

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ АККУМУЛЯТОРНЫХ ТОПЛИВНЫХ СИСТЕМ ДИЗЕЛЕЙ С ДАВЛЕНИЕМ ВПРЫСКИВАНИЯ ДО 300 МПа

А.Ю. Дунин, П.В. Душкин

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Москва, Российская Федерация
e-mail: a.u.dunin@yandex.ru; levvap@gmail.com

Представлены результаты исследования системы подачи топлива в дизельных двигателях с прямым впрыском Common Rail с давлением впрыска от 100 до 300 МПа. Для исследования системы впрыска в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете разработана экспериментальная установка. Она включает в себя систему впрыска с давлением до 300 МПа, систему измерения количества топлива, систему визуализации и электронную систему управления. Система Common Rail состоит из стандартного топливного насоса высокого давления и распределителя топлива. Выявлена существенная взаимосвязь между давлением впрыска и параметрами распыления топлива. В экспериментах использованы различные инжекторы, различающиеся конструктивными особенностями. Лучшие результаты при высоких давлениях подачи продемонстрировал инжектор Bosch CRI 2.6 с заданным объемом топлива и сбалансированным регулирующим клапаном. В будущем эта работа поможет исследовать одноцилиндровый дизельный двигатель. Эксперименты будут проводиться в Московском автомобильно-дорожном государственном техническом университете в целях выявления влияния давления впрыска на выброс выхлопных газов.

Ключевые слова: топливная аппаратура, аккумуляторная топливная система, электрогидравлическая форсунка, высокое давление впрыскивания.

TEST RESULTS OF COMMON RAIL FUEL INJECTION SYSTEM FOR DIESEL ENGINES WITH FUEL PRESSURE UP TO 3000 BAR

A.Yu. Dunin, P.V. Dushkin

Moscow Automobile and Road Construction University, Moscow, Russian Federation
e-mail: a.u.dunin@yandex.ru; levvap@gmail.com

The article presents the results of examining Common Rail fuel injection system with fuel pressure from 1000 to 3000 bar. To investigate the injection system, the engineers of the Moscow Automobile and Road Construction University have developed an experimental setup. It includes the injection system with pressure up to 3000 bar, a system of injection quantity measuring, a system of injected spray visualization and an electronic control system. Common Rail injection system includes a standard high pressure fuel pump and a fuel rail. The research shows the significant correlation between injection pressure and geometric parameters of the fuel spray. For the experiments we used different injectors with different design features. At ultra high pressures Bosch CRI 2.6 injector with included fuel volume and balanced control valve has demonstrated the best results. In the future this study will help to do the research into the single cylinder diesel engine. The experiments will be carried out in the Moscow Automobile and Road Construction University and focus on the effect of injection pressure on exhaust gases emission.

Keywords: fuel equipment, Common Rail injection system, Common Rail fuel injector, ultra high pressure injection.

Направления развития двигателестроения в первую очередь определяются необходимостью выполнения строгих норм токсичности. По последним данным, опубликованным зарубежными исследователями [1, 2] и ведущими производителями топливной аппаратуры [3–5], один из перспективных путей развития дизелей — это увеличение до 300 МПа давления впрыскивания. Приводятся данные, что в сочетании с высоким до 0,5 МПа давлением наддува и степенью рециркуляции до 50 % можно достичь показателей токсичности, соответствующих Euro 6 без применения систем нейтрализации отработавших газов [1].

Экспериментальная установка. Для проведения экспериментальных исследований аккумуляторных топливных систем дизелей типа Common Rail, на кафедре “Теплотехника и автотракторные двигатели” МАДИ разработана экспериментальная установка с возможностью поддержания высокого давления топлива до 350 МПа.

Экспериментальная установка состоит из стенда для безмоторных испытаний, аккумуляторной топливной системы, микропроцессорной системы управления и установки для фото-видео регистрации топливных струй.

Безмоторная установка (рис. 1) имеет модульную конструкцию, позволяющую адаптировать ее под текущие исследовательские задачи и конструкцию топливной системы.

Для проведения исследований на стенд были установлены:

— асинхронный электродвигатель (7,5 кВт, 3000 мин^{-1}) с тиристорным преобразователем, позволяющим бесступенчато регулировать частоту вращения и электрические блоки питания 12 В и 24 В;

— датчик высокого давления (диапазон измерений 0...400 МПа с возможностью кратковременной перегрузки до 600 МПа) и стрелочный манометр (диапазон измерений 0...600 МПа);

— линия низкого давления, в состав которой входит топливоподкачивающий насос, электрические блоки питания 12 и 24 В, фильтр тонкой очистки топлива.

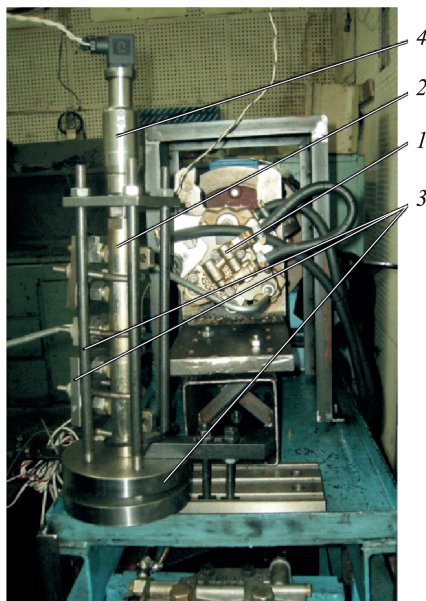


Рис. 1. Безмоторный стенд:
1 — ТНВД; 2 — топливный аккумулятор; 3 — каркас; 4 — датчик высокого давления

Топливная система включает в себя радиально-плунжерный топливный насос высокого давления (ТНВД), топливный аккумулятор и комплект форсунок. Аккумулятор установлен в специально изготовленном каркасе.

Система управления позволяет проводить безмоторные испытания топливной аппаратуры и выполняет следующие функции:

- поддержание заданного давления в аккумуляторе по обратной связи с датчиком давления;
- управление электрогидравлической форсункой (ЭГФ) с электромагнитным или пьезоэлектрическим приводом клапана;
- впрыскивание в соответствии с заданным положением коленчатого вала.

Описание основных элементов системы управления на одном из ранних этапов ее развития приведено в монографии [6].

Система для регистрации топливных струй представляет собой прозрачную вентилируемую камеру с возможностью создания внутри избыточного давления. Съемка струи проводится в проходящем через нее свете на высокоскоростную цифровую видеокамеру.

Объекты испытаний. В испытаниях исследовались ЭГФ фирм Bosch и Delphi.

1. Delphi DF11.4 (ЭГФ № 1). Привод управляющего клапана: электромагнитный. Управляющий клапан разгружен от сил давления топлива.

2. Bosch CRI2.2 (ЭГФ № 2). Привод управляющего клапана: электромагнитный.

3. Bosch CRI3.2 (ЭГФ № 3). Привод управляющего клапана: пьезоэлектрический.

4. Bosch CRI2.6 (ЭГФ № 4). Привод управляющего клапана: электромагнитный. Форсунка со встроенным аккумулятором, управляющий клапан разгружен от сил давления топлива.

Расходные характеристики получены путем взвешивания порции топлива, собранной за контрольное число циклов.

Электрогидравлическая форсунка № 1 оказалась наименее устойчивой к повышенным давлениям. В процессе её испытаний были сделаны следующие наблюдения:

— при давлениях в аккумуляторе более $p_{ак} = 160 \dots 180$ МПа работа ЭГФ становится нестабильной, периодически происходят пропуски и затягивания подачи. Причиной таких эффектов может быть трение в зазоре клапанного узла, возрастающее под действием высокого давления;

— дальнейшее повышение давления $p_{ак} = 240 \dots 260$ МПа становится невозможным из-за резкого увеличения расхода на слив. Предположительно это вызвано нарушением гидроплотности клапанного узла вследствие его деформации.

Электрогидравлическая форсунка № 2 по сравнению с ЭГФ № 1 оказалась более устойчивой к повышенным давлениям, но ее испытания сопровождались рядом негативных явлений:

— при давлении $p_{ак} = 250$ МПа и более наблюдается повышенный расход на слив;

— повышенный расход вызывает сильный нагрев топлива, самой форсунки и ТНВД. Температура корпуса в зоне управляющего клапана в котором происходит дросселирование топлива достигает 130 °С;

— работа форсунки становится нестабильной (низкая межцикловая стабильность) и требуется высокая мощность на привод ТНВД (более 7,5 кВт).

Одной из причин данных негативных эффектов является то, что давление топлива создает осевую нагрузку на клапан в направлении, обратном пружине, прижимающей клапан к седлу. При $p_{ак} = 250$ МПа и более силы пружины становится недостаточно для преодоления давления, следовательно, нарушается гидроплотность закрытого клапана и процесс его посадки.

Электрогидравлическая форсунка № 3 более устойчива к сверхвысоким давлениям, чем образцы № 1 и № 2. Работа с данной форсункой проводилась при наличии избыточного давления на сливе 1 МПа. Зависимость ее цикловой подачи от длительности управляющего импульса и давления топлива приведена на рис. 2, а.

В процессе испытаний форсунки были выявлены следующие особенности ее работы:

— при давлении более $p_{ак} = 250$ МПа для активации ЭГФ требуются токи и напряжения, значения которых существенно больше применяемых в современных топливных системах (зарядка пьезоэлемента током 60 А при постоянном напряжении 220 В).

Управляющий клапан данной форсунки не разгружен от силы давления топлива, но в отличие от предыдущего образца данная сила увеличивает надежность закрытия клапана. Для открытия клапана, прижатого высоким давлением, необходимо увеличить силу пьезопривода, т.е. поднять значения токов и напряжений; при давлении более $p_{ак} = 250$ МПа минимальный интервал между подачами составляет 200 мс.

Предположительно это вызвано увеличением давления в камере гидротолкателя, что приводит к утечкам топлива из ее полости. Увеличение давления в камере происходит из-за повышения передаваемой силой на нагруженный давлением топлива клапан. Для восстановления работоспособности форсунки требуется существенное время, необходимое для наполнения полости камеры.

Электрогидравлическая форсунка № 4 оказалась самой устойчивой к заданным сверхвысоким давлениям. Зависимость ее цикловой

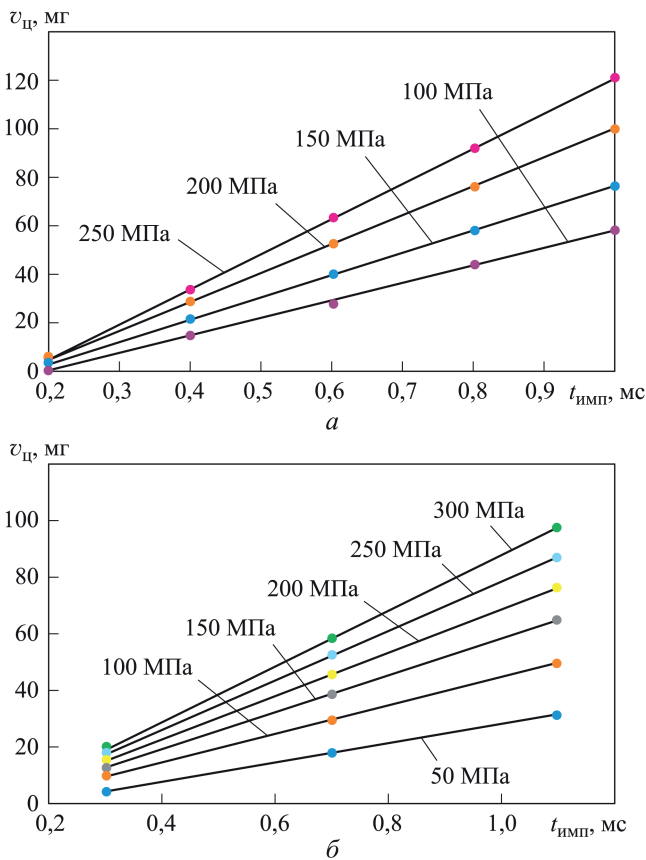


Рис. 2. Зависимость цикловой подачи $V_{ц}$ ЭГФ № 3 (а) и № 4 (б) от длительности управляющего импульса и давления топлива

подачи от длительности управляющего импульса и давления топлива в аккумуляторе $p_{ак}$ приведены на рис. 2, б.

Конструкции распылителей ЭГФ № 3 и № 4 отличаются использованием “плавающей втулки”.

Распылители, работающие по традиционной схеме с использованием, например, стали 18Х2Н4МА, обеспечивают заданный ресурс при давлении топлива до 160 МПа. Дальнейшее увеличение давления приводит к растрескиванию в зоне входа бокового топливного канала в карман распылителя (рис. 3, а) и разрушению корпуса распылителя.

Переход на конструкцию распылителя с плавающей втулкой без бокового канала (рис. 3, б) позволяет увеличить в 1,56 раза давление (до 250 МПа). Одновременно появляется возможность уменьшить диаметр уплотняющей поверхности иглы. Уменьшение диаметра иглы при той же конструкции соплового аппарата позволяет уменьшить силу сжатия возвратной пружины и снизить силу удара при посадке иглы, что также способствует повышению ресурса распылителя.

Расчетные исследования, проведенные в МАДИ, показывают, что использование более высокопрочных сталей, например Н18К8М5Т,

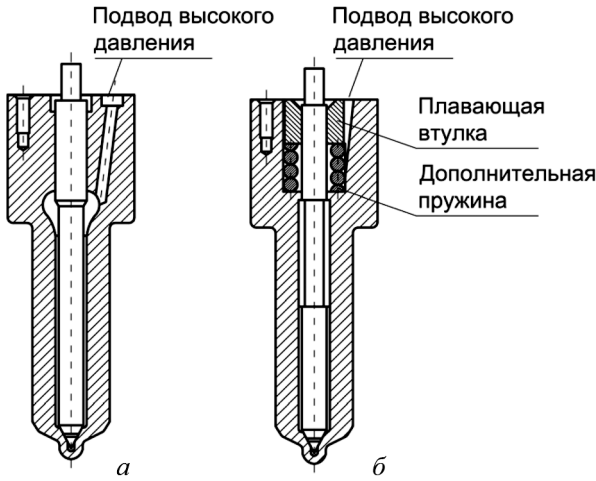


Рис. 3. Распылители традиционной конструкции (а) и с плавающей втулкой (б)

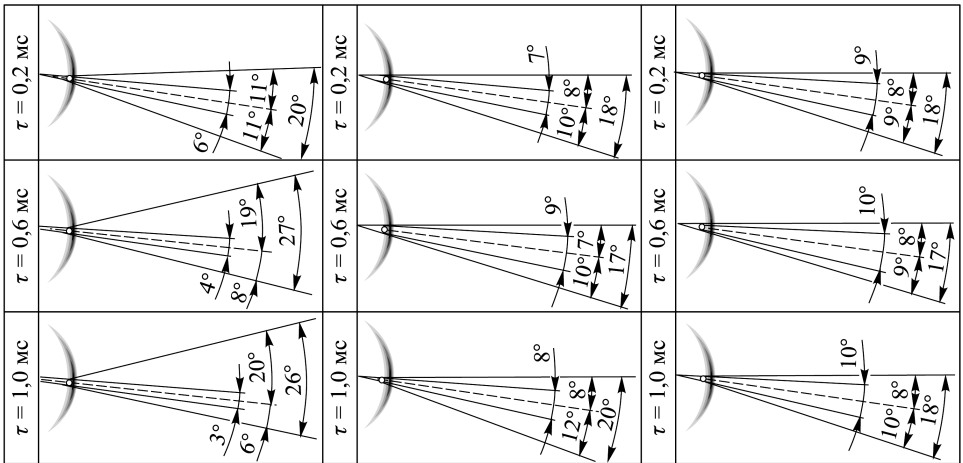


Рис. 4. Профиль струи при давлении $p_{ак} = 50$ (а), 150 (б) и 250 МПа (в); τ – время с момента начала впрыскивания

позволяет при сохранении ресурса увеличить до 300 МПа давление топлива.

Видеорегистрация топливных струй. Фотографии, приведенные в настоящей статье, получены при открытии форсунки одинаковым управляющим импульсом длительностью $t = 70 \text{ мс}$. Фоторегистрация проводилась высокоскоростной видеокамерой с частотой 5000 Гц (рис. 4).

На начальном этапе исследования впрыскивание топлива осуществлялось в воздушную среду при атмосферном давлении с использованием ЭГФ СRI2.2, укомплектованной одноструйным распылителем с диаметром распыливающего отверстия 0,12 мм.

Топливная струя неоднородна по ширине. Вдоль ее оси находится относительно плотное ядро, которое состоит из распадающихся макро-

объемов. Ядро струи движется в спутном потоке капельно-воздушной смеси, представляющем собой пограничный слой топливной струи [7].

При давлении в аккумуляторе 50 МПа угол конуса ядра струи составляет $3 \dots 6^\circ$ и коррелируется с результатами, полученными ранее: $3 \dots 5^\circ$ [7]. При увеличении давления впрыскивания угол конуса ядра растет. Так, при 100 МПа угол конуса ядра равен $4 \dots 9^\circ$, при 150 МПа — $7 \dots 9^\circ$, а при 200 МПа и 250 МПа — $9 \dots 10^\circ$.

Не менее очевидно и уменьшение угла пограничного слоя струи. При 50 МПа угол конуса пограничного слоя составляет $22 \dots 27^\circ$, при 100 МПа он равен $20 \dots 28^\circ$, при 150 МПа — $18 \dots 20^\circ$, при 200 МПа — $18 \dots 19^\circ$ и при 250 МПа — $7 \dots 18^\circ$.

Изменение углов струи происходит неравномерно. Наибольшее изменение наблюдается при переходе от 100 к 150 МПа.

Показано уменьшение колебаний пограничного слоя струи относительно ее оси. Наибольшие колебания зарегистрированы при $p_{\text{ак}} = 50$ МПа, их можно приблизительно оценить в пределах 10° . Затем, с увеличением $p_{\text{ак}}$ колебания ядра уменьшаются и становятся практически незаметными при 250 МПа (рис. 4, в).

Выводы. Проведены безмоторные экспериментальные исследования ЭГФ, в том числе видеорегистрация струй топлива.

1. Исследованы четыре варианта конструкции ЭГФ в целях определения предела работоспособности по максимально возможному давлению в аккумуляторной топливной системе:

— наиболее устойчивой к высоким давлениям (до 300 МПа) оказалась ЭГФ Bosch CRI2.6 с электромагнитным приводом клапана. Конструктивными особенностями форсунки являются встроенный аккумулятор, распылитель с “плавающей втулкой” и управляющий клапан, разгруженный от сил давления топлива;

— ЭГФ Bosch CRI3.2 с пьезоэлектрическим приводом клапана обеспечивает работоспособность до 250 МПа; данная форсунка также имеет распылитель с “плавающей втулкой”;

— ЭГФ Bosch CRI2.2 и ЭГФ Delphi DFI1.4 обеспечивают работоспособность до давлений в аккумуляторе 200 МПа (Bosch) и 180 МПа (Delphi). Обе форсунки имеют электромагнитный привод клапана. Управляющий клапан ЭГФ Delphi разгружен от сил давления топлива. Дальнейшее повышение давления в аккумуляторе приводит к существенным нарушениям топливоподачи.

2. Анализ результатов видеорегистрации струй распыленного топлива при давлениях $50 \dots 250$ МПа через односопловой распылитель показал, что увеличение давления впрыскивания сопровождается следующими особенностями:

— рост ядра струи, угол конуса ядра струи увеличивается от $3 \dots 6^\circ$ до $9 \dots 10^\circ$;

— относительное уменьшение пограничного слоя струи от 22... 27° до 17... 18°;

— уменьшение колебаний пограничного слоя струи относительно ее оси от 10° до нуля градусов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends // CIMAC Congress. 2010. № 195.
2. Wloka J., Pötsch C., Wachtmeister G. Injection spray visualization for 3000 bar Diesel injection: 24th Conference of the Institute for Liquid Atomization and Spray Systems. 2011.
3. Why higher injection pressure saves fuel and also increases performance and torque // Bosch Media Service. URL: <http://www.bosch-resse.de/presseforum/details.htm?txtID=6522&locale=en>
4. DENSO Develops a New Diesel Common Rail System With the World's Highest Injection Pressure // Denso global URL: <http://www.globaldenso.com/en/newsreleases/130626-01.html> (дата обращения: 2013).
5. Delphi introduces 2,700 bar heavy-duty common rail injection system // DieselNet URL: <https://www.dieselnet.com/news/2012/09delphi.php>
6. Совершенствование рабочих процессов автотракторных дизелей и их топливных систем, работающих на альтернативных топливах: монография / М.Г. Шатров, А.С. Хачиян, Л.Н. Голубков, А.Ю. Дунин. М.: МАДИ, 2012. 220 с.
7. Топливные системы и экономичность дизелей / И.В. Астахов, Л.Н. Голубков, В.И. Трусов, А.С. Хачиян, Л.М. Рабикин. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

REFERENCES

- [1] Pflaum S., Wloka J., Wachtmeister G. Emission reduction potential of 3000 bar Common Rail Injection and development trends. CIMAC Paper no. 195. CIMAC Congress. Bergen, 2010.
- [2] Wloka J.; Pötsch C.; Wachtmeister G. Injection spray visualization for 3000 bar Diesel injection. 24th Conference of the Institute for Liquid Atomization and Spray Systems, 2011.
- [3] Why higher injection pressure saves fuel and also increases performance and torque. Bosch Media Service, 2013. URL: <http://www.bosch-resse.de/presseforum/details.htm?txtID=6522&locale=en>
- [4] DENSO Develops a New Diesel Common Rail System With the World's Highest Injection Pressure. Denso global, 2013. Available at: <http://www.globaldenso.com/en/newsreleases/130626-01.html>
- [5] Delphi introduces 2,700 bar heavy-duty common rail injection system. Diesel Net, 2012. Available at: <https://www.dieselnet.com/news/2012/09delphi.php>
- [6] Shatrov M.G., Hachiyani A.S., Golubkov L.N., Dunin A.U. Sovershenstvovanie rabochikh protsessov avtotraktornykh dizeley i ikh toplivnykh sistem, rabotayushchikh na al'ternativnykh toplivakh: monografiya [Improving the Working Processes of Automotive Diesel Engines and Fuel Supply Systems Running on Alternative Fuels. Monograph]. MADI Publ., 2012, 220 p.
- [7] Astahov I.V., Golubkov L.N., Trusov V.I., Hachiyani A.S., Rabikin L.M. Toplivnye sistemy i ekonomichnost' dizeley [Fuel Supply Systems and Efficiency of Diesel Engines]. Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p.

Статья поступила в редакцию 21.04.2015

Дунин Андрей Юрьевич — канд. техн. наук, доцент кафедры “Теплотехника и автотракторные двигатели” Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64.

Dunin A.Yu. — Cand. Sci. (Eng.), Assoc. Professor of Heat Engineering and Engines of Automobiles and Tractors department, Moscow Automobile and Road Construction University.

Moscow Automobile and Road Construction University, Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation.

Душкин Павел Витальевич — аспирант кафедры “Теплотехника и автотракторные двигатели” Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ).

Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ), Российская Федерация, 125319, Москва, Ленинградский пр-т, д. 64.

Dushkin P.V. — post-graduate student of Heat Engineering and Engines of Automobiles and Tractors department, Moscow Automobile and Road Construction University.

Moscow Automobile and Road Construction University, Leningradskiy prospekt 64, Moscow, 125319 Russian Federation.

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Дунин А.Ю., Душкин П.В. Результаты испытаний аккумуляторных топливных систем дизелей с давлением впрыскивания до 300 МПа // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. № 1. С. 80–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-80-88

Please cite this article in English as:

Dunin A.Yu., Dushkin P.V. Test results of common rail fuel injection system for diesel engines with fuel pressure up to 3000 bar. *Vestn. Mosk. Gos. Tekh. Univ. im. N.E. Baumana, Mashinost.* [Herald of the Bauman Moscow State Tech. Univ., Mech. Eng.], 2016, no. 1, pp. 80–88. DOI: 10.18698/0236-3941-2016-1-80-88