

ФАЗОВЫЙ РЕГУЛЯТОР СОСТАВА СМЕСИ ДЛЯ ОДНОЦИЛИНДРОВОГО ДВИГАТЕЛЯ

П.В. Абрамов, к.т.н.
ООО «НПП «ИТЭЛМА» г. Владимир

Предложен способ регулирования состава смеси, применимый, в основном, к одноцилиндровым двигателям, и основанный на гармоническом анализе приведенной к оси коленчатого вала кинетической энергии подвижных элементов двигателя и жестко связанных с коленчатым валом потребителя. Приведены результаты экспериментов по выявлению реакции регулятора состава смеси с обратной связью по фазе основной гармоники кинетической энергии, коррелирующей с составом смеси, на возмущение в дозировании топлива. Установлена связь между тепловым состоянием двигателя и параметрами гармоник кинетической энергии. Предложен способ коррекции поддерживаемого регулятором значения фазы основной гармоники кинетической энергии в процессе прогрева двигателя для уменьшения отклонения фактического состава смеси от заданного. Описаны особенности процедуры перехода к регулированию.

Значительное число выпускаемых в настоящее время одноцилиндровых двигателей с принудительным воспламенением работает на богатой смеси во всем диапазоне скоростных и нагрузочных режимов. К таким двигателям относятся, прежде всего, двигатели общего назначения, широко используемые в малой механизации. С одной стороны, работа на заведомо неэкономичном составе смеси, вдобавок дающем повышенные выбросы CO и C_xH_y , обусловлена применением на данных двигателях простейшего карбюратора, не обеспечивающего ни надлежащего дозирования топлива на переходных режимах, ни исключения переобогащения на стационарных режимах при загрязнении дозирующих органов и при прочих отклонениях производственного и эксплуатационного характера. С другой стороны, и, видимо, по этой же причине, для данных двигателей допускается сравнительно высокое содержание CO в выбросах, что стимулирует работу на богатых смесях.

Переход к работе на бедных смесях позволил бы снизить как выбросы всех нормируемых компонентов отработавших газов, так и расход топлива, т. е. выбросы CO_2 . Однако для эффективной работы на обедненных смесях необходимым

условием является сравнительно высокая точность поддержания состава смеси. Несоблюдение этого условия чревато следующими негативными последствиями: резким повышением выбросов NO_x при обогащении состава смеси; повышением межциклового неустойчивости вплоть до пропуска вспышек при обеднении состава смеси; провалом частоты вращения при набросе нагрузки вследствие кратковременного снижения мощности из-за чрезмерного переобогащения смеси при отсутствии точной динамической коррекции топливоподачи.

Добиться управления составом смеси с требуемой точностью возможно лишь путем применения электронных средств, как это делается, например, на автомобильных двигателях или на части одноцилиндровых двигателей транспортного назначения. При этом стоимость доступных сегодня решений сопоставима со стоимостью самого одноцилиндрового двигателя. В то же время возможности карбюраторной системы питания не исчерпаны в отношении одноцилиндровых двигателей. Об этом говорит появление карбюраторов серии TillotsonTCT фирмы «Tillotson». Карбюраторы данной серии сравнительно просто оснастить устройством коррекции состава смеси. Но остается проблема дороговизны и надежности датчиков, в частности, датчика концентрации кислорода в отработавших газах.

Одним из альтернативных источников информации об условиях протекания рабочего процесса является внутрицикловая вариация угловой скорости коленчатого вала (КВ). Теоретическое обоснование существования такой связи можно вывести из уравнения движения КВ, жестко соединенного с валом потребителя, на установленном скоростном режиме в спектральной форме:

$$(S_p + S_{трц}) \otimes S_L + S_{мк} + S_n = p(S_T), \quad (*)$$

где S_p — спектр силы давления газов в цилиндре (разности сил давления газов над и под поршнем); $S_{трц}$ — спектр силы трения в цилиндро-поршневой группе; S_L — спектр плеча действия сил давления газов и трения; $S_{мк}$ — спектр приведенного к оси КВ момента неучтенных в $S_{трц}$ механических потерь; S_n — спектр нагрузки двигателя; символ \otimes — оператор циклической свертки; $p(S_T)$ —

оператор масштабирования и фазового сдвига спектра S_T приведенной к оси КВ кинетической энергии подвижных элементов системы двигатель–потребитель: $kC_{Tk}, \Psi_{Tk} + 180^\circ$ ПКВ, $k = 0, 1/2 \dots N$ (для 4-х тактного цикла). Здесь k — порядок гармоники (период гармоники порядка $1/2$ составляет 720° ПКВ); C_{Tk} и Ψ_{Tk} — соответственно, амплитуда и начальная фаза k -ой гармоники кинетической энергии; N — порядок последней в спектре гармоники.

Из (*) следует, что амплитуда k -ой гармоники кинетической энергии равна $1/k$ амплитуды соответствующей гармоники результирующего момента всех сил, приведенного к оси КВ, а начальная фаза каждой гармоники кинетической энергии отстает от фазы соответствующей гармоники указанного момента на четверть периода цикла. Таким образом, посредством гармонического анализа кинетической энергии можно наблюдать за действием тех или иных факторов на амплитуду и фазу гармоник результирующего момента, которые, в свою очередь, определяются наряду с прочим и параметрами гармоник газовой силы. Теоретически по спектру кинетической энергии можно восстановить индикаторную диаграмму. Но на практике это вряд ли осуществимо в силу уменьшения амплитуды гармоник кинетической энергии пропорционально их порядку, вследствие чего они становятся ненаблюдаемыми.

Экспериментальное подтверждение «отражения» параметров рабочего процесса в вариации угловой скорости КВ можно найти, например, в [1, 2], где установлена связь между параметрами гармоник угловой скорости КВ одноцилиндрового двигателя и нагрузкой двигателя, а также наполнением и составом смеси. Таким образом, посредством анализа внутрициклового вариации угловой скорости КВ можно не только оценить состав смеси, но и построить систему координат для нахождения требуемого его значения (уставки) в зависимости от режима работы. В итоге карбюраторная система питания претерпит минимальные изменения: добавятся корректор подачи топлива и датчик положения КВ, а также электронный блок управления.

В данной работе сделана попытка практического применения ранее выявленных закономерностей в поведении параметров гармоник кинетической энергии для регулирования состава смеси.

Эксперименты проводились на двигателе общего назначения с воздушным охлаждением Honda iGX440 рабочим объемом 0,44 л, оснащенный опытной электронной системой управления топливоподачей, зажиганием и дросселированием. Двигатель нагружался гидротормозом, управля-

емым общим с двигателем электронным блоком. В качестве параметра обратной связи по составу смеси была выбрана фаза основной гармоники (порядка $1/2$) кинетической энергии вращающихся масс двигателя. Моменты инерции тормоза и приводного вала не учитывались в виду их незначительности. За начало отсчета выбрана верхняя мертвая точка такта впуска. Преимущество фазы основной гармоники перед остальными величинами, коррелируемыми с составом смеси, заключается в меньшей зависимости ее от частоты вращения и нагрузки при одном и том же составе смеси. Кроме того, на нее не влияют гармоники момента более высокого порядка, которые могут быть, например, в спектре потребителя.

Для выбранного скоростного и нагрузочного режима было определено значение фазы основной гармоники кинетической энергии, соответствующее заданному составу смеси. Поскольку на данную фазу влияет угол опережения зажигания (УОЗ), то в качестве задаваемого для поддержания значения (уставки) принималась разность указанной фазы и УОЗ. Такое приведение дает приемлемый результат при отклонении УОЗ на $1-2^\circ$ ПКВ от значения, имевшего место при нахождении уставки фазы.

Нагрузочный режим определялся по амплитуде основной гармоники кинетической энергии. Задаваемое значение этой амплитуды поддерживалось тормозом. Частота вращения КВ регулировалась двигателем. Фаза основной гармоники кинетической энергии поддерживалась на заданном уровне интегральным регулятором, выходной коэффициент которого вычислялся следующим образом:

$$k_p = 1 + \sum_i \frac{(\Psi_{1/2 \text{ зад } i} - \Psi_{1/2 \text{ н } i}) \Delta t_i}{\Delta \Psi_{\text{max}} T_i},$$

где $\Psi_{1/2 \text{ зад}}$ — приведенная (нормированная) по УОЗ уставка фазы основной гармоники кинетической энергии; $\Psi_{1/2 \text{ н}} = \Psi_{1/2} - \Theta_3$ — приведенная по УОЗ фаза основной гармоники кинетической энергии, определяемая как разность измеренной фазы $\Psi_{1/2}$ указанной гармоники и УОЗ Θ_3 ; $\Delta \Psi_{\text{max}}$ — максимальное отклонение фазы от уставки, задаваемое для нормирования ошибки регулирования; Δt_i — временной шаг интегрирования (период цикла двигателя); T_i — постоянная времени интегрирования; i — номер цикла двигателя.

Эффективность фазового регулятора состава смеси определялась путем отслеживания его реакции на введение возмущения в расчет уставки циклового расхода топлива на установившемся режиме. Последняя включала две финальных коррекции:

$$G_{\text{тн}} = G_{\text{тн } 0} k_T k_p,$$

где $G_{\text{тн}0}$ — уставка циклового расхода топлива, вычисленная по значению циклового расхода воздуха и заданному составу смеси; k_r — коэффициент коррекции топливopодачи по произвольному закону (собственно возмущение); k_p — коэффициент фазового регулятора состава смеси. В идеале при прочих равных условиях произведение $k_r k_p$ должно оставаться постоянным.

Пример работы фазового регулятора показан на рис. 1. Условия эксперимента следующие: двигатель прогрет; частота n вращения — 2000 об/мин; нагрузка — около 50 %; уставка коэффициента избытка воздуха α — 1,0 (состав смеси может задаваться в широком диапазоне). До возмущения в дозировании топлива произведение коэффициентов коррекции $k_r k_p$ близко к 1 (на начальном участке до момента времени $t = 150$ с среднее значение этого произведения составляет 0,993). При появлении возмущения, вызывающего обеднение смеси, регулятор начинает увеличивать подачу топлива, тем самым нивелируя действие этого возмущения. Поскольку в данном случае постоянная времени интегратора сравнительно велика и составляет 10 с, то в процессе регулирования имеется значительная динамическая ошибка, достигающая 6 %. Но при отсутствии регулирования ошибка составила бы 33 % и осталась бы на этом уровне. С регулятором же по окончании действия обедняющего возмущения ошибка сходит практически на нет — $k_r k_p = 0,987$ (осреднение на интервале от 270 до 390 с). Затем начинает действовать обогащающее возмущение. В ответ на него регулятор начинает уменьшать подачу топлива, но с некоторым запаздыванием, вследствие чего снова появляется значительная динамическая ошибка, порядка 7 %. Если принять предшествующее обогащению состояние за базу

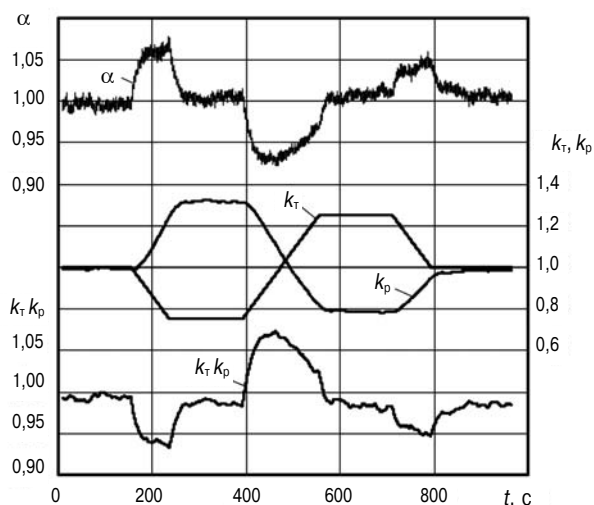


Рис. 1. Реакция фазового регулятора состава смеси на возмущение в дозировании топлива

с $\alpha = 1$, то без регулирования смесь обогатилась бы до $\alpha = 0,6$. По окончании действия очередного возмущения ошибка снова сходит почти на нет — $k_r k_p = 0,983$ (осреднение на интервале от 590 до 720 с). Заключительный этап — возвращение k_r к исходному значению. Регулятор, как и при первом подобном возмущении, противодействует обеднению путем увеличения подачи топлива. По окончании возмущения выход регулятора также приходит практически в исходное состояние. При этом $k_r k_p = 0,984$ (осреднение на интервале от 820 с и до конца записи). За весь рассмотренный процесс наибольшее отклонение $k_r k_p$ от начального значения на тех участках, где выход регулятора и состав смеси стабилизировались, составляет приблизительно 1 %. Настолько же отклоняется и измеренный состав смеси.

Приведенный пример показывает принципиальную возможность создания регулятора состава смеси на основе регулирования фазы основной гармоники кинетической энергии вращающихся масс двигателя. Однако на данную фазу влияет не только состав смеси. В значительной степени влияние оказывает тепловое состояние двигателя, главным образом, через качество смесеобразования, период задержки воспламенения и скорость сгорания. Для установления степени этого влияния был проведен специальный эксперимент. Двигатель прогревался при постоянной частоте вращения без внешней нагрузки и фиксированном составе смеси, обеспечиваемом регулятором на базе широкополосного лямбда-зонда. Результаты эксперимента, полученные при $n = 1500$ об/мин и $\alpha = 1$, представлены на рис. 2. Тепловое состояние двигателя определялось по температуре T_r головки цилиндра, измеряемой штатным датчиком температуры.

Эксперимент показал, что по мере прогрева приведенная по УОЗ фаза основной гармоники

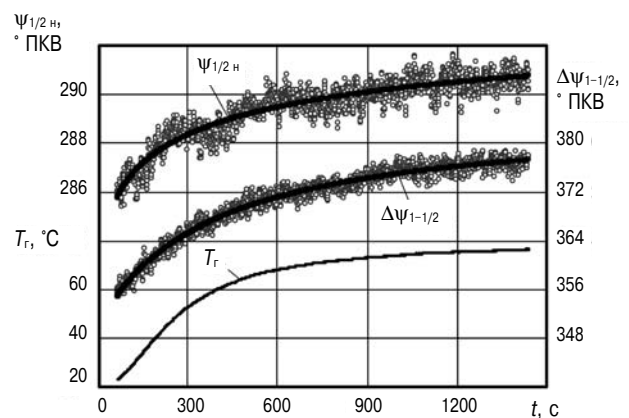


Рис. 2. Изменение фазы основной гармоники и разности фаз первой и основной гармоник кинетической энергии в процессе прогрева двигателя без внешней нагрузки

кинетической энергии ($\Psi_{1/2н}$) возрастает. Следовательно, при поддержании значения данной фазы, соответствующего прогретому состоянию, на холодном двигателе смесь будет переобогащена относительно заданного состава (с уменьшением фаза возрастает вплоть до области мощностного состава [2]). Отсюда вытекает необходимость в температурной коррекции уставки фазы. Такая коррекция возможна на основании закономерности, найденной в процессе анализа поведения параметров гармоник кинетической энергии во время прогрева. Было замечено, что пропорционально температуре двигателя изменяется разность фаз первой и основной гармоник — $\Psi_{1-1/2} = \Psi_1 - \Psi_{1/2}$ (см. рис. 2). На рис. 3 показана зависимость указанной разности от температуры головки цилиндра при различных значениях частоты вращения и коэффициента избытка воздуха. Приведенные данные получены в процессе прогрева без внешней нагрузки с фиксированным УОЗ (свое значение для каждой частоты вращения).

На основании данной закономерности можно построить эмпирическую модель для оценки температуры двигателя и в зависимости от полученной температуры вводить коррекцию. Очевидно, что точность такой оценки не будет высокой, хотя бы вследствие зависимости $\Delta\Psi_{1-1/2}$ от состава смеси — неизвестной величины. Кроме того, структура модели будет сложной ввиду зависимости $\Delta\Psi_{1-1/2}$ от частоты вращения, нагрузки, УОЗ, возможно, и других факторов. Да и сама коррекция фазы будет функцией не только температуры. Тем не менее, избежать значительного отклонения состава смеси от заданной величины во время прогрева вполне возможно и при весьма приближенной оценке температуры. Вдобавок в системе управления появляется виртуальный датчик температуры двигателя, что само по себе ценно.

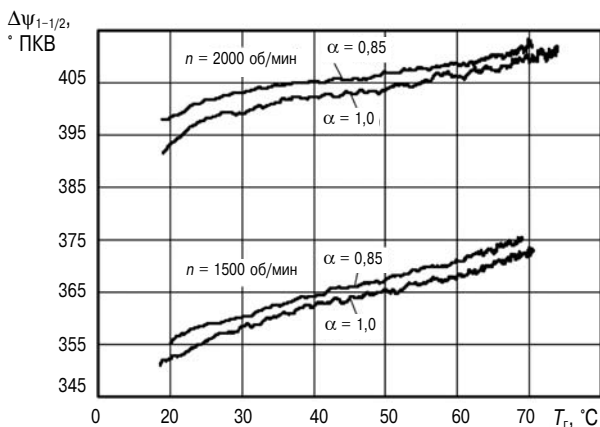


Рис. 3. Зависимость разности фаз первой и основной гармоник кинетической энергии от температуры головки цилиндра при прогреве двигателя без внешней нагрузки

Другой способ нахождения температурной коррекции уставки фазы — сделать величину коррекции частью отклонения $\Delta\Psi_{1-1/2}$ от значения этой разности в прогретом состоянии на соответствующем скоростном и нагрузочном режиме. Это проиллюстрировано на рис. 4, где линия 1 построена по сглаженным данным рис. 2. Аргумент находился путем вычитания из текущей разности $\Delta\Psi_{1-1/2}$ фаз двух первых гармоник кинетической энергии значения этой разности в установившемся тепловом состоянии ($\Delta\Psi_{1-1/2уст}$). Подобным образом находилась зависимая величина: из текущего значения приведенной по УОЗ фазы $\Psi_{1/2н}$ основной гармоники кинетической энергии вычиталось ее значение в установившемся тепловом состоянии ($\Psi_{1/2нуст}$). Полученная зависимость может быть названа потенциалом коррекции уставки фазы, поскольку ей нельзя воспользоваться напрямую для получения величины коррекции, но она задает область, где лежат искомые значения коррекции, дающие в итоге требуемый состав смеси. Данное обстоятельство обусловлено тем, что в ходе прогрева уменьшаются механические потери в двигателе, и это приводит к уменьшению индикаторного крутящего момента, а вслед за ним и к уменьшению амплитуды основной гармоники кинетической энергии. При прочих равных условиях с уменьшением амплитуды фаза этой гармоники, соответствующая одному и тому же составу смеси, увеличивается. Поэтому в непрогретом состоянии уставка фазы должна быть меньше не только из-за более низкой температуры, но и по причине более высокой внутренней нагрузки двигателя. Вследствие этого для рассматриваемого примера необходимая коррекция уставки фазы будет лежать выше линии 1 (см. рис. 4). При минимальном значении аргумента смещение составит примерно $1,5^\circ$ ПКВ и сойдет на нет при нулевом значении.

Результаты эксперимента по подбору величины коррекции уставки фазы представлены на рис. 5.

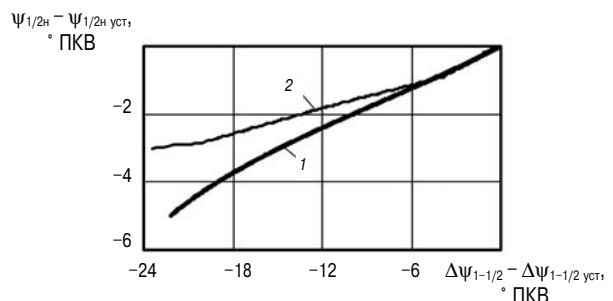


Рис. 4. Зависимость коррекции уставки фазы основной гармоники кинетической энергии от отклонения разности фаз первой и основной гармоник кинетической энергии от значения этой разности в прогретом состоянии

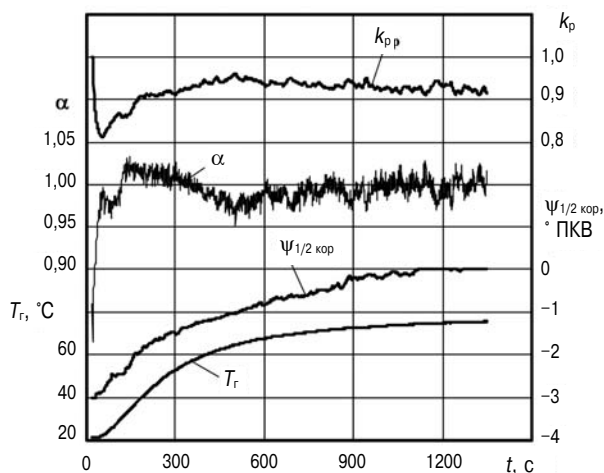


Рис. 5. Изменение выхода регулятора, состава смеси и коррекции уставки фазы основной гармоники кинетической энергии в процессе прогрева двигателя без внешней нагрузки

Двигатель работал при тех же условиях, что и в эксперименте, результаты которого приведены на рис. 2. С учетом сделанных выше выводов коррекция уменьшена относительно ее предела — линия 2 на рис. 4. Причем для более холодного состояния уменьшение сделано в большей степени с целью получения более богатой смеси по сравнению с заданным составом для обеспечения устойчивой работы двигателя в самом начале прогрева.

Важным обстоятельством является то, что продолжительность действия коррекции определяется автоматически, без термометрирования, и в соответствии с тепловым состоянием двигателя. При приближении к установившемуся температурному режиму коррекция $\Psi_{1/2 \text{ кор}}$ сходит на нет (см. рис. 5).

В целом, принятую коррекцию уставки фазы можно считать удовлетворительной, поскольку в процессе прогрева состав смеси отклоняется от заданного значения не более чем на 3 % (без учета флуктуаций, обусловленных ступенчатым изменением положения дросселя). При отсутствии коррекции отклонение составило бы около 10 % в сторону обогащения смеси.

В заключение следует отметить еще одну особенность данного регулятора. Параметр обратной связи — фаза основной гармоники кинетической энергии — имеет максимум в области мощного состава смеси [2]. Поэтому при старте регулятора в условиях переобогащения смеси относительно мощного состава обратная связь будет положительной. Во избежание этого перед началом регулирования выполняется следующая процедура. Выход k_p регулятора уменьшается с постоянной скоростью до тех пор, пока градиент $\Delta\Psi_{1/2 \text{ н}}$ приведенной по УОЗ фазы

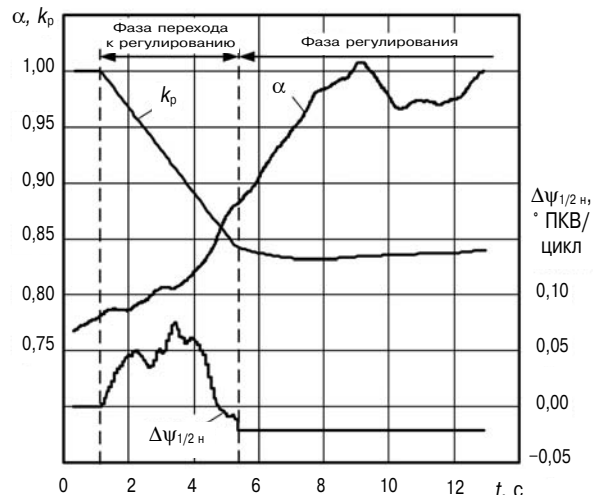


Рис. 6. Выход в область отрицательной обратной связи фазового регулятора состава смеси

основной гармоники кинетической энергии не окажется ниже заданного отрицательного порога (рис. 6). Это обеспечивает переход через экстремум фазы в случае переобогащенной смеси. Если изначально смесь была беднее относительно мощного состава, то градиент фазы сразу будет отрицательным. Следует добавить, что указанное поведение фазы создает предпосылки для разработки экстремального регулятора, поддерживающего мощный состав смеси.

Предложенный регулятор состава смеси не является прецизионным, но обеспечить устойчивую работу двигателя на бедных смесях вне зависимости от внешних и внутренних возмущений он способен даже в представленном весьма несовершенном виде. И никаких дорогостоящих датчиков для этого не потребуется. Приведенный материал в очередной раз свидетельствует о высоком информационном потенциале кинематики одноцилиндрового двигателя для синтеза виртуальных датчиков различного назначения. Наличие корреляции между фазами гармоник кинетической энергии более высокого порядка, в частности 2-го, и составом смеси делает возможным создание подобного регулятора и для двигателей с числом цилиндров до четырех.

Литература

1. Абрамов П.В. Кинематический метод определения нагрузки поршневого двигателя // Двигателестроение. 2006. № 3. С. 27–30.
2. Абрамов П.В. и др. Оценка наполнения и состава смеси в одноцилиндровом двигателе с принудительным воспламенением по внутрицикловой вариации угловой скорости коленчатого вала // Фундаментальные проблемы совершенствования поршневых двигателей: Материалы XII Междунар. науч.-практ. конф. Владим. гос. ун-т. Владимир, 2010. С. 79–86.