



# Научные основы эффективного применения биотоплив в ДВС

В статье изложены научные основы эффективного применения в ДВС биотоплив, как альтернативе моторным топливам; дан анализ причин ухудшения показателей работы ДВС и изложены особенности рабочего цикла ДВС на биотопливах; предложен механизм для обеспечения эффективного сгорания биогазовоздушных смесей.

 In the article the scientific bases of effective application in ICE bio fuels, as to alternative motor fuels are stated; the analysis of the deterioration reasons of factors of ICE work is given and features of the ICE working cycle on bio fuels are stated; the mechanism for maintenance of effective combustion of bio air-gas mixes is offered.

Анализ свойств биогаза, а также других биотоплив как моторных для ДВС традиционной конструкции, показывает, что основные причины недостатков, связанных с их применением вместо бензинов, следующие:

1. Меньшие значения низшей теплоты сгорания биовоздушных смесей, а соответственно, и худшие технико-экономические показатели работы двигателей. При простой замене бензинов биогазом потери мощности  $N_e$  достигают 20-22%, а экономичности — до 25%;

2. Меньшая скорость сгорания биосмесей, а в итоге этого — растягивание процесса сгорания на такт расширения и, как результат, уменьшение  $N_e$  и увеличение удельного эффективного расхода топлива,  $g_e$  (или уменьшение эффективного КПД,  $\eta_e$ );

3. Меньшее массовое наполнение цилиндров свежим зарядом из-за подогревания его при впуске, что также уменьшает  $N_e$  и увеличивает  $g_e$ ;

4. Более высокое значение температуры самовоспламенения, а отсюда затрудненный запуск ДВС, особенно при низких температурах;

5. Худшие антикоррозионные качества, особенно биогаза, а отсюда и меньшая эксплуатационная надежность деталей ДВС из-за значительной части в нем  $SO_2$ .

Вместе с тем биотоплива имеют большее значение октанового числа (у биогаза ОЧ равно 126), что открывает возможность для устранения (частичного или полного) отмеченных выше недостатков.

Основные особенности в протекании рабочего цикла в ДВС на биотопливах, в том числе на биогазе, по сравнению с аналогичными при работе на бензинах, связаны с отличиями в процессах воспла-

менения, смесеобразования и сгорания. Поэтому выбор путей наиболее эффективного использования биотоплив в ДВС должен быть связан с изучением их влияния именно на эти процессы.

## Кинетика воспламенения биогазовых топлив

В связи с тем, что для воспламенения биовоздушной смеси требуется более высокая температура, чем при воспламенении бензовоздушной смеси, необходимо, чтобы энергия искры зажигания была более высокой. Это первая особенность (или различие) в процессе воспламенения биогаза, которая требует иных подходов для обеспечения качественного зажигания.

Вторая особенность зажигания — более характерный одностадийный высокотемпературный механизм воспламенения. При сгорании биотоплив (окислении) происходит объединение цепного и теплового механизмов. Его первая стадия является результатом взаимодействия активизированных искрой молекул топлива и окислителя, во время которого образуются нестойкие промежуточные продукты ( $CO$ ,  $OH$  и др.). Далее действует цепной механизм реакций, более сложный и менее разветвленный, чем при окислении бензовоздушных смесей.

Скорость таких реакций определяется взаимодействием активных



центров во время разветвления и возникновением и исчезновением активных центров при их рекомбинации, разрыве связей или затухании реакций окисления на холодных стенках КС.

С учетом изложенного делаем выводы, что для устойчивого воспламенения биовоздушных смесей необходимо увеличить энергию электрического разряда или применить более эффективный энергетический способ воспламенения смеси, например, путем реализации механизма форкамерно-факельного зажигания.

Изложенный механизм «теплоцепного» зажигания свидетельствует о значительном влиянии температуры на скорость реакции, которая, в свою очередь, приводит к увеличению температуры заряда. Такое взаимное влияние обеспечивает прогрессирующий разогрев горючей смеси и ускорение процесса зажигания. Достижение нуж-

ной температуры в зоне зажигания является необходимым, но недостаточным условием возникновения очага пламени. Чтобы это произошло, следует обеспечить еще и минимально необходимую энергию зажигания. Без этого горение в зоне очага воспламенения может начаться, а дальнейшее распространение пламени по всему объему КС не произойти. Это относится, в первую очередь, к горению биотоплив, у которых температура самовоспламенения высокая. По нашему мнению, на воспламенение влияют как тепловой, так и ионизационный факторы.

Исходя из описанного, процесс воспламенения можно представить таким образом. При зажигании от электрической свечи высокая температура (около  $10^4$ °С) в электрическом разряде между ее электродами быстро снижается из-за теплоотдачи в окружающую горячую смесь и электроды свечи. В результате этого достаточно большой объем горячей смеси может не разогреться до необходимой температуры, и пламя погаснет. Однако, если разогреваемый объем достигнет критического значения  $V_{кр}$ , а его температура  $T$  будет больше  $T_{кр}$ , произойдет дальнейшее распространение пламени. Таким образом, на воспламенение и дальнейшее распространение пламени влияют  $T_{кр}$ ,  $V_{кр}$ , свойства топлива в зоне зажигания и мощность источника зажигания. Критическая энергия зажигания ( $Q_{кр}$ ) связана с нормальной скоростью сгорания ( $U_n$ ) зависимостью:

$$Q_{кр} \sim U_n^{-2,3}$$

В таблице приведены значения  $Q_{кр}$  при  $\alpha$ , соответствующему максимальной скорости распространения пламени  $U_{n\max}$ .

Из приведенных в таблице данных можно сделать вывод, что для устойчивого воспламенения биовоздушных смесей необходимо обеспечить большую энергию, чем при зажигании бензовоздушных и даже газоздушных смесей. Таким источником может быть форкамерно-факельное зажигание.

Продолжительность фазы распространения фронта пламени от

очага воспламенения завершается достижением им наиболее удаленной точки КС и составляет примерно 30-45° п.к.в. Лучшие показатели ДВС можно обеспечить, если эта фаза примерно симметрично располагается относительно ВМТ. Механизм сгорания сложный, поэтому целесообразно рассмотреть его вначале в модельных условиях в ламинарной смеси.

Фактор	Горячая смесь			
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Биогаз	Природный газ
Коэффициент $\alpha$ , соответствующий $U_{n\max}$	0,8	0,9	0,95	0,9
Теплопроводность кДж/см·с·К	0,73	0,73	0,7	0,76 - 0,77
$U_n$ , см/с	320	35	37	40
$Q_{кр}$ , Дж	0,2	0,24	0,25	-
Оч	45 - 90	107 - 120	123 - 126	100 - 110

### Распространение пламени в биогазовой ламинарной смеси

Простейший механизм распространения фронта пламени по КС, заполненной нетурбулизированной биогазовоздушной горючей смесью, состоит в послонном подогреве негоревшей смеси путем теплопроводности и диффузии активных центров из фронта пламени. На наш взгляд, в биогазовых смесях превалирует тепловой фактор, так как развитие цепных реакций, а соответственно, и образование активных центров у газовых топлив и биотоплив ниже, чем у бензинов. Это существенная особенность, определяющая продолжительность процесса сгорания. Подогрев происходит до тех пор, пока температура в негоревшем слое смеси достигнет значения температуры самовоспламенения. На эту температуру влияют условия самовоспламенения, по-этому она не равняется температуре объемного самовоспламенения топливо-воздушной смеси.

Ширина зоны горения мала (десятые доли мм), поэтому в теории сгорания скорость сгорания оценивают по скорости распространения фронта пламени, а к важнейшим физическим константам горячей смеси относят нормальную скорость распространения фронта пламени в ламинарной смеси  $U_n$ . В таблице приведены значения  $U_n$  для разных топлив и значений коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , при которых они достигаются.

Сопоставление показывает, что значения  $U_n$  для разных топлив близки, однако для биогазовых топ-

лив они на 20-25 % меньше, что требует дополнительных мер по интенсификации процессов смесеобразования и сгорания для обеспечения эффективного их сгорания.

Как показывают исследования, наибольшее влияние на  $U_n$  оказывают  $\alpha$ , концентрационные пределы распространения фронта пламени, температура смеси и количество инертных компонентов (для биогаза — CO<sub>2</sub>) в ней. Влияние температуры на  $U_n$  меньше, чем скорость химической реакции, что также подтверждает тезис о том, что  $U_n$  определяется суммарным влиянием теплопроводности и скорости диффузии активных центров из фронта пламени в негоревшую смесь.

### Распространение пламени в биогазовой турбулентной смеси

В КС ДВС топливо-воздушная смесь находится в турбулентном состоянии, для которого характерна изотропность, т.е. наряду с направленным движением заряда в КС происходит и неупорядоченное движение в форме отдельных вихрей, значительно усложняющих процесс.

Анализ многочисленных исследований механизма и скорости турбулентного сгорания  $U_T$  в ДВС позволяет сделать следующие выводы:

- значение  $U_T$  почти на порядок больше  $U_n$ ;
- продолжительность основного сгорания, в основном, зависит от частоты вращения коленчатого вала ДВС,  $n$ , т.е.  $U_n = f(n)$ ; незначительное отклонение от этой зависимости можно компенсировать изменением угла опережения зажигания  $\theta_{з.ж.оп}$ ;
- исходя из первых двух выводов, можно предположить, что на продолжительность основного сгорания незначительно влияют состав смеси и скорость химических реакций.

Однако с первой частью последнего вывода не коррелируются опытные данные по газовым двигателям. На наш взгляд, причиной этого является значительное отставание задней границы фронта пламени от количества сгоревшего



газового топлива. Передняя граница фронта пламени является лишь границей, через которую горящие частицы проникают в несгоревшую смесь. Это подтверждает и анализ кинограмм.

Из этого делаем вывод, что для эффективного сгорания биогаза необходимо, прежде всего, интенсифицировать участок основного сгорания. Экспериментально подтверждено, что при обеднении биосмесей значительно расширяется по сравнению со стехиометрическим составом ширина фронта пламени, замедляя скорость сгорания в начальной стадии. Кроме того, увеличиваются различия в скоростях распространения фронта пламени и зоны выгорания смеси, в результате чего длительность основной фазы растягивается на такт расширения, что приводит к увеличению тепловых потерь, уменьшению мощности  $N_e$  и увеличению удельного эффективного расхода топлива  $g_e$ . При значительном обеднении смеси из-за уменьшения скорости сгорания воз-

растает химическая неполнота сгорания и уменьшается температура сгорания. Оба эти процесса ускоряют друг друга, в результате чего часть заряда не превращается в теплоту, а удаляется из КС ДВС с ОГ, вследствие чего ухудшаются технико-экономические показатели ДВС.

Важными для практического повышения эффективности сгорания биогазовых смесей являются наблюдения, согласно которым зона полного выгорания при обеднении смесей смещается от свечи зажигания к центру КС, что указывает на возможность обеспечения процесса сгорания необходимой эффективности путем выбора вида организации процесса сгорания, например, микрообъемного пульсирующего, характерного для форкамерно-факельного процессов воспламенения и сгорания.

### Выводы

Изложенные научные основы особенностей обеспечения эффективного процесса сгорания био-

газовоздушных топлив позволяют сформулировать требования к выбору наилучшей модели организации процессов смесеобразования и сгорания этих топлив. Намечены механизмы реализации различных моделей процессов смесеобразования и сгорания.

Опыт, накопленный по двигателям, работающим на биогазовых смесях, относительно невелик. Однако из опубликованных работ и приведенного выше анализа следует, что предложенные механизмы интенсификации сгорания могут обеспечить существенное повышение экономичности и снижение вредных выбросов. Очевидно, что это особенно ощутимо для случаев, когда двигатель работает при практически постоянных режимах.

*И. И. Тимченко, к.т.н.*

*Д. И. Тимченко, к.т.н.*

## Вторая международная конференция

# «НОВЕЙШИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ОБОРУДОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЗКИ»

*Одесса, 8-11 июня 2010*

Тематика конференции:

Плазменная, лазерная и газокислородная резка листовых металлов

Подача заявок и рассылка приглашений до 30.05.2010г.

Условия участия и программу конференции смотрите на сайтах оргкомитета.

Организаторы:

ОАО «ЗОНТ»



ООО «Автогенмаш»



Оргкомитет:

ОАО «ЗОНТ», Украина

Тел. +38 - 048 - 717 00 50

Факс +38 - 048 - 715 69 50

Моб +38 - 095 - 289 10 70

E-mail: oaozont@zont.com.ua

Web: www.zont.com.ua

ООО «Автогенмаш», Россия

Тел. +7 - 482 - 232 86 55

Факс +7 - 482 - 232 86 33

Моб. +7 - 910 - 646 25 81

E-mail: autogenmash@yandex.ru

Web: www.autogenmash.ru

Hypertherm

KEMPER

THERMAL DYNAMICS

Kjellberg  
FINSTERWALD

rofin

ENTERCRAFT

TRUMPF

IPG  
BE-Petra