

УДК 641

А.А. Обозов, Д.И. Субботенко, В.В. Тараканов

ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОЦЕССОВ В ТОПЛИВНОЙ АППАРАТУРЕ ДИЗЕЛЯ С ЦЕЛЮ УЛУЧШЕНИЯ ЕГО ЭКОНОМИЧЕСКИХ И ЭКОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Проанализированы способы оптимизации процессов в топливной аппаратуре дизельного двигателя. Описаны конструктивные мероприятия по улучшению его экономических и экологических характеристик: управление давлением впрыска, многофазное впрыскивание, регулирование угла опережения впрыска топлива.

Ключевые слова: топливная аппаратура, аккумуляторная топливная система, многофазный впрыск, отработавшие газы, форма характеристики впрыска, угол опережения впрыска топлива, дизельные двигатели.

Ужесточение нормативов, ограничивающих вредное воздействие двигателей внутреннего сгорания на окружающую среду, в частности введение норм Евро-4, Евро-5, заставляет производителей двигателей искать пути решения проблемы снижения токсичности и шумности работы автомобильных дизелей.

Отработавшие газы (ОГ) дизелей – это сложная по составу многокомпонентная смесь газов, паров, капель жидкостей и дисперсных твердых частиц. Выхлопные газы дизелей содержат до 1000 компонентов сложного химического состава.

Ввиду присутствия в атмосфере множества различных химических элементов и соединений при сгорании топлива происходят реакции, приводящие к образованию в ОГ:

- продуктов неполного сгорания (оксида углерода CO, углеводородов C_nH_m, альдегидов C_nH_m-CHO, твердых частиц сажи С);
- продуктов окисления (оксидов азота NO_x, диоксида серы SO₂, формальдегида, бензола и многих других соединений).

Нормы ограничения выбросов в России и странах ЕЭС и время их принятия представлены на рис. 1.

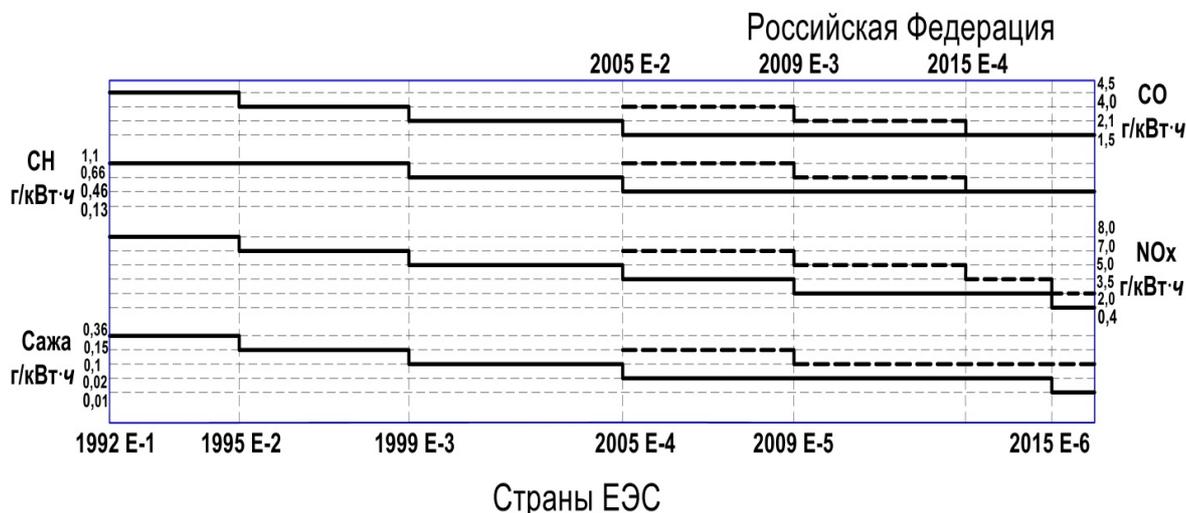


Рис. 1. Нормы ограничения выбросов в России и странах ЕЭС

Основные способы снижения токсичности ОГ дизелей [1]:

- Оптимизация смесеобразования в цилиндре.
- Согласование рабочего объема, степени сжатия и уровня форсирования.
- Выбор параметров воздушного заряда и системы охлаждения.

- Оптимизация процесса топливоподачи (многофазный впрыск, управление формой характеристики и моментом начала впрыска топлива, уменьшение интенсивности воздушного вихря в камере сгорания, повышение давления впрыска, качества распыливания топлива и улучшение формы струй).

- Совершенствование системы воздухообеспечения.
- Применение системы рециркуляции ОГ.
- Применение систем очистки ОГ.

Весомая часть способов совершенствования дизелей с целью улучшения их экологических показателей относится к топливоподаче и топливоподающей аппаратуре.

Оптимизация топливной подачи означает более полное сгорание и повышение КПД, а также уменьшение вредных примесей в выхлопе.

Если функции дизельных топливоподающих систем традиционного типа заключаются главным образом в определении того, сколько топлива подать за цикл и в какой период времени, то для перспективных систем, предназначенных для снижения токсичности отработавших газов дизелей в соответствии с требованиями наиболее строгих стандартов, всё более актуальным становится также вопрос, каким образом подать это топливо [2].

Развитие топливной аппаратуры (ТПА) представлено на рис. 2.

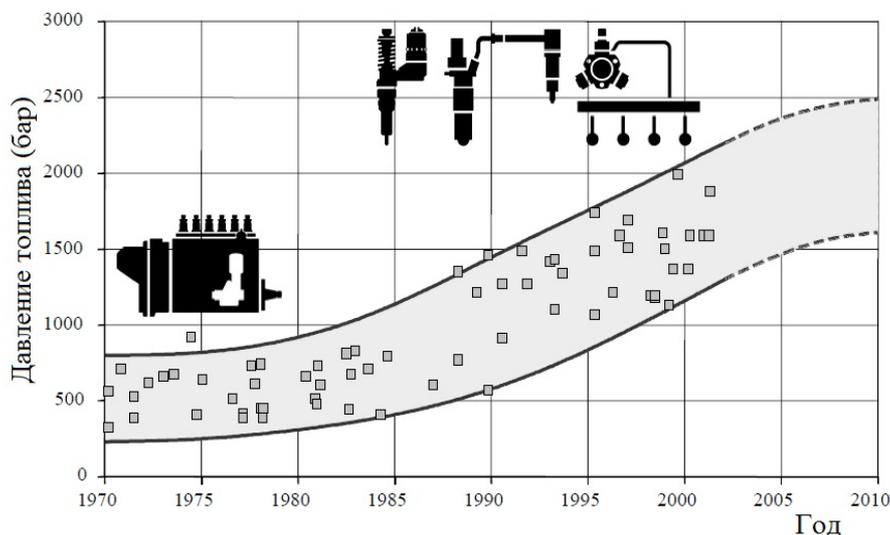


Рис. 2. Рост давлений впрыскивания и эволюция ТПА

Средством оптимизации топливной аппаратуры дизеля является повышение давления впрыска – эффективный метод сокращения продолжительности подачи топлива. Повышение давления впрыска улучшает качество распыливания топлива, что, в свою очередь, ускоряет выгорание топлива в диффузионной фазе процесса. Величина давления впрыскивания зависит от режима работы двигателя, нагрузки, давления наддува и должна быть оптимизирована в соответствии с этими факторами.

Характер влияния давления впрыска на показатели экологичности дизеля можно проследить на диаграммах (рис. 3). Изменение давления впрыска, образующее каждую из кривых, обеспечивает определённый предел снижения токсичности отработавших газов, соответствующий конкретному уровню давления впрыска. При достижении этого предела воздействие на рабочий процесс дизеля с одновременным снижением содержания NO_x , дымности и эмиссии твердых частиц возможно только при повышении давления и соответствующей оптимизации прочих параметров рабочего процесса.

Увеличение давления впрыска влечет за собой изменение продолжительности впрыска, тонкости распыливания топлива, длины распространения топливных факелов. Поэтому при повышении давления впрыска необходимо существенное изменение конструкции

двигателя: изменение размеров и формы камеры сгорания, впускных каналов в головке цилиндров, геометрии сопловых отверстий распылителя и т.п. Повышение динамических параметров впрыска топлива будет неэффективным и нецелесообразным при отсутствии оптимизации соответствующих систем и агрегатов двигателя [8].

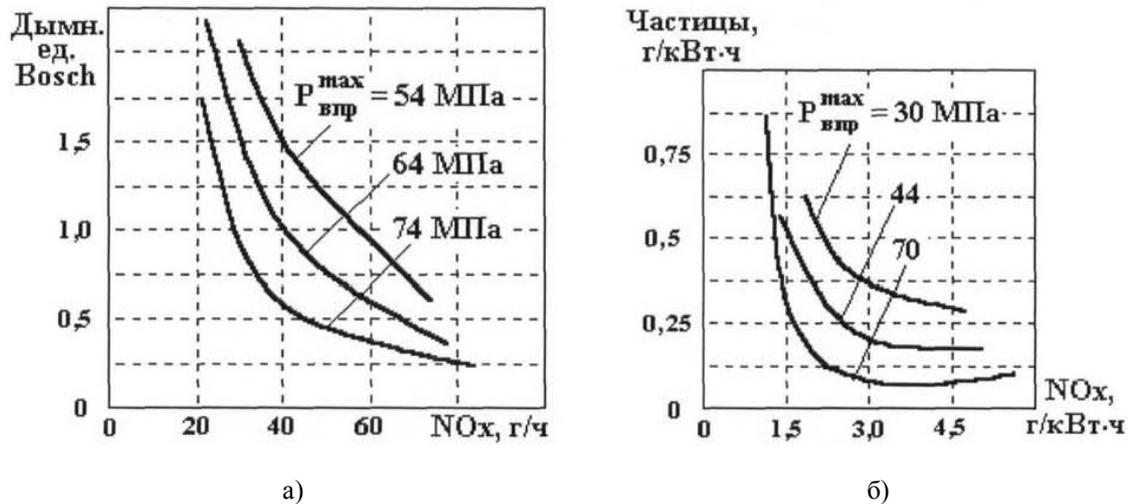


Рис. 3. Эмиссия вредных веществ при различных давлениях впрыска:
а – дизеля Mercedes OM611 при $n=2000 \text{ мин}^{-1}$, $P_e=0,4 \text{ МПа}$ [3, с.165]; б - дизеля Audi V6 TDI при $n=1500 \text{ мин}^{-1}$, $P_e=0,3 \text{ МПа}$ [3, с. 165; 4, с.92]

Угол опережения впрыскивания также оказывает существенное влияние на показатели экономичности дизеля, токсичности его отработавших газов и шумообразование. Он обуславливает значительное изменение длительности периода задержки воспламенения τ_i и доли топлива, поданного за этот период, что влияет на продолжительность диффузионного сгорания.

Более раннее впрыскивание относительно верхней мертвой точки (ВМТ) (на линии сжатия) приводит к увеличению τ_i и повышению температуры и давления рабочего тела в цилиндре в связи с тем, что значительная доля топлива сгорает, когда поршень находится в районе ВМТ. При подходе поршня к ВМТ происходит резкое возрастание давления и температуры рабочего тела. Это приводит к интенсивному и более полному сгоранию топлива в цикле, благодаря чему показатели топливной экономичности двигателя улучшаются. Также в этом случае происходит снижение выбросов продуктов неполного сгорания с отработавшими газами. Такое начало процесса сгорания при высокой концентрации окислителя, высоких температуре и давлении будет обуславливать повышенное содержание окислов азота NO_x в отработавших газах дизеля.

Более позднее впрыскивание, когда большая часть впрыскивания происходит после ВМТ (на линии расширения), приводит к уменьшению τ_i , снижению максимальной температуры цикла, скорости нарастания давления. В этом случае выбросы NO_x уменьшаются, но одновременно снижается и полнота сгорания топлива. Все это, а также уменьшение времени, отводимого на смесеобразование и сгорание, ухудшает показатели топливной экономичности и повышает содержание продуктов неполного сгорания топлива в отработавших газах.

Исходя из необходимости снижения выбросов NO_x и продуктов неполного сгорания топлива с отработавшими газами дизеля при одновременном сохранении или даже улучшении показателей топливной экономичности требования к моменту начала впрыскивания с учетом изменения режимов работы дизеля становятся всё более противоречивыми. Так, для снижения выбросов NO_x необходим более поздний впрыск, который не приводит к

резкому повышению температуры и давления в процессе сгорания. В то же время для повышения полноты сгорания топлива, обеспечивающего низкое содержание продуктов неполного сгорания в отработавших газах и высокие показатели топливной экономичности, необходим ранний впрыск, приводящий к интенсификации сгорания и увеличению продолжительности периода сгорания. Осуществить поздний впрыск топлива для снижения выбросов NO_x в дизеле не сложно, однако чтобы получить удовлетворение других требований (например, экономичности), нужно обеспечить полноту сгорания топлива. Стоит отметить также необходимость оптимальной установки момента начала подачи индивидуально для каждого режима работы дизеля [5; 6; 8;9].

Высокие экономические и экологические показатели современных дизелей не могут быть достигнуты без оптимизации ТПА, параметры которой должны наилучшим образом сочетаться с геометрией камеры сгорания (КС). Параметры впрыскивания и распыливания при определенном типе КС должны обеспечивать оптимальный закон тепловыделения и, как следствие, высокие экологические и экономические показатели дизеля.

В качестве примера на рис. 4. показаны модель камеры сгорания, полученная при проектировании на стадии выбора распылителя (слева), и фотография камеры сгорания после испытаний (справа) для дизеля Д-245е4 [9].

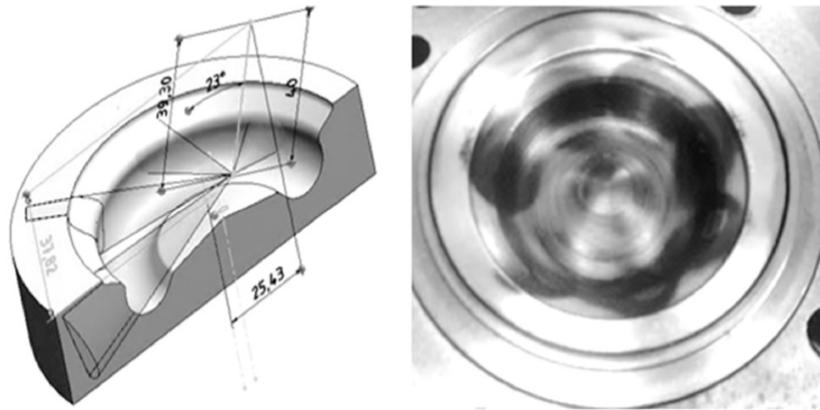


Рис. 4. Камера сгорания Д-245е4 [9]

Через распылитель форсунка впрыскивает в камеру сгорания топливо в мелко-дисперсном виде, влияя тем самым на процесс смесеобразования и, как следствие, на эмиссию токсичных веществ. Для снижения выбросов ОГ необходимо оптимизировать число, размеры и угол раскрытия шатра сопловых отверстий, а также форму струй впрыскиваемого топлива. Определение оптимальной характеристики впрыска является сегодня приоритетным. Все современные дизельные топливоподающие системы имеют возможность управлять формой этой характеристики и разделять дозы впрыскиваемого топлива на несколько частей с регулированием фазового интервала между ними в течение одного цикла.

Многофазный впрыск оказывает важное влияние на экологические и экономические параметры дизеля. Применение пилотного (предварительного) впрыска (впрыскивается сверхмалый объем топлива ($1...3 \text{ мм}^3$) перед подачей основной дозы топлива) позволяет снизить период задержки воспламенения. В течение пилотного впрыска протекают предпламенные химические реакции, а видимое сгорание отсутствует. При отсутствии предварительного впрыска воспламенение в цилиндре происходит с большей задержкой и поступившее топливо во всем объеме камеры сгорания воспламеняется одновременно во многих местах. Такой рабочий процесс имеет повышенное содержание NO_x в отработавших газах. Поэтому снижение задержки воспламенения с помощью предварительного

впрыска ведёт к тому, что тепловыделение в фазе быстрого сгорания происходит более плавно, по мере поступления топлива в цилиндр. Подбором оптимальных параметров предварительного впрыска на большинстве режимов можно заметно снизить содержание NO_x в отработавших газах и уровень шума дизеля, не ухудшив при этом его топливную экономичность [9].

В современных дизелях многофазная характеристика впрыскивания может включать от 4 до 6 фаз впрыска топлива, а в опытных образцах – до 12 фаз за один рабочий цикл.

На многофазной характеристике впрыска можно выделить следующие характерные участки (рис. 5):

1. Ранний (первый) предварительный впрыск сверхмалых объёмов топлива для снижения периода задержки воспламенения, уровня шума и выбросов NO_x . Осуществляется в диапазоне от 90° до 10° перед ВМТ.

2. Поздний (ближний) предварительный впрыск малой дозы топлива для снижения эмиссии токсичных компонентов ОГ и уменьшения шума процесса сгорания. Момент впрыскивания этой дозы - от 40° перед ВМТ до 0° .

3. Основной впрыск. Подача основной дозы топлива происходит в пределе 36° поворота коленчатого вала. Момент начала основного впрыскивания – в диапазоне от 25° перед ВМТ до 15° после ВМТ.

4. Короткое интенсивное (ближнее) поствпрыскивание для интенсификации окисления продуктов неполного сгорания топлива на завершающих стадиях рабочего процесса в цилиндре, а также в окислительном нейтрализаторе. Момент начала впрыскивания устанавливается в диапазоне $50 \dots 75^\circ$ после ВМТ.

5. Поздний подвпрыск (на такте выпуска) для повышения рабочей температуры каталитического нейтрализатора [7]. Он осуществляется через $120 \dots 220^\circ$ после ВМТ. Проблема организации данного подвпрыска топлива заключается в его малой дозе, что накладывает ограничения на систему управления дизелем в целом. Поздний подвпрыск периодически применяется также для очистки (выжигания сажи) сажевого фильтра.

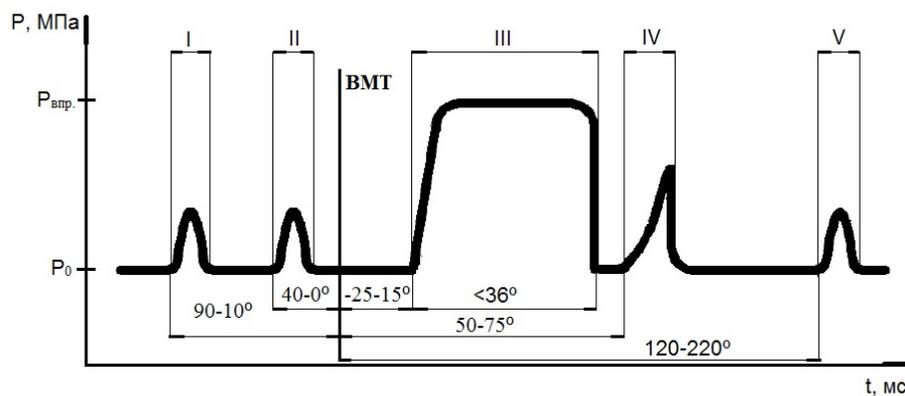


Рис. 5. Многофазная характеристика впрыскивания:
 I - раннее предварительное впрыскивание; II - ближнее предварительное впрыскивание; III - основное впрыскивание;
 IV - ближний подвпрыск; V - поздний подвпрыск

Применение многофазного процесса топливоподачи позволяет снизить образование оксидов азота, обеспечить снижение выбросов твердых частиц, несгоревших углеводородов и окиси углерода, а также уменьшает уровень шума от рабочего процесса дизеля.

Для снижения уровня шума и выбросов NO_x необходимо обеспечивать во время начальной фазы основного впрыска форму характеристики топливоподачи (рис. 6), контролируя давление впрыска.

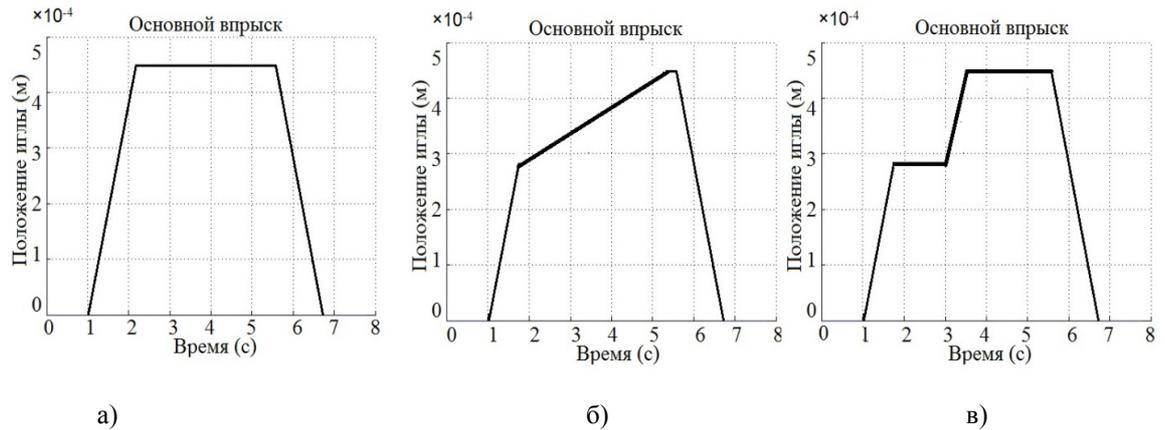


Рис. 6. Форма характеристики топливоподачи: а - прямоугольная; б - трапецеидальная; в - ступенчатая

Все перечисленные методы получили распространение благодаря применению электронно-управляемых систем, выполненных в виде распределительных, многоплунжерных или индивидуальных насосов высокого давления, насос-форсунок с механическим приводом плунжера и электроприводными управляющими клапанами и в виде аккумуляторных систем [2].

Электронно-управляемые системы топливоподачи обеспечивают давления впрыскивания до 140...250 МПа и управление моментом начала впрыска и продолжительностью процесса топливоподачи на различных режимах работы двигателя. Высокие давления впрыскивания позволяют улучшить качество распыливания топлива и снизить выбросы вредных веществ.

Для осуществления оптимизации процессов в топливной аппаратуре дизеля с целью улучшения его экономических и экологических характеристик необходимы:

- повышение максимального давления впрыска в соответствии с ужесточением экологических норм;
- оптимизация управления топливной аппаратурой для каждого режима двигателя;
- применение многофазного впрыска для снижения шума, дожигания органических компонентов и обеспечения работы нейтрализатора;
- гибкое управление углом опережения впрыска в зависимости от режима работы дизеля;
- максимально возможное снижение неравномерности подачи топлива по цилиндрам;
- самодиагностика топливной системы.

Появление аккумуляторной топливной системы в 1997 году позволило частично удовлетворить эти требования благодаря использованию гибкого электронного управления и повышению точности изготовления конструктивных деталей топливной системы. Можно предположить, что в ближайшем десятилетии будет совершенствоваться конструкция современной топливной аппаратуры с целью улучшения экономических и экологических характеристик дизеля.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Нгуен, Х. Х. Оценка эмиссии отработавших газов дизелей эксплуатирующихся судов смешанного (река-море) плавания / Х. Х. Нгуен // Технические науки в России и за рубежом: материалы Междунар. науч. конф. (г. Москва, май 2011 г.). -М.: Ваш полиграфический партнер, 2011.

2. Курманов, В.В. Дизельная топливная аппаратура нового поколения для обеспечения экологических норм / В.В. Курманов, М.В. Мазинг // Автомобили и двигатели: сб. науч. тр. - М. : НАМИ, 2006. - Вып. 236. -С.62-68.
3. Иващенко, Н.А. Моделирование процессов топливоподачи и проектирование топливной аппаратуры дизелей: учеб. пособие / Н.А. Иващенко, В.Л. Вагнер, Л.В. Грехов. - Барнаул – М.: АлГТУ, 2002. – 165 с.
4. Анализ технического уровня и тенденций развития ДВС / под ред. Р.И. Давтяна. - М., 1998. - 92 с.
5. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура и системы управления дизелей: учеб. для вузов / Л.В. Грехов, Н.А. Иващенко, В.А. Марков. - 2-е изд. - М.: Легион-Автодата, 2005. — 344 с.
6. Мазинг, М.В. Дизельные аккумуляторные топливные системы нового поколения типа «Common Rail» / М.В. Мазинг, Ф.И. Пинский, О.В. Олисевиц // Мобильная техника. – 2004. - №1. - С.31-36.
7. Грехов, Л.В. Топливная аппаратура дизелей с электронным управлением: учеб.-практ. пособие / Л.В. Грехов. -М.: Легион-Автодата, 2003. -176 с.
8. Обеспечение малотоксичного рабочего процесса. - <http://www.science-education.ru/111-10237>.
9. Обеспечение экологических показателей уровня Евро-4 и Евро-5 на автомобильных дизелях Минского моторного завода. - <http://podelise.ru/docs/89101/index-104.html>.

Материал поступил в редколлегию 06.03.14.