

### Раздел III. Технические приборы и устройства. Моделирование и анализ

УДК 629.113 (075)

А.Л. Береснев, М.А. Береснев

#### УВЕЛИЧЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ДВС В СОСТАВЕ ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ\*

*Рассматривается проблема увеличения ключевых показателей двигателей внутреннего сгорания, использующихся в составе широкого спектра подвижных объектов, в том числе автотранспорта, надводных, подводных и воздушных судов. Предложен подход к решению задачи разработки оптимальной формы впускного тракта двигателя, обеспечивающей увеличение наполнения цилиндров топливно-воздушной смесью и равномерное распределение воздуха по цилиндрам. Кроме того, поставлено требование симметрии времени, означающее необходимость подвода воздуха от дроссельной заслонки к впускному клапану каждого цилиндра за одинаковое количество времени. Представлены результаты вычислительных испытаний полученной формы впускного коллектора, подтверждающие соответствие разработанной модели поставленным требованиям. По трехмерной модели изготовлен макетный образец, предназначенный для установки на малолитражный атмосферный 4-цилиндровый ДВС. Обоснована необходимость внесения изменений в программное обеспечение системы управления двигателем для достижения максимальной отдачи при испытаниях макетного образца. Соответствующие изменения описаны, приведены графики сравнения установочных параметров по сравнению со штатными значениями. Для проведения натурных испытаний собран экспериментальный стенд, на котором построена внешняя скоростная характеристика двигателя при использовании штатного впускного коллектора и впускного коллектора разработанной формы. Приведены результаты испытаний, наглядно демонстрирующие увеличение мощности и крутящего момента двигателя.*

*Двигатель внутреннего сгорания; моделирование; впускной тракт; подвижный объект.*

A.L. Beresnev, M.A. Beresnev

#### IMPROVING IC ENGINE EFFICIENCY FOR MOBILE VEHICLES

*The problem of increase in key indicators of the internal combustion engines which are used as a part of a wide mobile objects range, including motor transport surface, underwater and air-crafts is considered. The approach to the solution of a problem of development the optimum form of an intake system the engine providing increase in filling of cylinders with fuel and air mix and uniform distribution of air on cylinders is offered. Besides, the requirement of symmetry in time that means a need of air intake from a throttle to the inlet valve of each cylinder for identical amount of time is put. The computing tests results of the developed form of an intake collector confirming compliance to the developed model to the given requirements are presented. Model sample intended for installation on small-capacity atmospheric 4-cylinder IC engine is made on the base of 3d-model. The necessity of the software modification of the engine control system for achievement of the maximum return at tests of a model sample is proved. Corresponding changes*

\* Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки РФ (НИР №114041540005).

*are described; comparison charts of adjusting parameters are given. Experimental stand for carrying out natural tests was assembled and used to get the external high-speed characteristic of the engine when using a regular intake collector and intake collector of the developed form. The results of tests that clearly demonstrate increase in power and a torque of the engine are given.*

*Internal combustion engine; modeling; intake system; vehicle.*

**Введение.** В настоящее время появляется все больше задач, требующих решения без присутствия человека. Это исследование дальних слоев атмосферы автономными воздухоплавательными платформами длительного барражирования [1–3], а также с помощью беспилотных летательных аппаратов [4]; освоение мирового океана и мониторинг окружающей среды с применением автономных надводных и подводных роботизированных аппаратов [5, 6]; работы в неблагоприятных либо опасных для человека областях на поверхности земли [8, 9].

При этом время автономного функционирования робототехнических комплексов и автономных систем является одним из ключевых параметров, определяющих спектр возможных применений. Увеличение автономности достигается повышением эффективности работы всех узлов и компонентов подвижных объектов, самым энергоемким из которых является ходовой двигатель. В качестве ходового часто используется двигатель внутреннего сгорания с принудительным воспламенением, поскольку он надежен, отказоустойчив и доступен во множестве вариантов исполнения, удовлетворяющих энергетические требования большинства задач.

Однако потенциал по улучшению характеристик двигателя внутреннего сгорания в настоящее время не исчерпан. Работы ведутся в направлении оптимизации конструкции [10, 11], методов управления [12, 13] и использования альтернативных видов топлива [14, 15]. Изучение газодинамических параметров такого узла ДВС, как впускной коллектор, является важным фактором для достижения высоких показателей экономичности и эффективности рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания. Следовательно, решение задачи проектирования впускного коллектора оптимальной формы увеличивает и эффективность подвижного объекта в целом.

**Разработка оптимальной формы впускного коллектора.** Для определения формы впускного коллектора необходимо изучить влияние основных геометрических параметров на газодинамические характеристики.

В общем случае равномерности распределения свежего заряда по цилиндрам можно добиться приданием впускному тракту симметричной формы. Причем система должна иметь не только пространственную симметрию, но и симметрию по времени. Последнее означает, что проходящая через дроссельную заслонку порция смеси должна подходить к впускным каналам всех цилиндров за одинаковое время.

Площадь сечения резонансного трубопровода задается такой, чтобы при допустимой длине трубопровода он обеспечивал приемлемые гидравлические потери. Наиболее существенное влияние на настройку волновой системы оказывают объем резонатора и длина резонансного трубопровода. При этом влияние частоты колебаний системы на изменение длины резонансного трубопровода в 1,5–2,0 раза выше, чем на изменение объема резонатора.

Изучение движения и теплообмена текучей среды моделируется с помощью уравнений Навье–Стокса, описывающих в нестационарной постановке законы сохранения массы, импульса и энергии этой среды. Кроме того, используются уравнения состояния компонентов текучей среды, а также эмпирические зависимости вязкости и теплопроводности этих компонентов среды от температуры. Сжимаемые жидкости задаются зависимостью их плотности от давления. Для моделиро-

вания турбулентных течений используются уравнения Навье–Стокса, осредненные по Рейнольдсу, т.е. используется осредненное по малому масштабу времени влияние турбулентности на параметры потока, а крупномасштабные временные изменения, осредненные по малому масштабу времени составляющих газодинамических параметров потока (давления, скоростей, температуры), учитываются введением соответствующих производных по времени. В результате уравнения имеют дополнительные члены – напряжения по Рейнольдсу, а для замыкания этой системы используются уравнения переноса кинетической энергии турбулентности и ее диссипации в рамках  $k$ – $\varepsilon$  модели турбулентности.

Эта система уравнений сохранения массы, импульса и энергии нестационарного пространственного течения имеет вид в рамках подхода Эйлера в декартовой системе координат ( $x_{i,i=1,2,3}$ ), вращающейся с угловой скоростью  $\Omega$  вокруг оси, проходящей через ее начало:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k) = 0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial (p u_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_i u_k - \tau_{ik}) + \frac{\partial P}{\partial x_i} = S_i, \quad (2)$$

$$\frac{\partial (pE)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} ((pE + P)u_k + q_k - \tau_{ik}u_i) = S_k u_k + Q_H, \quad (3)$$

Кинетическая энергия турбулентности  $k$  и диссипация этой энергией  $\varepsilon$  определяются следующими двумя уравнениями:

$$\frac{\partial p k}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k k) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( (\mu_i + \frac{\mu_i}{\partial_k}) \frac{\partial k}{\partial x_k} \right) + S_k, \quad (4)$$

$$\frac{\partial p \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_k} (p u_k \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial x_k} \left( (\mu_i + \frac{\mu_i}{\partial_\varepsilon}) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_k} \right) + S_\varepsilon. \quad (5)$$

Ламинарные и турбулентные пограничные слои течения около поверхностей твердого тела, а также переход ламинарного пограничного слоя в турбулентный и наоборот, турбулентного в ламинарный, моделируется с высокой точностью с помощью модифицированных универсальных пристеночных функций.

Для сжимаемых текучих сред используется уравнение состояния

$$\rho = \rho(P, T, y), \quad (6)$$

где  $y = (y_1, y_2, \dots, y_N)$ , – вектор концентрации компонентов текучей среды.

Также используется уравнение состояния идеального газа  $\rho = P/(RT)$ . Для несжимаемых жидкостей используется  $\rho = \rho(T, y)$ . Для сжимаемых жидкостей выбирается логарифмическая (7) или степенная (8) зависимость плотности от давления:

$$\rho = \rho_0 / \left( 1 - C \cdot \ln \frac{B + P}{B + P_0} \right), \quad (7)$$

$$\rho = \rho_0 \cdot \left( \frac{B + P}{B + P_0} \right)^{1/n}, \quad (8)$$

где  $\rho_0$  – плотность жидкости при давлении  $P_0$ ;  $C, B$  – коэффициенты.

С учетом вышеизложенного была разработана и построена компьютерная модель впускного коллектора оригинальной формы (рис. 1).

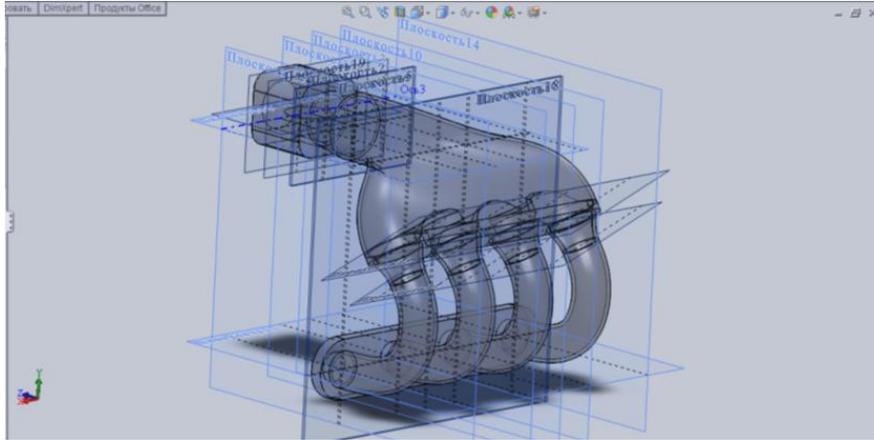


Рис. 1. Разработанная форма впускного коллектора

Исследования показали, что такая форма обеспечивает равномерное формирование воздушных потоков, равномерность показателей скорости и давления, создаваемого воздушным потоком (рис. 2). Причем равномерность сохраняется как в режиме частичных, так и высоких нагрузок.

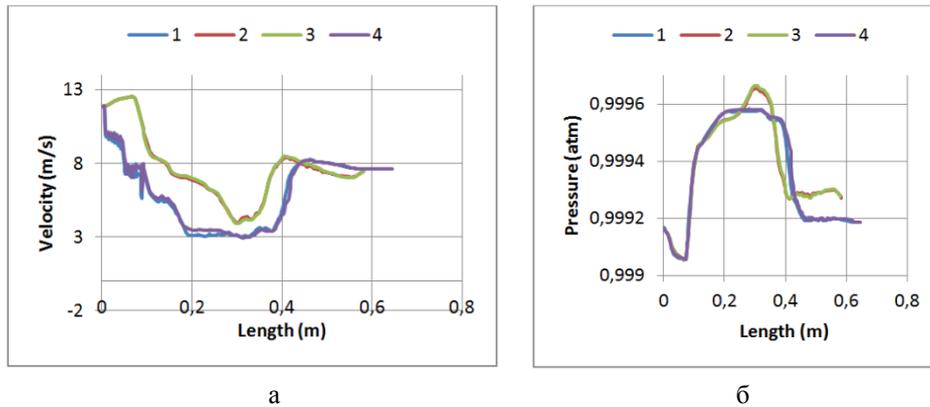


Рис. 2. Показатели разработанного впускного коллектора: а – скорость потоков по каналам; б – распределение давления по каналам

В разработанной форме отмечается однородность показаний скорости течения воздуха по каналам. В силу симметричности, идентичны значения для 1-го и 4-го каналов, а также для 2-го и 3-го каналов. Следует отметить, что графики скоростей по характеру повторяют друг друга, и это дает практически идентичные показатели давления на входе в цилиндр.

**Изготовление макетных образцов и модернизация программного обеспечения.** По разработанной компьютерной модели был изготовлен экспериментальный образец впускного коллектора. В качестве материалов использовались: стеклопластик, стекломат и полиэфирные смолы с наполнителями, пластификаторами и полимеризаторами. В коллектор установлены оригинальные метизы. Штатный

впускной коллектор состоит из двух частей: нижней, пристыковывающейся к блоку цилиндров, и верхней, соединенной с дроссельной заслонкой. Для простоты установки нижняя часть остается штатной, а заменяется верхняя часть. Такое компоновочное решение не влияет на итоговые показатели.

Замена впускного коллектора приводит к изменению циклового наполнения цилиндров и обычно не ведет к нарушению логики алгоритмов управления топливоподачей и зажигания.

При измерении характеристик отработавших газов газоанализатором «Инфракар» с разработанным впускным коллектором было зафиксировано некоторое обеднение топливно-воздушной смеси, не приводящее к негативным последствиям при работе двигателя, однако являющееся потенциальной возможностью дополнительного улучшения характеристик автомобиля, для чего необходима модернизация калибровок блока управления двигателем.

В системе управления двигателем, на котором испытывался впускной коллектор, топливоподача, которую необходимо увеличить для выравнивания соотношения «воздух/топливо», рассчитывается по следующей формуле:

$$GTC = GBC \frac{KGTCM}{ALF} + GTCD + GTCF, \quad (9)$$

где  $GTC$  – цикловая подача топлива;  $GBC$  – цикловой расход воздуха (цикловое наполнение);  $ALF$  – желаемый состав смеси на данном режиме;  $KGTCM$  – мультипликативная коррекция цикловой подачи топлива;  $GTCD$  – аддитивная коррекция цикловой подачи топлива в динамических режимах;  $GTCF$  – аддитивная коррекция цикловой подачи топлива с учетом топливной пленки

Наилучшим способом изменения  $GTC$  при установке разработанного впускного коллектора является коррекция циклового расхода воздуха. Увеличение потока не превышает константы «Максимальный расход воздуха для диагностики» и не приводит к активации аварийного режима. Базовая и модифицированная поверхности  $GTC$  приведены на рис. 3.

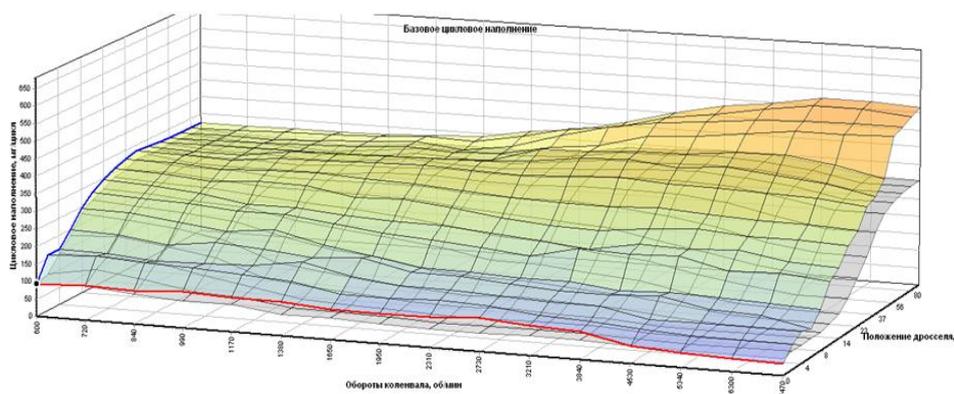


Рис. 3. Модификация параметров циклового наполнения

Кроме того, для улучшения показателей проведена коррекция углов опережения зажигания.

**Результаты натурных испытаний разработанного впускного коллектора.** Целью экспериментальных исследований, проводимых в рамках настоящей работы, являлось изучение результатов применения разработанной формы впускного коллектора. Для этого необходимо:

1. Провести измерение мощности и крутящего момента ДВС со стандартным впускным трактом и с разработанным.
2. Провести измерение наполнения цилиндров со стандартным впускным трактом и разработанным.

Принципиальная схема экспериментального стенда представлена на рис. 4:

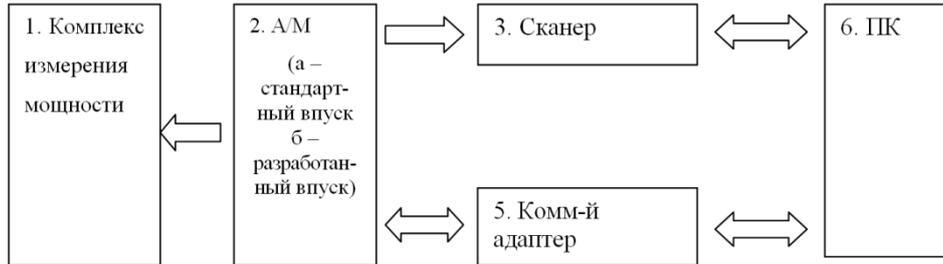


Рис. 4. Принципиальная схема стенда для проверки влияния разработанного впускного коллектора на показатели ДВС

На экспериментальном стенде были проведены измерения мощности и крутящего момента малолитражного 4-цилиндрового атмосферного двигателя со штатной и с разработанной системой впуска. Измерения для одного типа двигателей проводились один день для обеспечения одинаковых условий окружающей среды. В процессе экспериментов поддерживалась приблизительно одинаковая температура охлаждающей жидкости. Результаты измерений после обработки представлены на рис. 5, 6.

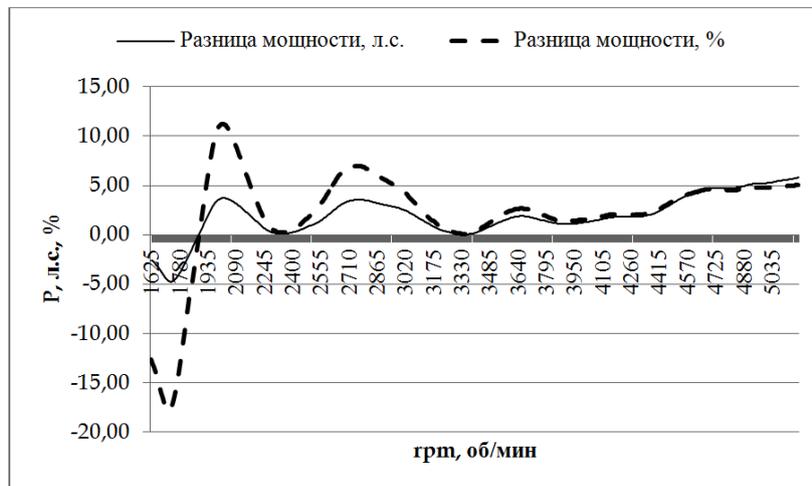


Рис. 5. Абсолютное и относительное изменение мощности двигателя при использовании стандартного впускного коллектора и разработанного

График мощности показывает преимущество разработанного впускного коллектора в подавляющем диапазоне нагрузок. Меньшие показатели на низких оборотах (1625–1800 об/мин) объясняются требованиями инструкции испытательного стенда по плавному выходу на полностью открытый дроссель и не могут рассматриваться как показательные. Начиная с 1800 об/мин наблюдается постоянный прирост мощности, причем максимальное его значение (10 %) достигнуто уже на

оборотах 2000 об/мин, что говорит о значительном улучшении качества управления подвижным объектом. Значительное преимущество наблюдается в зоне средних оборотов (6 %). Максимальная мощность двигателя увеличилась со 114 до 120 л.с. (на 5,83 %).

График крутящего момента добавляет детали в общую картину, очерченную на графике мощности. На рис. 6 видно, что форма графика крутящего момента после установки разработанного впускного коллектора стала более ровная, с плавными перегибами.

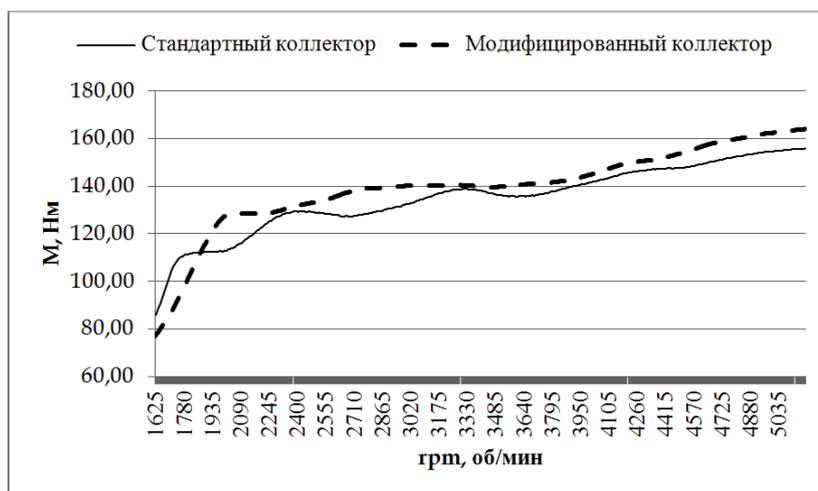


Рис. 6. Сравнение крутящего момента на внешней скоростной характеристике для двигателя при использовании стандартного впускного коллектора и разработанного

Такой вид кривой крутящего момента говорит о более равномерной передаче потока мощности на колеса. Крутящий момент увеличился во всем диапазоне оборотов коленчатого вала и это одно из преимуществ разработанного впускного коллектора по сравнению с имеющимися на рынке, которые если и увеличивают крутящий момент, то только в определенном диапазоне оборотов. Ухудшение момента по сравнению со стандартным впускным трактом с 1625 до 1800 об/мин не является показательным и обусловлено неравномерностью скорости открытия дросселя в разных измерениях. Далее во всем диапазоне оборотов крутящий момент увеличивается.

**Заключение.** Разработанная форма впускного коллектора подтвердила соответствие заявленным на этапе проектирования требованиям в вычислительных и натуральных экспериментах. Разница в распределении массового расхода воздуха по каналам разработанного впускного коллектора не превышает 1 %, достигнута однородность показаний скорости течения воздуха по каналам и симметрия по времени. Натурные испытания показали увеличение показателей мощности и крутящего момента двигателя, что свидетельствует об увеличении эффективности рабочего цикла ДВС, а также подвижного объекта, в составе которого он будет использоваться.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Grace D., Mohorcic M., Horwath J., Capstick M.H., Bobbio Pallavicini M., Fitch M.* Communications from Aerial Platform Networks delivering Broadband for All – An Overview of the CAPANINA Project, Invited Paper for Korean Workshop on HAPs, November 2004.
2. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю., Сиротенко М.Ю., Носко О.Э., Юрченко А.С.* Проектирование систем управления роботизированных воздухоплавательных комплексов на базе дирижаблей // Известия ТРТУ. – 2006. – № 3 (58). – С. 160-167.
3. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю. и др.* Управление воздухоплавательными комплексами: теория и технологии проектирования. – М.: Физматлит, 2010. – 394 с.
4. *Павлушенко М., Евстафьев Г., Макаренко Г.* Беспилотные летательные аппараты: история, применение, угроза распространения и перспективы развития // Научные записки ПИР-центра. – 2004. – № 2 (26).
5. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V.* Control system design for autonomous underwater vehicle // Proceedings – 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013. – С. 77-82.
6. *Гуренко Б.В.* Реализация и экспериментальное исследование авторулевого автономного надводного мини-корабля «Непгун» // Инженерный вестник Дона. – 2013. – № 4. – URL: [ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1920](http://ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/1920).
7. *Pshikhopov, V.Kh., Ali, A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments // IEEE International Conference on Mechatronics. – 2011. – P. 540-545.
8. *Пилюхов В.Х., Медведев М.Ю.* Управление подвижными объектами в определенных и неопределенных средах. – М.: Наука, 2011. – 350 с.
9. *Говорущенко Н.Я.* Экономия топлива и снижение токсичности на автотранспорте. – М.: Транспорт, 1990. – 154 с.
10. *Хиллард Д.* Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями: Пер. с англ. – М.: Машиностроение, 1988. – 369 с.
11. *Гусаров А.П., Кутнев В.Ф.* Важнейшие резервы улучшения топливной экономичности и снижения токсичности автомобилей // Автомобильная промышленность. – 1981. – № 5. – С. 5-8.
12. *Гирявец А.К.* Теория управления автомобильным бензиновым двигателем. – М.: Стройиздат, 1997. – 161 с.
13. *Береснев М.А.* Оптимизация угла опережения зажигания для достижения максимального крутящего момента двигателя внутреннего сгорания с помощью бинарного топлива // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2012. – № 1 (126). – С. 33-38.
14. *Береснев М.А., Береснев А.Л.* Управление составом бинарного топлива для улучшения показателей ДВС // АвтоГазоЗаправочный Комплекс + Альтернативное топливо. – 2012. – № 3 (63). – С. 7-11.
15. *Beresnev M., Beresnev A.* Using Mix of Gasoline and Liquefied Petroleum Gas for Lower Emissions and Greater Torque // SAE technical paper #2013-01-1151, 2013.

REFERENCES

1. *Grace D., Mohorcic M., Horwath J., Capstick M.H., Bobbio Pallavicini M., Fitch M.*, Communications from Aerial Platform Networks delivering Broadband for All – An Overview of the CAPANINA Project, Invited Paper for Korean Workshop on HAPs, November 2004.
2. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Sirotenko M.Yu., Nosko O.E., Yurchenko A.S.* Proektirovanie sistem upravleniya robotizirovannykh vozdukhoplavatel'nykh kompleksov na baze dirizhabley [Design of control systems of the robotized aeronautic complexes on the basis of airships], *Izvestiya TRTU [Izvestiya TSURE]*, 2006, No. 3 (58), pp. 160-167.
3. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu. & oth.* Upravlenie vozdukhoplavatel'nymi kompleksami: teoriya i tekhnologii proektirovaniya [Management of aeronautic complexes: theory and technologies of design]. Moscow: Fizmatlit, 2010, 394 p.
4. *Pavlushenko M., Evstaf'ev G., Makarenko G.* Bespilotnye letatel'nye apparaty: istoriya, primenenie, ugroza rasprostraneniya i perspektivy razvitiya [Unmanned aerial vehicles: history, application, threat of distribution and prospect of development], *Nauchnye zapiski PIR-tsentra [Scientific notes of the PIR center]*, № 2 (26), 2004.

5. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu., Gaiduk A.R., Gurenko B.V.* Control system design for autonomous underwater vehicle, Proceedings – 2013 IEEE Latin American Robotics Symposium, LARS 2013, pp. 77-82.
6. *Gurenko B.V.* Realizatsiya i eksperimental'noe issledovanie avtorulevogo avtonomnogo nadvodnogo mini-korablya «Neptun» [Realization and pilot study of the autosteering autonomous surface mini-ship "Neptune"], *Inzhenernyy vestnik Dona* [Journal of Engineering Don], 2013, No. 4. Available at: [ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1920](http://ivdon.ru/magazine/archive/n4y2013/1920).
7. *Pshikhopov, V.Kh., Ali, A.S.* Hybrid motion control of a mobile robot in dynamic environments, *IEEE International Conference on Mechatronics*, 2011, pp. 540-545.
8. *Pshikhopov V.Kh., Medvedev M.Yu.* Upravlenie podvizhnymi ob'ektami v opredelennykh i neopredelennykh sredakh [Management of mobile objects in certain and uncertain environments]. Moscow: Nauka, 2011, 350 p.
9. *Govorushchenko N.Ya.* Ekonomiya topliva i snizhenie toksichnosti na avtotransporte [Economy of fuel and decrease in toxicity on motor transport]. Moscow: Transport, 1990, 154 p.
10. *Khillard. D.* Toplivnaya ekonomichnost' avtomobiley s benzinovymi dvigatelyami: Per. s angl. [Fuel profitability of cars with petrol engines]. Moscow: Mashinostroenie, 1988, 369 p.
11. *Gusarov A.P., Kutenev V.F.* Vazhneyshie rezervy uluchsheniya toplivnoy ekonomichnosti i snizheniya toksichnosti avtomobiley [The most important reserves of improvement of fuel profitability and decrease in toxicity of cars] *Avtomobil'naya promyshlennost'* [Automotive Industry], 1981, No. 5, pp. 5-8.
12. *Giryavets A.K.* Teoriya upravleniya avtomobil'nym benzinovym dvigatelem [Theory of control of the automobile petrol engine]. Moscow: Stroyizdat, 1997, 161 p.
13. *Beresnev M.A.* Optimizatsiya ugla operezheniya zazhiganiya dlya dostizheniya maksimal'nogo krutyashchego momenta dvigatelya vnutrennego sgoraniya s pomoshch'yu binarnogo topliva [Optimization of a corner of an advancing of ignition for achievement of the maximum torque of an internal combustion engine by means of binary fuel], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2012, No. 1 (126), pp. 33-38.
14. *Beresnev M.A., Beresnev A.L.* Upravlenie sostavom binarnogo topliva dlya uluchsheniya pokazateley DVS. [Management of composition of binary fuel for improvement of indicators of DVS], *AvtoGazoZapravochnyy Kompleks + Al'ternativnoe toplivo* [GFP Complex + Alternative fuel], 2012, No. 3 (63), pp. 7-11.
15. *Beresnev M., Beresnev A.*, Using Mix of Gasoline and Liquefied Petroleum Gas for Lower Emissions and Greater Torque, SAE technical paper No. 2013-01-1151, 2013.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Н.А. Глебов.

**Береснев Алексей Леонидович** – Южный федеральный университет; e-mail: [beresneval@sfedu.ru](mailto:beresneval@sfedu.ru); 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; доцент.

**Береснев Максим Алексеевич** – e-mail: [mberesnev@sfedu.ru](mailto:mberesnev@sfedu.ru); кафедра электротехники и мехатроники; ассистент.

**Beresnev Aleksey Leonidovich** – Southern Federal University; e-mail: [beresneval@sfedu.ru](mailto:beresneval@sfedu.ru); 44, Nerkasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634371694; the department of electrotechnics and mechatronics; associate professor.

**Beresnev Maksim Alekseevich** – e-mail: [mberesnev@sfedu.ru](mailto:mberesnev@sfedu.ru); the department of electrotechnics and mechatronics; assistant.