

УДК 621.43

**О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров**  
**НОВЫЕ ВОПРОСЫ ПЕРЕВОДА НА ГАЗ**  
**АВТОМОБИЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева*

В статье рассмотрена экономическая и экологическая целесообразность эксплуатации автомобилей на газообразном топливе, отражены ключевые вопросы, учитываемые при переоборудовании, представлены причины интенсивного изнашивания отдельных узлов при переводе двигателя на газообразное топливо. Продемонстрированы основные конструктивные решения, позволяющие обеспечить двигателю необходимый ресурс.

**Ключевые слова:** система газоподачи, сжиженный нефтяной газ, компримированный природный газ, клапан, седло, изнашивание, стеллит, микросварка.

В настоящее время нет особых сомнений в том, что газообразное топливо на автомобильном транспорте является сырьевой альтернативой традиционному жидкому углеводородному топливу способной облегчить бремя токсичных выбросов, угрожающих крупным городам. Произойдет это не за счет мифического чистого сгорания природного или иного газа по сравнению, например, с бензином. Эффект будет достигнут за счет уменьшения числа автомобилей с дизельными двигателями. В свое время дизелизация автотранспорта мотивировалась большей эксплуатационной экономичностью дизельной силовой установки, особенно в странах, зависящих от импорта нефти. Например, в Великобритании в 2014 году 50% всех новых легковых автомобилей были дизельными. В Италии автопарк дизельный на 54%, в среднем по Европе – на 70%. Снижение эксплуатационного расхода по сравнению с бензиновым автомобилем хотя бы на 10% приводит к колоссальному снижению абсолютных расходов топлива в масштабах страны.

По разным оценкам, в наши дни за счет сжигания природного топлива в атмосферу поступает около 5...7 млрд. т углекислого газа (CO<sub>2</sub>). Наряду с другими газами, находящимися в атмосфере – водяной пар, метан, закись азота и т.д. – углекислота прозрачна для видимых лучей, но активно поглощает лучи инфракрасные, удерживая тем самым в атмосфере часть тепла. Все это якобы должно привести к «глобальному потеплению» – росту температуры на всей земной поверхности. Понятно, что снижение выбросов CO<sub>2</sub> возможно только за счет снижения расхода топлива. В данной ситуации, прежде всего, хочется обратить внимание на то, что ученые (а с их подачи – и журналисты), как и в случае с «озоновой дырой», систематически преувеличивают опасности недоказанного пока глобального потепления. При этом в 2012 году Всемирная организация здравоохранения уже перевела отработавшие газы дизелей в самую тяжелую, первую, группу канцерогенов – наравне с плутонием и соединениями мышьяка. По мнению врачей, отработавшие газы дизелей причастны к 420 000 тех преждевременных смертей, что ежегодно случаются в Европе. Дальнейшее ужесточение норм токсичности привело к тому, что дизели стали неоправданно сложными и дорогими из-за применения громоздких систем очистки отработавших газов, в частности, нейтрализаторов с использованием мочевины. А недавний скандал с группой Фольксваген показал, какие способы «снижения» токсичности становятся употребительными в автомобильном мире.

В результате намечается мировая тенденция использования на больших двигателях, например, автобусов традиционно оборудованных дизельными двигателями, газовых топлив. Многие заводы создают автомобили, работающие только на газообразном топливе (монотопливные). Не падает также и стремление потребителей к переоборудованию на питание газом бензиновых двигателей, прежде всего в сфере легких коммерческих

грузовиков, что связано с постоянным увеличением абсолютной разницы стоимостей газа и бензина. В качестве критерия экономической целесообразности перехода на газ, можно использовать период окупаемости газобаллонного оборудования. Пробег  $L$  (км), в течение которого возможна полная окупаемость оборудования, определяется по формуле:

$$L = 100 \cdot C_{\text{ГБО}} / (G_6(C_6 - k C_T)),$$

где  $C_{\text{ГБО}}$  – стоимость ГБО с установкой, руб;  
 $G_6$  – расход бензина в литрах на 100 км пробега;  
 $C_6$  – стоимость бензина, руб;  
 $C_T$  – стоимость газа, руб;  
 $k$  – коэффициент, учитывающий увеличение расхода газа по сравнению с бензином.

В зависимости от качества настройки системы газоподдачи для сжиженного нефтяного газа (СНГ)  $k = 1,25 \dots 1,45$ . Худшие значения ушли в прошлое с появлением электронных систем впрыска газа. При ценах сегодняшнего дня окупаемость ГБО в России примерно 30000 км. Далее эксплуатация автомобиля, работающего на СНГ, приносит прибыль около 14 рублей на каждый литр потенциально израсходованного бензина. Для компримированного (сжатого) природного газа (КПГ) окупаемость чуть больше, а прибыль на литр бензина около 25 рублей.

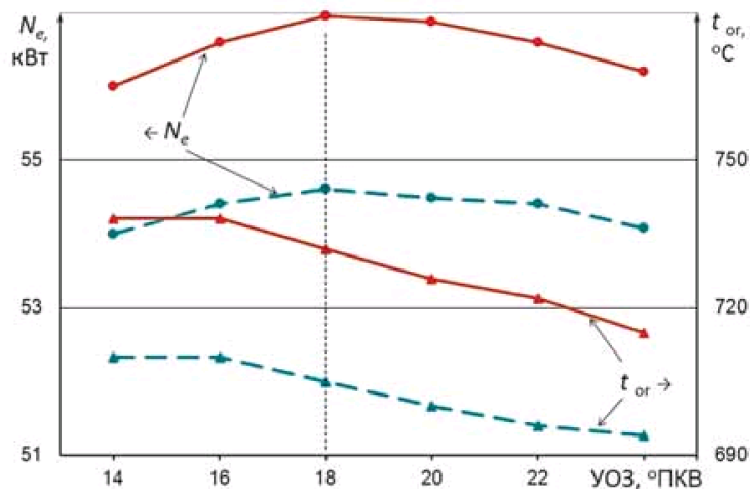
При таких оптимистичных экономических показателях многие, однако, избегают переоборудования своих автомобилей на газ из-за проблем, связанных с резким снижением ресурса двигателя. В действительности ресурс цилиндро-поршневой группы при работе на газе увеличивается почти вдвое. Это доказано многочисленными испытаниями газобаллонных автомобилей. Бензин, затекая в цилиндры не испаренным до конца, смывает с его стенок масляную пленку, заставляя поршневую группу работать в условиях полусухого трения. Поступление же газа всегда происходит в паровой фазе, что, несомненно, способствует долговечности. Второй момент, тесно связанный с первым, продление сроков службы моторных масел. Масло не разжижается ни самим бензином, ни продуктами его разложения, следовательно, выполняет свои функции дольше. Однако, остается вторая проблема – ускоренный износ пары «седло-клапан». Эта проблема проявляется тем ярче, чем выше форсирование по среднему эффективному давлению (что стало актуально в последнее время), принципиально не позволяет газифицировать некоторые типы двигателей (существуют специальные списки) и усугубляется при непрофессиональных настройках газобаллонного оборудования. Самое распространенное заблуждение, относительно интенсивности износа седел и клапанов газовых двигателей заключается в том, что при работе на газовом топливе детали двигателя якобы нагреваются сильнее, чем на бензине. На самом деле теплотворность газозвушной смеси (не путать с теплотворностью топлива) составляет не более 97% от теплотворности бензовоздушной (табл. 1). Невозможно ожидать большего количества теплоты от продукта с меньшей энергетикой. Даже с учетом охлаждающего эффекта, возникающего при испарении жидкого бензина и незначительно отбирающего тепло от деталей, перевес в количестве подведенной энергии всегда на стороне бензинов.

**Таблица 1**  
**Теплота сгорания топлив и их стехиометрических смесей с воздухом**

Показатель	Бензин	СНГ	КПГ
Низшая теплота сгорания топлива, МДж/кг	44	46	48
Стехиометрический коэффициент, кг/кг	14,7	15,3	17,3
Теплота сгорания стехиометрической смеси, кДж/м <sup>3</sup>	3600	3500	3250

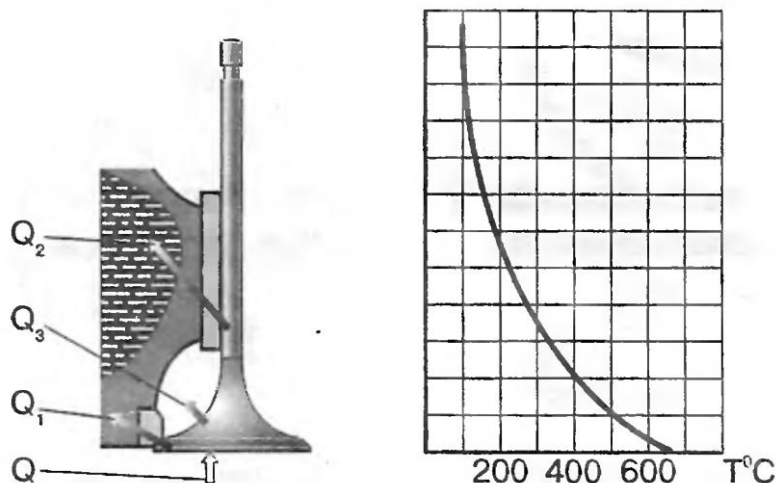
В качестве подтверждения можно привести регулировочные характеристики по углу опережения зажигания, снятые на двигателе ВАЗ 21114 при полной нагрузке,  $n=4000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\alpha=0,91$  (рис. 1). Следует подчеркнуть, что сравнение такого рода правомочно только в составе регулировочных характеристик, поскольку сильно влияние на температуру со

стороны параметров рабочего процесса. Видно, что температура отходящих газов при работе на бензине всегда примерно на 20°С выше, чем на СНГ.



**Рис.1.** Регулировочная характеристика по УОЗ, ВАЗ 21114, полная нагрузка,  $n=4000 \text{ мин}^{-1}$ ,  $\alpha=0,91$ : сплошные линии – бензин, пунктирные – СНГ

Конструктивно клапан имеет две отдельные части: тарелку и стержень клапана. Тарелка клапана (точнее его фаска) опирается на седло (рис.2). Клапаны работают в условиях ударных нагрузок при высоких температурах. Ударные нагрузки возникают в момент открытия (сжатие) и закрытия (растяжение) клапана и являются знакопеременными, т.е. опасными с точки зрения усталостной прочности. При работе двигателя клапаны нагреваются от горячих газов. Выпускной клапан значительную часть времени цикла находится в потоке продуктов сгорания. Большая часть тепла от нагретой тарелки сбрасывается в седло, а меньшая – распространяется выше по стержню и уходит через направляющую втулку.



**Рис. 2.** Тепловые потоки и температуры по длине стержня выпускного клапана:  
 $Q$  – тепло, подведенное к тарелке от горячих газов камеры сгорания;  
 $Q_1$  – тепло, отведенное от тарелки через седло;  $Q_2$  – тепло, отведенное через втулку;  
 $Q_3$  – тепло, отведенное в поток газов

Температура тарелки выпускного клапана достигает 800...900°С, в то время как на конце его стержня наблюдается 150...200°С. Для обеспечения работоспособности клапана его тарелка обязана хорошо контактировать с седлом, причем по определенной площади. Впускной клапан периодически охлаждается холодным воздухом или топливовоздушной

смесью, и его температура существенно ниже (450...500°C). Большинство неисправностей в конструкциях, где тепловой зазор регулируется вручную, возникает из-за неплотной посадки клапана на седло вследствие износа фасок седла и клапана. Постепенное «утопание» клапана в седле уменьшает зазор в механизме привода. Если зазор в холодном состоянии будет недостаточным, то при работе горячий клапан «зависнет», а это приведет к ухудшению теплоотдачи в седло, дополнительному нагреву клапана. Дальше процесс разрушения клапана будет происходить лавинообразно.

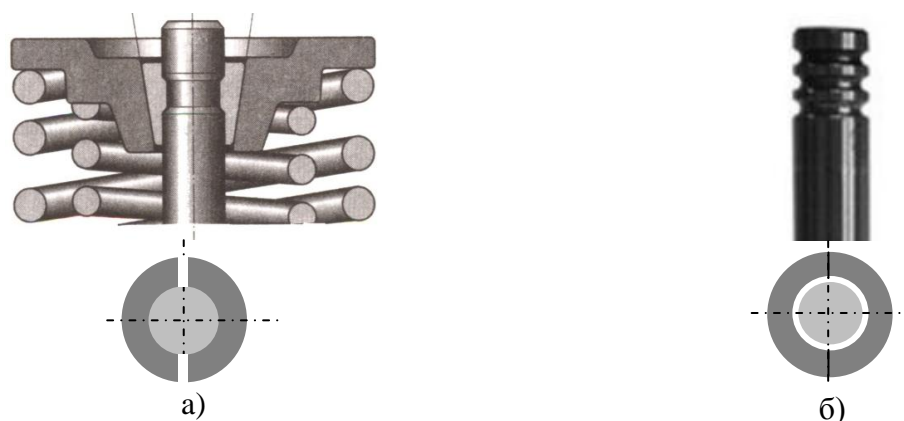
Причины износов пары «седло-клапан» можно разделить на три группы. Следует отметить, что все эти факторы и их совокупное воздействие присутствует при работе двигателя на любом виде топлива.

1. Бринеллирование – разрушение или изменение формы металла фаски клапана и седла в результате удара;
2. Износ – отделение металла при трении, возникающем в результате вращательного движения клапана при его закрывании, вызванное винтовой траекторией перемещения витков пружины клапана;
3. Микросварка поверхностей.

Бринеллирование хорошо демонстрируется работой кузнеца, который, нагревая металл, добивается его пластичности, чтобы сформировать задуманную форму изделия. Чем ближе металл к точке расплавления, тем податливее он становится. Кроме того, скорость изменения формы (текучесть) металла зависит от его свойств. Ключевым фактором, непосредственно влияющим на скорость бринеллирования, является твердость. Чем мягче седла клапанов, тем большую приобретают текучесть, и в большей степени склонны менять свою форму. Скорость бринеллирования увеличится при повышении усилия воздействия на него со стороны клапана. Последнее, в свою очередь, определяется ускорениями посадки клапана (иными словами профилем кулачка) и массой клапана.

Существенно снизить массы (почти вдвое) не утратив иные качества, помогает использование двух клапанов вместо одного. Применение в двигателях трех- и четырех клапанных головок цилиндров не следует рассматривать только как средство увеличения наполнения цилиндра и его очистки. Кроме ударного воздействия клапана на седло, изнашивание наблюдается при взаимном их скольжении при посадке. Винтовые пружины при сжатии скручиваются на определенный угол, и раскручиваются вместе с клапаном при выпрямлении. Когда детали вращаются, они просто теряют металл в зоне контакта, деталь, изготовленная из более мягкого материала, подвержена износу в большей степени.

Надо отметить, что влияние вращения клапана двояко. Многие годы конструкторы стремились создать дополнительные условия для осуществления постоянного вращения клапана, поскольку поворот обеспечивает ему равномерный износ торца, фаски, стержня и седла. Иногда между торцом пружины и головкой блока для выпускных клапанов устанавливали опорный роликовый подшипник. Существовали и конструкции принудительного вращения клапана. Сегодня с этой целью фиксация тарелки пружины на стержне клапана может осуществляться сухарями с несколькими внутренними поясками. Сухари с одним пояском жестко фиксируют клапан с тарелкой, между двумя сухарями хорошо наблюдается зазор по торцам. Сухари с тремя поясками сходятся по окружности, при этом допускают достаточно свободное вращение клапана при частоте вращения 1500...2000 мин<sup>-1</sup>, в то время как в первом случае, поворот клапана возможен при частоте вращения более 3000...3500 мин<sup>-1</sup> (рис. 3).



**Рис. 3. Варианты засухаривания клапанов:**  
**а) жесткая фиксация; б) свободное проворачивание клапана**

Наиболее распространенным решением для предотвращения вращения клапана является установка двух пружин с противоположными спиральями. Поскольку наружная пружина имеет больший диаметр, чем внутренняя, то поворотные силы не могут быть полностью сбалансированы, и клапан будет по-прежнему иметь некоторое вращение, хотя оно будет снижено.

Третья из рассматриваемых причин – микросварка. Любые подобные металлы начинают взаимодействовать друг с другом на молекулярном уровне. Чем дольше они остаются в контакте без взаимного перемещения, чем больше схожи свойства металлов и выше качество очистки их поверхности, тем выше вероятность их сваривания. При последующем разъединении, молекулы сваренных металлов вырываются с их поверхностей, что приводит к повреждению структуры. Далее фаски клапана и седла не могут больше обеспечивать герметичное уплотнение.

Самый простой способ предотвратить или замедлить микросварку – добавление посторонних субстанций на поверхности сопрягаемых деталей. Этой добавкой может быть масло, лак или краски, а также продукты неполного сгорания, образующиеся при сгорании топлива. Надо отметить, что свинец, используемый ранее в составе антидетонационной присадки к бензинам, значительно снижал трение и исключал микросваривание в паре «седло-клапан». После отказа от этилированного бензина во всем мире были проведены работы по подбору новых материалов для этой пары.

В большинстве случаев зависимости для расчёта интенсивности изнашивания строятся с использованием теории подобия на основе теоретико-экспериментальных исследований в виде функции нескольких безразмерных параметров  $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3 \dots$ . Если процесс изнашивания определяется механическим разрушением поверхности, а химические и тепловые процессы не имеют решающего значения, такими факторами являются:

$\Phi_a$  – фактор, характеризующий напряжённое состояние и площадь фактического контакта:  $\Phi_a = f \cdot p / HB$ ,

где:  $p$  – давление;  $f$  – коэффициент трения;  $HB$  – твердость поверхности.

$\Phi_y$  – фактор, характеризующий усталостную прочность поверхности:

$$\Phi_y = \zeta \cdot p / \sigma_0.$$

$\sigma_0$  – предел усталости материала в условиях трения;

$\zeta$  – коэффициент, зависящий от формы контакта;

$\Phi_{ш}$  – фактор, характеризующий влияние шероховатости поверхности.

$$\Phi_{ш} = R_{max} / (r \cdot b^{1/V}),$$

$R_{max}$  – максимальная высота микронеровностей;  $r$  – радиус вершины микронеровности;  $b$  и  $V$  – коэффициенты, характеризующие распределение высот микронеровностей;

$\Phi_{см}$  – фактор, характеризующий влияние толщины смазочного слоя в контакте.

$$\Phi_{см} = \frac{h_0}{\sqrt{R_{a1}^2 + R_{a2}^2}} \text{ или } \Phi_{см} = \frac{h_0}{\sqrt{R_{ск1}^2 + R_{ск2}^2}},$$

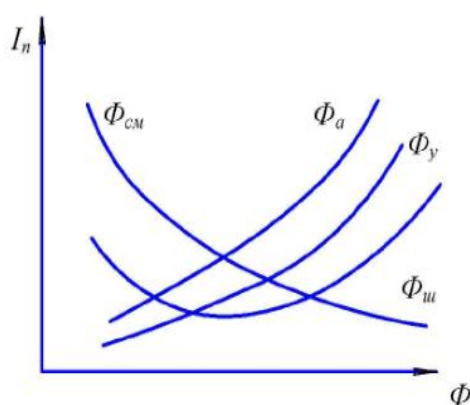
где  $h_0$  – толщина смазочного слоя;  $R_{a1}$  и  $R_{a2}$ ,  $R_{ск1}$  и  $R_{ск2}$  – средние арифметические и средние квадратичные отклонения высот микронеровностей.

В большинстве случаев формула для расчета интенсивности изнашивания имеет вид

$$I_h = K \cdot \Phi_a^{m_1} \cdot \Phi_y^{m_2} \cdot \Phi_{ш}^{m_3} \cdot \Phi_{см}^{m_4}.$$

Здесь константа  $K$  и показатели степени  $m_1$ ,  $m_2$ ,  $m_3$ ,  $m_4$  при различных факторах устанавливаются на основе экспериментов и опыта эксплуатации.

Взаимосвязь факторов, влияющих на процесс изнашивания, представлена на рис. 4. В случае физико-химического воздействия среды, влияния температурных факторов на интенсивность изнашивания могут быть использованы и другие безразмерные величины.



**Рис. 4. Влияние роста различных безразмерных факторов на износ**

По существу, ответ на вопрос, почему двигатели долго и безопасно работающие на бензине, так быстро выходят из строя при переходе на газовое топливо, прост. И бензин, и дизельное топливо сгорают с относительно большим количеством углеродистых отложений выступающих в качестве защитной прослойки между клапаном и седлом. Они «грязные». При работе на газовом топливе износ клапанов будет происходить быстрее просто потому, что оно сгорает гораздо чище. Усугубить износы клапанной пары можно на любом топливе. Например, неправильная регулировка состава топливовоздушной смеси, а именно, обеднение, может приводить к ускорению процесса бринеллирования. Не из-за повышения

температуры сгорания, как ошибочно полагает большинство, а из-за появления в среде отработавших газов свободного кислорода, при высоких температурах окисляющего (выжигающего) металл. Поэтому заданный состав смеси принципиально важно обеспечивать при использовании любого топлива, будь то бензин, сжиженный или сжатый газ.

Обеднение смеси при переводе на газ серийных бензиновых двигателей может быть связано и с недостатками самой системы газоподдачи. Основная проблема при использовании электромагнитных форсунок для подачи газа (особенно сжатого) заключается в том, что они не всегда могут обеспечить требуемые цикловые подачи. Плотность бензина составляет  $740 \text{ кг/м}^3$ , а газов: СНГ при давлении 3 бара –  $7 \text{ кг/м}^3$ ; КПП при давлении 5 бар –  $3,5 \text{ кг/м}^3$ , что соответственно в 100 и 200 раз меньше. Следовательно, в соответствующее количество раз должно быть увеличено или проходное сечение газовой форсунки относительно аналогичной бензиновой, или ее рабочий ход, или давление на входе, или время подачи. Однако резервы увеличения этих параметров ограничены, а, следовательно, возникает вероятность недостачи топлива и обеднения смеси.

К двигателям, которые больше всего подвержены бринеллированию, относятся некоторые представители семейства *Ford*, *Honda*, линейка шестицилиндровых *Jaguar*, все *Subaru* и другие, хотя большинство из них имеют самые высокие показатели качества и надежности. Наиболее критичным является использование в двигателях «мягких» седел клапанов, которые более подвержены бринеллированию и изнашиванию в результате трения. В то же время возникает ситуация, в которой перевод на питание газом определенного типа

двигателей является стратегически важным. В этом случае конструкторам можно посоветовать ряд изменений, способствующих долговечности клапанной пары.

Следует максимально снижать температуру клапанной пары, избегая, по возможности, работы на обедненных смесях с избытком свободного кислорода. Особенно благоприятные условия создаются в двигателях с клапанами, имеющими натриевое наполнение для интенсивного отвода тепла от тарелки клапана к носку. Масса клапана чрезвычайно важна. В двигателях с 3-х или 4-х клапанной схемой, седла в меньшей степени подвержены разрушению, чем в двигателях с двумя клапанами на цилиндр. Однако это имеет эффект только в том случае, если материалы седла и клапана имеют необходимую твердость. Из материалов, которые удовлетворяют требованиям газификации, чаще всего используется стеллит. Можно считать, что при переходе от чугунных седел с твердостью  $HR = 35 \dots 40$  к стеллитовым с твердостью  $HR = 60 \dots 64$ , износ можно снизить почти на 30%.

Кроме того, двигатель с одной спиральной клапанной пружиной пострадает в большей степени, из-за поворота клапана относительно седла, чем двигатель с двумя противоположными спиральными пружинами. Снижение проворачивания позволит уменьшить высоту изношенного слоя, при сохранении интенсивности изнашивания, например для двигателя УАЗ, почти в 3 раза. Это объясняется сокращением пути трения при проворачивании клапана с 4,12 мм до 1,23 мм.

Микросварки можно избежать, по крайней мере, частично, изготавливая тарелку и седло клапана, из металлов, которые являются неодинаковыми. Известно, что чем больше похожи по своим свойствам металлы, тем выше вероятность микросваривания. Кардинальным решением, позволяющим снизить износ, является искусственная подача смазки между фаской клапана и седлом.

#### *Библиографический список*

1. ГОСТ 27674-88. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения
2. ГОСТ 23.224-86. Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей
3. Денисов, А.С. Изнашивание деталей двигателя при переменных режимах [Текст] / А.С. Денисов, В.Н. Басков // Двигателестроение. 1986. №1. С. 10-11.
4. Тихомирова, О.Б. Автомобильные газовые системы топливоподачи / О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров // Известия вузов, сер. «Машиностроение», 2008.– №11, С. 19–25.
5. Тихомирова, О.Б. Разработка систем непрерывной подачи газа для ДВС с искровым зажиганием [Текст] / О.Б. Тихомирова. – дисс... канд. тех. наук. – Нижний Новгород, 2009. –126 с.
6. Тихомирова, О.Б. Анализ современных систем подачи газа в двигатели внутреннего сгорания / О.Б. Тихомирова, А.Н. Тихомиров // Материалы международной научно-технической конференции: АВТО-НН-08 Автомобильный транспорт в XXI веке». – Н. Новгород: НГТУ, 2008. С.48-52.