

ваемые ею отклонения, как для волновых движений газа в протяженных трубопроводах, так и для практически важных схем ГВТ ДВС.

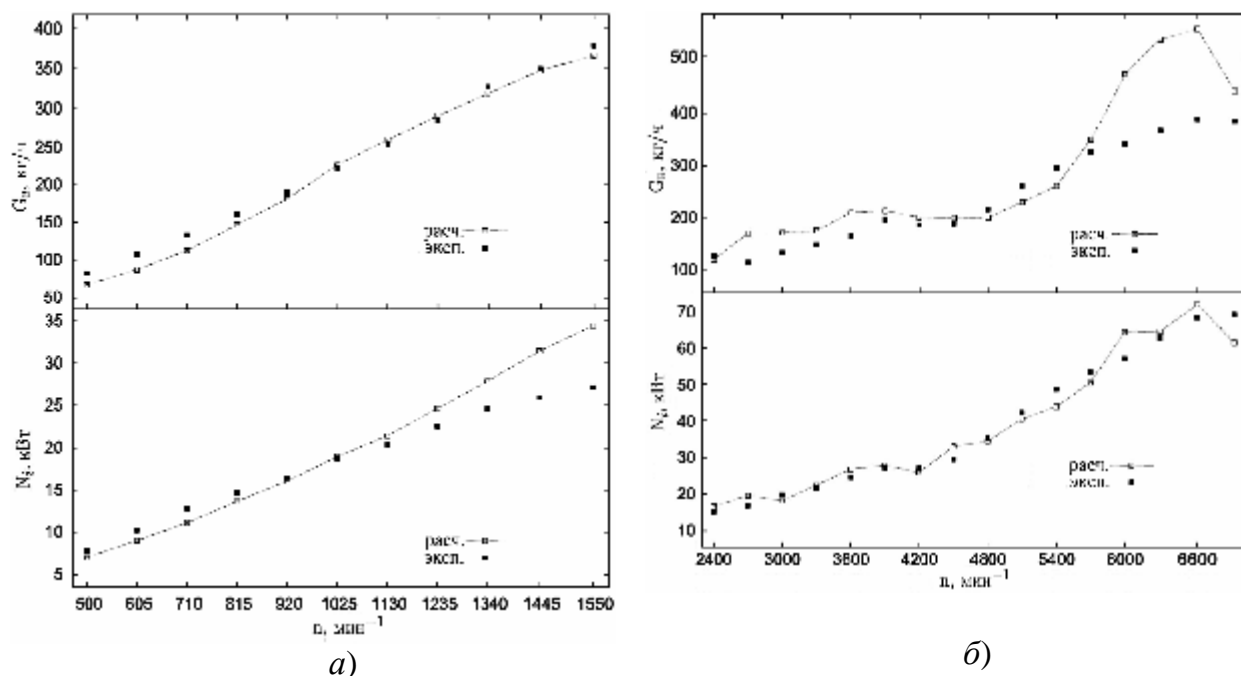


Рис.2. Графики расчетных и измеренных значений расхода воздуха  $N_i(n)$  и индикаторной мощности и  $G_B(n)$  по ВСХ для исследовательских двигателей на базе а) ЯА3-М204А; б) АПД-800.

### Литература:

4. Рудой Б.П. Прикладная нестационарная газовая динамика: учеб. пособие / Уфа: УГАТУ, 1988. – 184 с.
5. Свид. об офиц. рег. программы для ЭВМ № 201063235. Программа для ЭВМ Nonserpower Lab 1D для численного моделирования газообмена и рабочего процесса ДВС / А.А. Черноусов. М.: Роспатент, 2010. Зарег. 17.05.2010 г.
6. Гришин Ю.А., Рудой Б.П. Установка для генерирования уединенных волн конечной амплитуды // Вопр. теории и расч. рабочих процессов тепл. дв-лей: межв. научн. сб. Уфа: УАИ, 1976. Вып. 1. С. 53–55.
7. Черноусов А.А. О достоверности результатов моделирования движения волн конечной амплитуды в длинном неразветвленном трубопроводе с местными сопротивлениями в одномерном приближении // Вестник УГАТУ, Уфа: УГАТУ, 2009. Т. 12. № 1(30). С. 197–210.
8. Черноусов А.А. Экспериментальная проверка модели взаимодействия волн конечной амплитуды с разветвлением канала // Ползуновский Вестник. Барнаул: АлтГТУ, 2006. № 4. С. 182–186.

## ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭНЕРГИИ ТОПЛИВА

Фомин В.М. (МГТУ «МАМИ»)

Исходя из основных положений химической термодинамики, можно утверждать, что исходное топливо путем термохимических превращений (конверсии) может быть преобразовано в новое (искусственное) топливо, переход химической

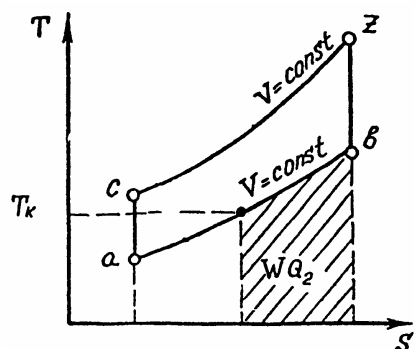
энергии которого в теплоту сопровождается меньшими необратимыми потерями. Впервые научное обоснование этого положения было разработано проф. В. Г. Носачем [1], а его практическая реализация осуществлена применительно к стационарным технологическим системам, использующим в качестве энергоносителя твердое топливо. Поскольку в основе реализации данного способа энергопреобразования топлива лежит процесс его термохимической переработки с использованием отходящей теплоты энергоустановки, он получил наименование *термохимического способа регенерации теплоты*.

Как следует из определения способа термохимической регенерации (ТХР), в рабочем цикле энергоустановки предусматривается два этапа преобразования энергии топлива. На первом этапе исходное топливо подвергается конверсии с использованием теплоты, отводимой из цикла, а уже на втором — конвертированное топливо сжигается на более высоком энергетическом уровне.

Эффективность процесса ТХР в значительной степени зависит от химических свойств исходного топлива. Топливо, используемое для конверсии, должно обладать способностью под воздействием теплоты вступать в целевые реакции конверсии, протекающие с ярко выраженным эндотермическим эффектом. Кроме того, температурные и энергетические возможности ОГ (греющего теплоносителя) должны соответствовать энергетическим затратам, связанным с организацией эндотермического процесса конверсии.

Количественная оценка эффекта энергопреобразования может быть проведена на основе сравнения теплот сгорания исходного топлива и продуктов его конверсии. Например, теплота сгорания метанола равна 19670 кДж/кг; а теплота сгорания газообразных продуктов его конверсии - 23870 кДж/кг. Таким образом, тепловой эффект от сжигания 1 кг продуктов конверсии превышает эффект от сжигания того же количества метанола на 21,4%.

Принципиальная возможность повышения эффективности использования энергии топлива может быть установлена на основе рассмотрения  $T-S$ -диаграммы цикла Отто (рис. 1). На диаграмме теплота, регенерируемая в цикл, выражена как часть отходящей теплоты, то есть степень регенерации равна:  $w = Q_p / Q_2$ , где  $Q_p = M_2 m C_v (T_c - T_k)$  - количество теплоты, регенерируемой в цикл;  $Q_2 = M_2 m C_v (T_c - T_a)$  - теплота, отведенная из цикла;  $M_2$  и  $m C_v$  - количество рабочего тела и его средняя изохорная молярная теплоемкость соответственно.



Нетрудно видеть, что:

$$w = \frac{T_c - T_k}{T_c - T_a} \quad (1)$$

Рис. 1.  $T-S$  - диаграмма цикла Отто с термохимической регенерацией отходящей теплоты.

Как следует из выражения (1), степень регенерации  $w$  зависит от температуры конверсионного процесса  $T_k$  и возрастает с её уменьшением. Современные катализаторы позволяют реализовать процесс конверсии углеводородов при определенных рабочих температурах, например, для метанола не ниже 280...300 °С [2], определяя тем самым минимально возможный температурный предел ОГ ДВС, при котором осуществима организация этого процесса. Решение проблемы более полной

утилизации теплоты ОГ поршневых двигателей связано с перспективой разработки высокоэффективных катализаторов, способных инициировать процессы деструкции (разложения) углеводородных соединений при пониженных температурах теплоносителя (ОГ).

Из приведенного анализа следует, что необратимые внешние потери преобразования химической энергии топлива в теплоту, в случае использования способа ТХР, всегда меньше соответствующих потерь при непосредственном сжигании топлива. Причем, величина уменьшения этих потерь адекватна энергии, которую необходимо затратить на компенсацию эндотермического эффекта реакций конверсии исходного топлива.

Анализ влияние процесса ТХР в термодинамическом цикле со смешанным подводом теплоты позволил установить следующую зависимость (ее вывод здесь не приводится) для определения показателя эффективности использования энергии топлива:

$$h^{ТХР} = 1 - \frac{(1-w) \cdot (I \cdot r^k - 1)}{e^{k-1} [(I-1) + k \cdot I(r-1)] - w(I \cdot r^k - 1)}, \quad (2)$$

где  $I$  – степень изохорного повышения давления;  $r$  – степень изобарного расширения;  $e$  – степень сжатия;  $k$  – показатель адиабаты.

Для цикл Отто с ТХР ( $r=1$ ) выражение (8) приобретает вид:

$$h^{ТХР} = 1 - \frac{(1-w)}{e^{k-1} - w}. \quad (3)$$

Из выражений (2) и (3) видно, что эффективность использования энергии топлива может быть повышена с помощью ТХР при неизменных параметрах самого цикла  $I$ ,  $r$ ,  $e$  (определяющих термический КПД цикла  $\eta_t$ ), то есть, в том числе, и без увеличения тепловой напряженности двигателя.

Следует отметить, что при соответствующей организации термохимического преобразования исходного топлива появляется уникальная возможность регенерации не только тепловой, но и химической составляющей энергии ОГ, которой располагают их продукты неполного сгорания ( $CO$ ,  $CH$  и др.). Такая возможность может быть реализована путём экзотермического доокисления этих продуктов на катализаторе. Выделившаяся при этом теплота способствует росту эффекта ТХР. Практическая реализация подобного способа комплексного регенерирования энергии ОГ (патент РФ 2249807) была осуществлена на основе применения опытного реактора конверсии метанола, конструктивно совмещенного с каталитической камерой для окисления продуктов неполного сгорания двигателя [3].

Оценка уровня энергопреобразования топлива на основе ТХР в условиях реального рабочего процесса поршневого двигателя была проведена в лабораторных условиях на моторном стенде с дизелем типа 4Ч 10,5/12. Термокаталитический реактор конверсии метанола устанавливался в его выпускной системе. Конвертированное топливо (газовая водородосодержащая смесь) из реактора подавалось через впускной трубопровод вместе с воздушным зарядом в рабочее пространство дизеля, где оно воспламенялось «запальной» порцией дизельного топлива (аналог газодизельного двигателя). Установлено, что на номинальном режиме работы расход топлива для исследуемого дизеля снижался на 8,5% по сравнению с его работой без ТХР.

Здесь следует отметить, что улучшение экономических показателей дизеля с ТХР, работающего на смесевом водородосодержащем топливе, обусловлено совокупным влиянием двух факторов: эффектом частичной утилизации теплоты ОГ и

улучшением кинетических показателей процесса сгорания в присутствии  $H_2$  (совершенствованием рабочего процесса). Для выявления доли влияния каждого из указанных факторов проведено дополнительное испытание этого дизеля с использованием реактора, подвод теплоты к которому осуществлялся от автономного источника (электрического подогревателя), то есть без регенерации теплоты ОГ. Установлено, что энергосберегающий эффект для данного дизеля за счет ТХР составлял 4,5%, а за счет совершенствования рабочего процесса - порядка 4%.

Важно отметить, что реализация процесса ТХР одновременно сопровождается улучшением экологических качеств дизеля. В частности, при работе на номинальном режиме содержание сажи в ОГ снижалось на 45 %, оксидов азота на 16 %.

Для оценки энергосберегающего эффекта ТХР в условиях работы ДВС с искровым зажиганием были проведены испытания на моторном стенде двигателя автомобиля АЗЛК-2141, оснащенного реактором конверсии метанола. В качестве основного топлива использовались газообразные продукты конверсии метанола (аналог газового двигателя). Установлено [3], что экономичность ДВС на режиме холостого хода зависит от его скоростного режима. При низких значениях частоты вращения коленчатого вала (от 1000 до 2500  $мин^{-1}$ ), характеризующихся пониженным температурно-энергетическим уровнем ОГ, показатели рабочего цикла практически соответствовали базовому варианту ДВС. Наиболее ощутимое повышение экономичности для данного режима (на 15,5% по сравнению с работой на бензине) наблюдалось в диапазоне частоты вращения вала от 2800 до 3300  $мин^{-1}$ . Это объясняется тем, что в данном диапазоне частоты вращения потребляемая реактором тепловая энергия и располагаемая энергия теплоносителя (ОГ) оказываются практически сопоставимыми.

На режимах внешней скоростной характеристики экономические показатели ДВС с ТХР оказались выше (в среднем на 14%), чем при работе на бензине (без ТХР). Для выявления эффекта ТХР (по аналогии с предыдущим случаем) было проведено дополнительное исследование с использованием газобаллонной системы питания, с помощью которой в цилиндры двигателя подавали синтез – газ, имеющий компонентный состав, аналогичный составу продуктов конверсии метанола: 65% об.  $H_2$  и 35% об.  $CO$ . Очевидно, что при этом эффект регенерации тепловой энергии ОГ не проявлялся. На основе сравнения результатов установлено, что энергосберегающий эффект для данного ДВС за счет эффекта ТХР на режимах внешней скоростной характеристики составил в среднем 4,3%, а максимально – 5,3% при частоте вращения коленчатого вала 3000  $мин^{-1}$ .

Далее была проведена оценка уровня энергосбережения на автомобиле АЗЛК-2141 с бортовым реактором конверсии метанола в ездовых условиях. Испытания проводились согласно регламенту, установленному Государственным ездовым циклом ГОСТ 20306-85, при котором топливная экономичность транспортного средства оценивается расходом топлива на участке его пробега протяженностью 100 км. При испытаниях зарегистрировано улучшение топливной экономичности автомобиля на 15,1% по сравнению с его бензиновым аналогом. Для выявления уровня эффекта регенерации проведены сравнительные испытания этого же автомобиля с ДВС с питанием синтез - газом из автономных баллонов (без проявления регенеративного эффекта). По данным испытания установлено, что повышение экономичности за счёт эффекта регенерации составило 4,8%.

Важно отметить, что при испытании автомобиля с ДВС с ТХР по методике Европейского испытательного цикла New European Driving Cycle обеспечивалось

выполнение автомобилем нормативных требований ЕВРО-3 без применения штатной системы нейтрализации [3].

Применение рассмотренного способа энергопреобразования топлива в транспортных двигателях представляется, априори, весьма перспективным благодаря технической простоте его реализации. В качестве базового двигателя может быть использована любая серийная модель ДВС (в том числе и двигатель, находящийся в эксплуатации). Основным элементом системы термохимического преобразования топлива – каталитический реактор представляет собой простейшую конструкцию теплообменного аппарата, массовые и габаритные характеристики которого (идентичные серийному нейтрализатору) обеспечивают удобство его установки в выпускной системе двигателя.

Важным стимулом дальнейшего развития подобных систем является то, что они обуславливают возможность совокупного совершенствования характеристик ДВС по комплексу показателей. Их реализация, в частности, позволяет снизить расход топлива за счет утилизации энергии ОГ, совершенствовать процессы сгорания, улучшать экологические качества двигателя, обеспечивая при этом возможность замены традиционного нефтяного топлива альтернативным энергоносителем из возобновляемых, в том числе, биологических источников, способствуя, таким образом, решению проблемы ресурсосбережения.

#### **Литература:**

6. Носач В.Г. Методы повышения эффективности использования топлива в технологических процессах // Теплофизика и теплотехника. 1977. № 37. С.44-47.

7. Fomin V.M. and Makunin A.V. Thermo chemical recovery of heat contained in exhaust gases of internal combustion engines (a general approach to the problem of recovery of heat contained in exhaust gases) // Theoretical foundations of chemical engineering. Vol. 43. No5. 2009. P.p.834-840.

8. Фомин В.М., Каменев В.Ф., Хрипач Н.А. Повышение эффективности работы ДВС применением термохимической регенерации теплоты отработавших газов // Проблемы энергоаккумулирования и экологии в машиностроении. Сб.научн.тр. М.: Изд. ИНМАШ РАН, 2003. С. 156-170.

## **ПРОГРАММА ДИЗЕЛЬ-РК: МОДЕЛИРОВАНИЕ И ОПТИМИЗАЦИЯ РАБОЧИХ ПРОЦЕССОВ ДВС**

**Кулешов А.С., Козлов А.В., Фадеев Ю.М., Барченко Ф.Б.**  
(МГТУ им. Н.Э.Баумана);

Разработка программ для моделирования и оптимизации рабочих процессов в ДВС является важной практической задачей, особенно в настоящее время, когда потребность совершенствования двигателей, снижения вредных выбросов становится особенно актуальной. Для решения задач оптимизации поршневых двигателей в МГТУ им. Н.Э.Баумана разработана программа ДИЗЕЛЬ-РК. Программа ДИЗЕЛЬ-РК принадлежит к классу термодинамических программ описывающих замкнутый цикл поршневого двигателя. Она предназначена для расчетов и оптимизации 2- и 4-тактных ДВС с любыми схемами наддува, позволяя рассчитывать следующие типы двигателей: дизели; бензиновые двигатели с искровым зажиганием; газовые с искровым зажиганием, включая предкамерные ДВС. Программа ДИЗЕЛЬ-РК поддерживает все типы продувки 2-тактных ДВС: прямоточно-