была разделена на 28 участков, расположенных между развязками, начиная от Приморского шоссе в сторону Выборгского и т. д. [4] Интенсивность автотранспортных потоков в обоих направлениях движения на 28 участках КАД-СПб приведена на рис. 6.

Исследования интенсивности движения автомобилей на КАД показало трехкратный рост интенсивности движения на юго-западном участке автодороги в районе Вантового моста (участок 14 — от Октябрьской набережной до проспекта Обуховской обороны). Здесь интенсивность движения автомобилей превышала 17 500 авт/ч. Надо отметить, что этот участок характеризуется недостаточной информацией для водителей и малым количеством технических средств по организации и управлению дорожного движения. При подъезде к Вантовому мосту крутые повороты и высокие дорожные ограждения ограничивают видимость, а в районе Таллиннского шоссе в направлении движения от Московского шоссе в сторону Горской имеется сужение проезжей части до трех полос.

На участке имеют место резкие изменения скорости автомобилей в потоке, большое число въездов и съездов с частыми перестроениями, торможениями и ускорениями, разрушающими установившееся движение потока. В возникновении ДТП причиной является "человеческий фактор", т. е. нарушение водителями Правил дорожного движения: превышение скоростного режима, остановки в запрещенных местах, движение по обочине, нарушение правил перестроения, несоблюдение безопасной дистанции и др.

Проведенные исследования с большим объемом замеров и тщательно обработанные полученные данные обозначили две причины аварийности на КАД. Во-первых, это то, что на всем протяжении КАД-СПб полосы имеют изменение количества рядов для движения в одном направлении (две, три, четыре). У водителей появляется необходимость в дополнительных перестроениях. При съездах и въездах в узких местах КАД водителям приходится резко снижать скорость с разрешенных 110 км/ч до 40...50 км/ч. Во-вторых, в полосах КАД за потоками, предназначенными для движения грузовых автомобилей, отсутствует контроль.

В порядке рекомендации, для улучшения состояния с безопасностью движения и увеличения пропускной способности КАД-СПб, можно поддержать периодически появляющиеся предложения по увеличению скорости движения потоков. Предполагается разработать проект и провести эксперименты по выбору участков КАД с 4-полосным движением в одном направлении. В крайнем левом ряду разрешить движение легковым автомобилям, при позволяющем состоянии дорожного покрытия, с диапазоном скорости 130—140 км/ч. Однако разрешение на проведение такой опытной эксплуатации КАД потребует тщательной проработки проекта органами ГИБДД, проектными, страховыми и строительными организациями.

Надо отметить, что сегодня без исследований и проектов в левом ряду несутся 300—400-сильные внедорожники со скоростью выше 140 км/ч и ухудшают аварийность на КАД-СПб.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Из истории Кольцевой автомобильной дороги Санкт-Петербурга** // Официальный сайт Государственного учреждения "Дирекция по строительству транспортного обхода города Санкт-Петербурга Министерства транспорта Российской Федерации".
2. **Домке Э. Р.** Расследование и экспертиза дорожно-транспортных происшествий: Учеб. пособие. — Пенза: ПГУАС, 2005. — 260 с.
3. **Правила учета дорожно-транспортных происшествий** (утв. постановлением Правительства РФ от 29 июня 1995 г. N 647).
4. **Пугачев И. Н., Горев А. Э., Олещенко Е. М.** Организация и безопасность движения: Учеб. пособие для студ. высш. учеб. заведений. — М.: Издательский центр "Академия", 2009. — 272 с.

Художественный редактор *Т. Н. Галицына*. Технический редактор *Е. М. Патрушева*. Корректор *Е. В. Комиссарова*
Сдано в набор 13.01.2016. Подписано в печать 09.02.2016. Формат 60 × 88 1/8. Усл. печ. л. 5.88.
Отпечатано в ООО «Канцлер», 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО «Адвансед солюшнз». 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1. Сайт: **www.aov.ru**