

**ПІДВИЩЕННЯ МІЦНОСТІ І ТРІБОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕМЕНТІВ  
МАШИНОБУДІВНИХ КОНСТРУКЦІЙ НА ОСНОВІ КОМБІНОВАНИХ МЕТОДІВ ЗМІЦНЕННЯ  
ПРИПОВЕРХНЕВИХ ШАРІВ**

*Н. А. Ткачук, О. В. Веретельник, А. В. Грабовський, С. О. Кравченко, С. Ю. Білик*

У статті запропоновано способи підвищення міцності і трібомеханічних характеристик елементів машинобудівних конструкцій на основі комбінованих методів зміцнення поверхневих шарів. З використанням отриманих експериментальних даних і результатів лабораторних досліджень встановлені деякі фізико-механічні характеристики утворених таким чином поверхневих шарів деталей. Розв'язана задача контактної взаємодії зміцнених деталей конструкцій. Встановлено характерні особливості розподілу контактних тисків і напруг в сполученні зміцнених деталей ДВС.

**INCREASE STRENGTH AND PERFORMANCE TRIBOMECHANICAL ELEMENTS OF MACHINE DESIGN ON  
THE BASIS OF COMBINED METHODS OF HARDENING OF THE SURFACE LAYERS**

*N. Tkachuk, O. Veretelnik, A. Grabowski, S. Kravchenko, S. Belik*

The article suggests ways to improve the strength and characteristics of the elements tribomechanical engineering designs based on the combined methods of hardening of the surface layers. These experimental data and results of laboratory investigations have revealed some physical and mechanical characteristics of the thus formed on parts of the surface layers. The problem of contact interaction of parts hardened structures. The characteristic features of the distribution of contact pressures and stresses in conjunction reinforced engine parts.

УДК 621.43.052

*Ф.И. Абрамчук, А.Н. Врублевский, С.О. Подлещук*

**ПУТИ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ  
ДВС КАК СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АВТОМОБИЛЯ ХАДИ-34**

*Представлены результаты поиска путей снижения расхода топлива рекордным автомобилем ХАДИ-34 при использовании в качестве силовой установки малолитражного четырехтактного двигателя. Сделан вывод о целесообразности изменения внешней скоростной характеристики при бездрессельном регулировании. Выполнены предварительные расчеты, показывающие эффективность модернизации двигателя увеличением степени сжатия и хода поршня.*

**Введение**

Ежегодно международные соревнования на экономичность Shell Eco-marathon [1] собирают более 200 команд и 3000 студентов-участников. В 2010 году в этих соревнованиях впервые участвовала команда из Украины. Студенты ХНАДУ в Лаборатории скоростных автомобилей (ЛСА) построили автомобиль ХАДИ-34 [2], могущий конкурировать с европейскими командами демонстрируя потенциал отечественной школы автомобилестроения.

Трехлетнее участие украинской команды в соревнованиях Shell Eco-marathon на автомобиле ХАДИ-34 позволяет устанавливать рекорды Украины по экономичности. К сожалению, успехи остаются локальными, позволяющими первенствовать только на постсоветском пространстве. Поэтому актуальным является совершенствование автомобиля. Анализ показывает, что резервами улучшения показателей ХАДИ-34 являются снижение массы автомобиля, улучшение его аэродинамики, применение передовых технологий телеметрии. Однако важнейшим условием обеспечения конкурентоспособности автомобиля является улучшение технико-экономических показателей двигателя.

**Анализ публикаций**

Опыт участников показывает, что автомобиль в условиях гонки должен перемещаться в режимах разгона и наката. При этом выполнить регламент соревнования [3] возможно в случае прохождения трассы со средней скоростью 30 км/ч. Для достижения указанной скорости перемещения автомобиля массой до 100 кг с пилотом не требуется мощного силового агрегата. Главной задачей двигателя является обеспечение разгона до заданной скорости за минимальный промежуток времени, составляющий около 10 секунд. Для дальнейшего анализа условий работы двигателя следует выделить два этапа успешного прохождения дистанции: старт и ускорение автомобиля на трассе в случае предельно допустимого падения его скорости вследствие трения, изменения профиля пути и т.д. Лидеры соревнований запускают двигатель всего два раза за круг протяженностью 1626 м. Так как целью соревнования является достижение максимальной экономичности, то участники соревнований используют в своих болидах силовые установки с максимальной эффективностью. Участники, выступающие в классификации «Двигатели внутреннего сгорания с принудительным воспламенением» в подавляющем большинстве используют четырехтактные двигатели с мини техники. Самым популярным

лярным среди участников (90-95%) является четырехтактный двигатель 1Ч3,5/2,6 (HONDA GX-25) (рис. 1) [4].

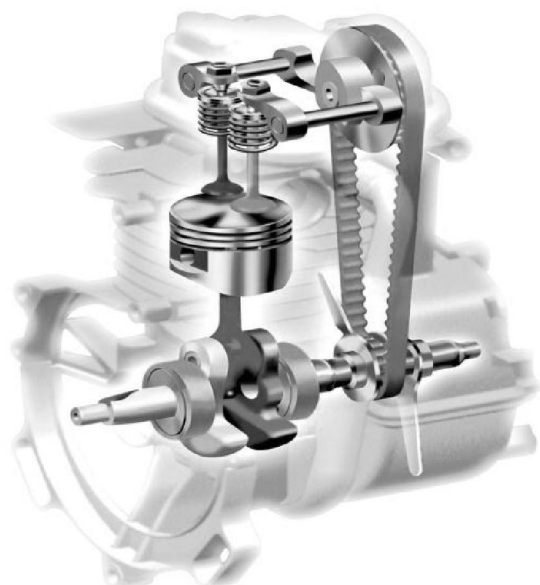


Рис. 1 Двигатель HONDA GX-25(35)

Результаты, полученные в заездах, показали предельно возможное значение при использовании такого серийного двигателя (около 800 км на 1 литре бензина). Поэтому команды пытаются сделать двигатель максимально эффективным путем его модернизации. Так как показатели команды ХНАДУ не достигают указанного предельно возможного значения, то на первом этапе совершенствования силовой установки целесообразно рас-

смотреть возможные способы повышения параметров двигателя HONDA GX-25, максимально используя элементную базу двигателя-прототипа.

**Цель и постановка задачи**

Целью данного исследования является определение путей снижения расхода топлива четырехтактного двигателя с принудительным воспламенением HONDA GX-25(35).

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. Провести анализ путей совершенствования двигателя.
2. Предложить методику модернизации двигателя.

**Анализ путей совершенствования двигателя**

Проведенный анализ показывает, что участники, показавшие рекордные результаты, используют поршневые двигатели собственной конструкции. Главным отличием этих двигателей является экстремально высокая степень сжатия ( $\epsilon$ ) и соотношение ход поршня/диаметр цилиндра (S/D) более 2-х. Лучшие результаты, показанные в условиях соревнований представлены в табл. 1.

Повышение КПД двигателя следует ожидать при выполнении основных условий:

- увеличение степени сжатия;
  - снижение механических потерь;
  - увеличение хода поршня для более полного сгорания рабочего тела;
  - увеличение коэффициента наполнения;
- усовершенствование систем зажигания и подачи топлива.

Таблица 1. Показатели команд-участниц соревнований в классе «Поршневые ДВС с принудительным воспламенением»

Команда, страна	Занятое место, автомобиль	Год	Результат, км/л	Двигатель	Основные параметры	
					S/D, мм	$\epsilon$
НАНТ, Франция[5]	1-е, Микроджоуль	2013	2980	Оригинальный 4-х тактный 30 см <sup>3</sup>	н.д.	н.д.
GAMF, Венгрия [6, 7]	2-е, Megametre	2013	2696	Оригинальный 4-х тактный	58/31,5	14/22
	2-е	2012	2661		60/27	17
	8-е	2010	1588		45/31,5	
	-	-	600-800	HONDA GX-25 4-х тактный	29/35	8
Remmi team, Финляндия [8]	3-е, Remmi-7	2013	2694	4-х тактный	70/27,7	16,8
	Remmi-6B	2002	2485	4-х тактный	55/39	17,3
	Remmi-5E	1998	1689	4-х тактный	43/35	15
PennStateUniversity, США [9]	1-е, СТ 2.0	2013	1529	Bridge&Stratton 4-х тактный	47,7/65,1	
ЛСА, Украина [2]	23-е, ХАДИ-34	2011	575	HONDA GX-25 4-х тактный	29/35	8

Из теории двигателей известно [10], что повышение КПД цикла Отто связано с увеличением степени сжатия и хода поршня.

Оценка эффективности увеличения  $S$  и  $\epsilon$  в двигателе HONDA GX-25 выполнена в среде AVL BOOST (рис. 2, 3). Выбор среды моделирования обусловлен возможностью в дальнейшем в AVL Cruise провести расчетное исследование процессов, происходящих в двигателе непосредственно в условиях соревнований. С этой целью подготовлена модель.

Мероприятием, влекущим изменение конструкции двигателя, является увеличение хода поршня. Опыт показывает, что автомобилю в ходе соревнований достаточно мощность, не превышающая 0,8 кВт. Увеличение  $S$  с 26 мм до 35 мм при сохранении штатной степени сжатия позволило снизить частоту вращения коленчатого вала для достижения указанной мощности с  $7000 \text{ мин}^{-1}$  до  $4650 \text{ мин}^{-1}$  (табл. 2), что также положительно повлияло на крутящий момент, который возрос на 22 %.

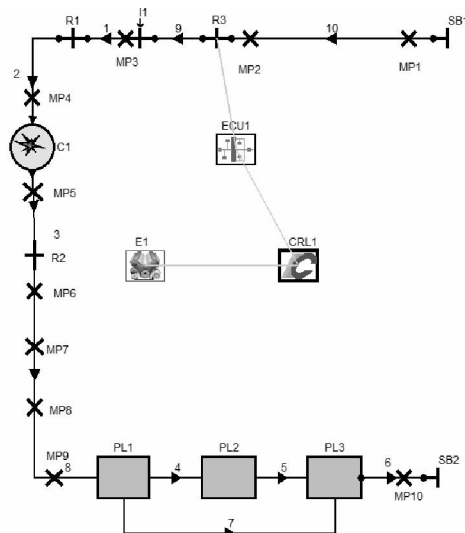


Рис. 2. Расчетная схема двигателя

Расчеты рабочего процесса показали, что дополнительное увеличение геометрической степени сжатия со штатных 8 до 11 единиц позволит снизить расход топлива на 11,5 % и увеличить эффективные показатели двигателя (мощность, крутящий момент). Дальнейшее увеличение  $\epsilon$  до 17 единиц позволит дополнительно снизить расход топлива на 5 %. Но при такой высокой степени сжатия возникает проблема детонации. Для борьбы с данным явлением команды – лидеры соревнований используют системы зажигания повышенной энергии с установкой двух свеч на один цилиндр. Используются также детонационно стойкие топлива, такие как этанол.

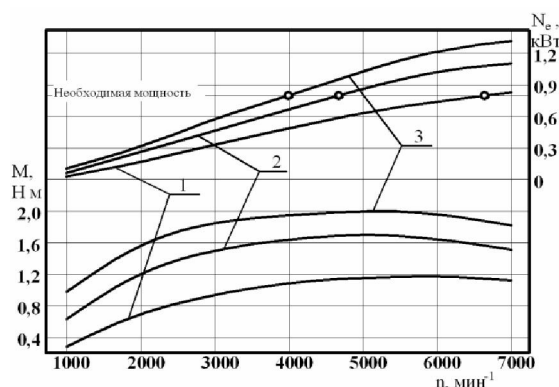


Рис. 3. Скоростные характеристики:  
 1 – штатный двигатель  $S = 26 \text{ мм}$ ,  $\epsilon = 8$ ;  
 2 –  $S = 35 \text{ мм}$ ,  $\epsilon = 8$ ; 3 –  $S = 35 \text{ мм}$ ,  $\epsilon = 11$

Важной предпосылкой, позволяющей рассматривать возможность повышения степени сжатия до 17, является ограниченное время работы двигателя. Следовательно, в надпоршневом пространстве не возникнет предпосылок для возникновения детонации. Известно [11], что повышение температуры поверхностей, ограничивающих камеру сгорания, достаточно инерционный процесс с характерной постоянной времени  $k = 0,022 \text{ с}^{-1}$ . В таком случае для условий пуска двигателя с выходом на номинальный режим (старт автомобиля в течение  $\tau = 11 \text{ с}$ ), повышение температуры днища поршня составит  $1 - e^{-kt} = 0,221$  или 22,1 % от полного перепада. Постоянная времени  $k$  получена экспериментально при испытаниях двигателя СМД-60 в процессе запуска прогретого двигателя с выходом на номинальный режим.

Очевидным будет замечание, что указанными изменениями не исчерпываются возможные пути снижения расхода топлива и формирования необходимой скоростной характеристики. Так, применение системы впрыскивания с электронным управлением является безальтернативным способом организации подачи топлива. Установка инжектора возможна перед впускным клапаном, что в данное время реализовано на двигателе автомобиля ХАДИ-34. В перспективе подача топлива должна осуществляться непосредственно в цилиндр.

Таблица 2. Показатели эффективности модернизации двигателя

D, мм	S, мм	S/D	$\epsilon$	частота при $N_e=0,8 \text{ кВт}$	$g_e$ , г/(кВт·час)
35	26	0,74	8	6700	300
35	35	1	8	4650	251
35	35	1	11	4000	222

Повышение качества наполнения цилиндра свежим зарядом при бездрессельном регулировании состава смеси будет связано с модернизацией впускной системы, внедрением динамического наддува, снижением потерь на впуске и выпуске.

Автоматизация запуска двигателя требует использования соответствующих пусковых систем. В данном случае применение специального электрического двигателя является наиболее эффективным.

#### Моделирование работы двигателя в условиях соревнований

Характеристики транспортного средства, влияние на них параметров двигателя возможно определить с помощью моделирования в среде AVL Cruise. Построенная модель ХАДИ – 34 (рис. 4) включает все компоненты автомобиля, в том числе ДВС, характеристики которого в данную модель импортируются из Boost.

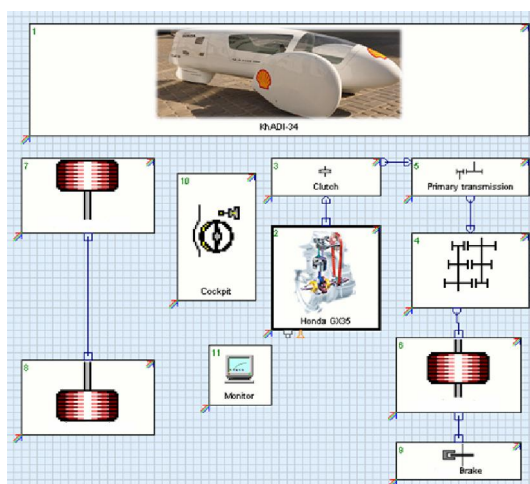


Рис. 4. Модель автомобиля ХАДИ-34 в AVL Cruise

Результаты моделирования работы двигателя в составе спортивного автомобиля ХАДИ-34 во время старта приведены на рис. 5, 6. При старте автомобиля, оснащенного двухступенчатой коробкой передач и центробежным сцеплением, скорость  $v$  изменяется по указанной на рис. 4 характеристике. При использовании серийного двигателя момент переключения передач происходит на 6,75 секунде. Работа на второй передаче заканчивается на 18 секунде при достижении скорости 10,5 м/с. Дальнейшее перемещение автомобиля происходит накатом с выключенным двигателем.

Модернизированный двигатель с  $S = 35$  мм,  $\varepsilon = 11$ , инжекторной системой подачи топлива во впускной канал позволяет сократить характерные периоды. Момент переключения передач происходит на 4,87 секунде. Работа на второй передаче за-

канчивается на 11,5 секунде при достижении скорости 10,5 м / с. Именно такое сокращение позволяет создать предпосылки к снижению расхода топлива на прохождение дистанции.

Проанализировать работу двигателя можно с помощью характеристик (рис. 5). Изменение индикаторной мощности  $N_i$  и крутящего момента  $M_{кр}$  двух вариантов двигателей свидетельствует об эффективности предложенного пути модернизации. На первом этапе, который длится 0,5 - 0,6 с, происходит запуск двигателя. Выход на максимальный  $M_{кр}$  зафиксировано на 3 секунде. Но интенсивность роста момента и мощности при увеличении литража и степени сжатия позволяет сократить время работы на первой передаче. Дальнейшая стабилизация мощности и момента происходит при работе на второй передаче. Продолжительность работы на второй передаче при использовании модернизированного двигателя сократилась на 4,62 с. Это объясняется ростом мощности  $N_i$  с 900 до 1200 Вт.

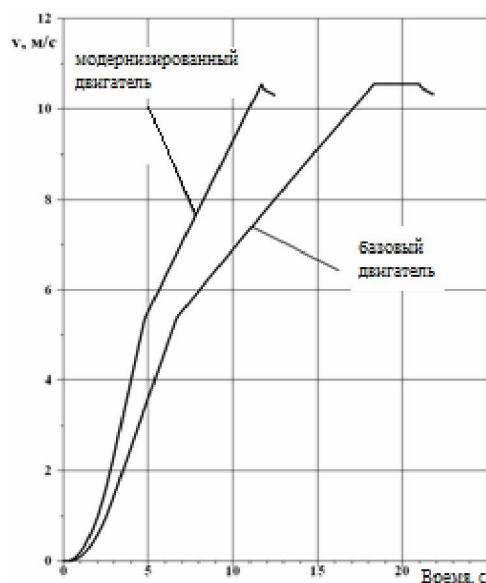


Рис. 5. Рост скорости во время старта для двух вариантов двигателя

#### Методика модернизации двигателя

Для реализации указанных конструктивных изменений максимально используя детали серийного ДВС, в среде CAD/CAE системы Inventor построена параметрическая модель двигателя. Изменение конструкции двигателя заключается в установке составного коленчатого вала на трех опорах подшипниках качения, располагающихся в поддоне, который соединяется с моноблоком двигателя через проставку толщиной 9 мм. Это позволяет увеличить радиус кривошипа с 13,5 до 17,5 мм. Указанные конструктивные изменения позволяют увеличить степень сжатия с 8 до 11 единиц. Следует отметить, что дополнительная опора коленчато-

го вала – необходимое условие оборудования двигателя пусковой системой с электрическим стартером.

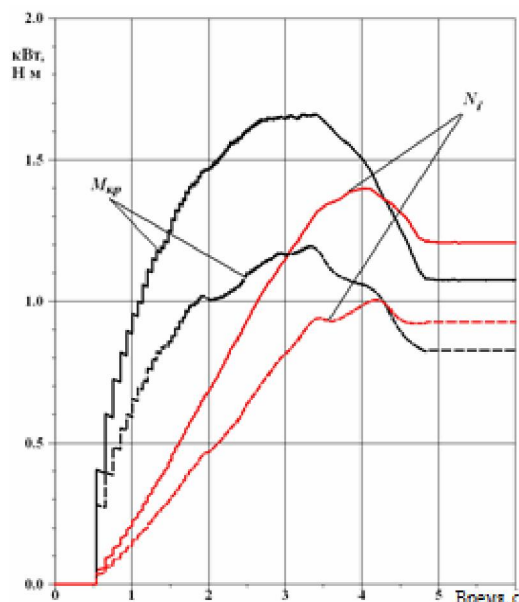


Рис. 6. Изменение индикаторной мощности ( $N_i$ ) и крутящего момента ( $M_{кр}$ ) во время старта автомобиля по алгоритму (рис. 5): сплошная – модернизированный двигатель; штриховая – серийный двигатель

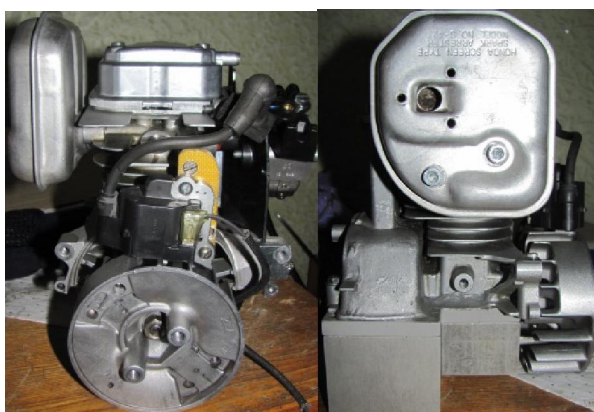


Рис. 7. Модернизированный двигатель

Как отмечалось выше, применение двигателя HONDA GX-25, даже модернизированного, не позволит выйти на лидирующие позиции в соревнованиях. Поэтому в дальнейшем предполагается постройка оригинального двигателя, адаптированного к условиям соревнований.

#### Выводы

Проведен анализ конкурентов, тактика прохождения дистанции и конструктивные параметры двигателей автомобилей команд победителей.

Определены условия работы двигателя, заключающиеся в пуске в режиме бездрессельного регулирования с выходом на режим мощности около

0,8 кВт, а также условия при остановке двигателя и последующих кратковременных (5 – 15 с) запусках для придания автомобилю необходимой скорости и дальнейшего движения в режиме нака-та.

Предложен путь снижения расхода топлива в условиях соревнований путем изменения внешней скоростной характеристики двигателя HONDA GX-25 с достижением необходимой мощности и крутящего момента при частоте вращения коленчатого вала  $4000 \text{ мин}^{-1}$ . Изменение внешней скоростной характеристики достигается путем увеличения хода поршня с 26 до 35 мм и степени сжатия с 8 до 11.

Проведенное расчетное исследование показывает, что предложенные изменения позволяют снизить расход топлива для обеспечения необходимой мощности с 300 до 222 г/(кВт·час).

В среде CAD/CAE системы Inventor построена параметрическая модель двигателя. Изменение конструкции двигателя заключается в установке составного коленчатого вала на трех опорах-подшипниках качения, располагающихся в поддоне, который соединяется с моноблоком двигателя через проставку. Дополнительная опора коленчатого вала – необходимое условие оборудования двигателя пусковой системой с электрическим стартером.

В дальнейшем с использованием пакета AVL Cruise будет проведено расчетное исследование процессов, происходящих в двигателе непосредственно в условиях соревнований.

#### Список литературы:

1. Компания Shell. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://www.shell.ua/environment-society/eco-marathon.html>
2. Лаборатория скоростных автомобилей ХНАДУ. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://lsa.net.ua/ru/automobile/khadi>
3. Регламент соревнований Shell EcoMarathon. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://s01.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/ecomarathon/downloads/pdf/sem-global-official-rules-chapter-1-2014.pdf>
4. Концерн HONDA. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: [http://www.honda-motor.su/catalogue/gx-m4\\_series/gx-25.htm](http://www.honda-motor.su/catalogue/gx-m4_series/gx-25.htm)
5. Технологический университет НАНТ. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://www.la-joliverie.com/projets--edagogiques/micro-joule-cityjoule/>
6. Венгерская команда GAMF автомобиль «мегамертер». // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://energyblog.national-geographic.com/2012/05/08/hungarys-megameter-their-knowledge-is-the-fuel-of-the-future/>
7. Компания VEMS параметры топливной аппаратуры автомобиля «Мегамертер». // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://www.vems.hu/wiki/index.php?page=MebersPage%2FShellEcoMarathon>
8. Команда Remmi. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту:

<http://remmi-team.com/content/vehicles/r7> 9. Американский университет Penn State Behrend. // Официальный сайт. – 2013 г. – Режим доступа к сайту: <http://behrend.orgsync.com/org/societyofautomotiveengineers22440> 10. Двигатели внутреннего сгорания. В 3 кн. Кн. 1. Теория рабочих процессов: Учебник для вузов/В. Н. Луканин, И. В. Алексеев, М. Г. Шатров и др.; Под ред. В. Н. Луканина и М. Г. Шатрова. – 2-е изд., перераб. И доп. – М.: Высш. шк., 2005. – 479 с.: ил. 11. Процессы в перспективных дизелях / Под ред. А.Ф. Шеховцова. – Х.: Изд-во «Основа» при Харьк. Ун-те, 1992. – 352 с.

**Bibliography (transliterated):**

1. Company Shell. // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://www.shell.ua/environment-society/eco-marathon.html> 2 . Laboratory speeders HNADU -mobiles . // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://lsa.net.ua/ru/automobile/khadi> 3 . Competition regulations Shell EcoMarathone. // The Official tion site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://s01.static-shell.com/content/dam/shell-new/local/corporate/ecomarathon/downloads/pdf/sem-global-official-rules-chapter-1-2014.pdf> 4 . Concern HONDA. // Official site . - 2013 - Mode of access to the

site : [http://www.honda-motor.su/catalogue/gx-m4\\_series/gx-25.htm](http://www.honda-motor.su/catalogue/gx-m4_series/gx-25.htm) 5 . Technological University of Nantes. // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://www.la-joliverie.com/projets-edagogiques/microjoule-cityjoule/> 6. Hungarian team GAMF car " megameter ." // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://energyblog.nationalgeographic.com/2012/05/08/hungarys-megameter-their-knowledge-is-the-fuel-of-the-future/> 7. Kompaniya VEMS vehicle fuel system parameters " Megameter ." // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://www.vems.hu/wiki/index.php?page=MebersPage%2FShellEcoMarathon> 8. Team Remmi. // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://remmi-team.com/content/vehicles/r7> 9. American University Penn State Behrend. // Official site . - 2013 - Mode of access to the site : <http://behrend.orgsync.com/org/societyofautomotiveengineers22440> 10 . Internal combustion engines. In 3 books . Book. 1. Theory working processes : Textbook for Universities / V. N. Lukanin , IV Alexeev, MG Tabernacles , etc.; Ed. VN Lukanina and MG Shatrova . - 2nd ed . , Rev . And add. - M.: Higher . wk . , 2005 . - 479 p . : il. 11. Process in promising diesel / Ed. AF Shehovtsova . - H.: Publishing house " basis " in Kharkov. University, those in 1992. - 352 .

Поступила в редакцию 17.06.2014

**Абрамчук Федор Иванович** - доктор техн. наук, проф., заведующий кафедры двигателей внутреннего сгорания Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: [dvs@khadi.kharkov.ua](mailto:dvs@khadi.kharkov.ua).

**Врублевский Александр Николаевич** – доктор техн. наук, проф., проф. кафедры двигателей внутреннего сгорания Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: [vanvgu@mail.ru](mailto:vanvgu@mail.ru).

**Подлещук Сергей Олегович** – аспирант кафедры двигателей внутреннего сгорания Харьковского национального автомобильно-дорожного университета, Харьков, Украина, e-mail: [podluy23@rambler.ru](mailto:podluy23@rambler.ru)

**ШЛЯХИ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ДВЗ ЯК СИЛОВОЇ УСТАНОВКИ АВТОМОБІЛЯ ХАДІ-34**

**Ф.І. Абрамчук, А.Н. Врублевский, С.О. Подліщук**

Представлені результати пошуку шляхів зниження витрати палива рекордним автомобілем ХАДІ-34 при використанні в якості силової установки малолітражного чотиритактного двигуна. Зроблено висновок про доцільність зміни зовнішньої швидкісної характеристики при бездросьельному регулюванні. Виконані попередні розрахунки, які показують ефективність модернізації двигуна збільшенням ступеня стиснення і ходу поршня.

**WAYS TO IMPROVE THE EFFECTIVENESS OF ICE AS POWER UNIT FOR CAR HADI-34**

**F. Abramchuk, O. Vrublevskiy, S. Podlishchuk**

The results of the search for ways to reduce fuel consumption in record car HADI-34 when used as a power unit for subcompact four-stroke engine. Concluded the feasibility of changing the external high-speed performance at throttle-free regulation. The preliminary calculations, showing the effectiveness of increasing modernization of the engine compression ratio and stroke were conducted.

УДК 621.43

**Ю.Ф.Гутаревич, І.В. Грицук**

**ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ КОМБІНОВАНОГО ПРОГРІВУ ТРАНСПОРТНОГО ДВИГУНА З ВИКОРИСТАННЯМ ТЕПЛОВОГО АКУМУЛЯТОРА З ФАЗОВИМ ПЕРЕХОДОМ**

У статті розглядаються результати експериментальних досліджень системи прогріву транспортного двигуна з використанням теплового акумулятора з фазовим переходом. Для реєстрації параметрів автомобільного двигуна використовувалась інтелектуальна система моніторингу параметрів робочих процесів. Результати оцінювання ефективності застосування системи прогріву підтвердили покращення паливної економичності і часових показників при роботі автомобільного двигуна.

**Вступ**

Пускові якості автомобільних двигунів (АД)

транспортних засобів (ТЗ) оцінюються граничною температурою надійного пуску і часом, необхідним