

## ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ПОДАЧИ ВОДЫ В ЦИЛИНДР НА ЭКОНОМИЧНОСТЬ И ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПОКАЗАТЕЛИ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ (по материалам конгресса СИМАС-2007)

Материал подготовили: Л.В. Столярчук, Е.Г. Черновец, А.Ю. Асанов  
Военный инженерно-технический университет

В настоящее время экономические и экологические аспекты эксплуатации двигателей внутреннего сгорания привлекают к себе все более пристальное внимание во всем мире. Одним из возможных способов улучшения экологических показателей дизельного двигателя является организация процесса горения топлива с добавлением воды. Известно, что участие воды в процессе сгорания приводит к снижению эмиссии  $\text{NO}_x$  в результате снижения температуры в локальных очагах горения топлива, а также в ряде случаев позволяет снизить удельный эффективный расход топлива.

Отечественный и мировой опыт применения этой технологии определяет два основных способа подачи воды в цилиндр двигателя для ее использования в процессе горения топлива: через топливную систему двигателя в виде водотопливной эмульсии (ВТЭ) и непосредственный впрыск воды через специальную форсунку.

Не прекращающийся интерес к использованию воды для снижения выбросов  $\text{NO}_x$  и сажи при горении топлива в дизелях демонстрируют посвященные этой теме доклады на последнем международном конгрессе по двигателестроению (СИМАС), который состоялся в Австрии (г. Вена) в 2007 г. В совместном докладе специалистов компании «Mitsubishi» и Токийского университета морских технологий [1] рассмотрен механизм протекания процессов смесеобразования и сгорания ВТЭ, а также проведен анализ влияния качества диспергирования воды в эмульгированном топливе на экономические и экологические показатели двигателя.

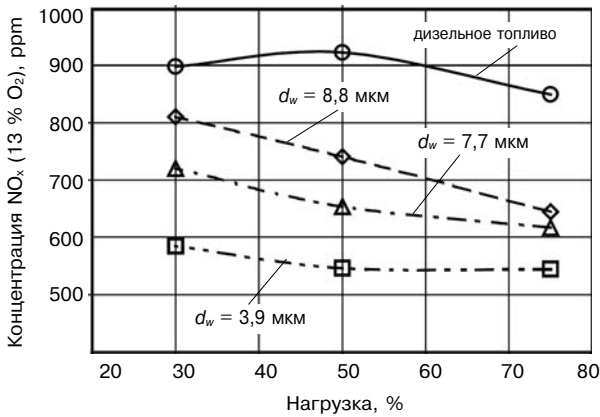
Водотопливная эмульсия представляет собой высокодисперсную смесь топлива и воды, причем вода является дисперсной фазой, а топливо — дисперсионной средой, т. е. мелкие частицы воды равномерно распределены в топливе. ВТЭ приготавливается с помощью специального устройства — диспергатора (гомогенизатора), при этом дисперсная фаза (капли воды) меньше размеров частиц распыливаемого форсункой топлива. Процесс сгорания ВТЭ существенно отличается от сгорания традиционного топлива. Частицы распыленной форсунками ВТЭ при

попадании в область высоких температур быстро разогреваются. При этом давление паров воды превышает силы поверхностного натяжения пленки топлива, что приводит к явлению «микровзрыва», в результате которого топливо распадается на множество более мелких частиц — «вторичный распыл». Наличие «микровзрывов» приводит к турбулизации потоков топлива и воздуха и в совокупности со «вторичным распылом» способствует уменьшению длительности процесса задержки самовоспламенения. Однако снижение температуры смеси в результате нагрева и испарения воды оказывает противоположный эффект. В результате совместного действия данных факторов длительность процесса задержки самовоспламенения увеличивается.

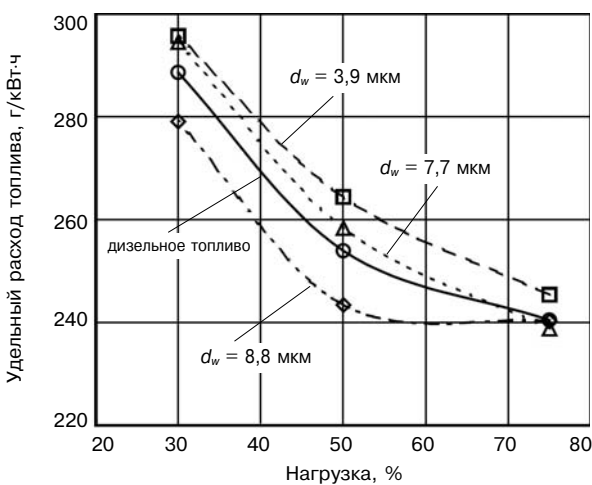
На первом этапе горения ВТЭ обеспечивается более быстрое и полное выгорание легких составляющих топлива. На втором этапе горения, при достижении высокой температуры в цилиндре двигателя, пары воды диссоциируют на активные радикалы  $\text{H}^+$ ,  $\text{OH}^-$ . Эти радикалы, являющиеся активными катализаторами горения углерода, значительно сокращают время горения тяжелых составляющих топлива, в первую очередь сажистых остатков.

Для подтверждения характера горения ВТЭ, детально исследованного авторами доклада, в «горячей бомбе» был произведен эксперимент на четырехтактном дизельном двигателе (73,6 кВт, 1200 об/мин), работающем на ВТЭ и дизельном топливе. Исследования проводились при нагрузках 30, 50, 75 % от номинальной, при различном качестве диспергирования воды в эмульсии. В результате проведенных экспериментов выявлено, что испарение воды в эмульсии снижает общую температуру цикла, увеличивает задержку самовоспламенения, и в ряде случаев позволяет снизить удельный эффективный расход топлива. Причем чем меньше диаметр частицы воды в ВТЭ, тем ниже выбросы  $\text{NO}_x$  (рис. 1), а увеличение диаметра частицы воды приводит к снижению удельного эффективного расхода топлива (рис. 2).

Результатирующим фактором происходящих процессов является то, что суммарная скорость и полнота сгорания вязких топлив в виде ВТЭ



**Рис. 1.** Концентрация  $NO_x$  в зависимости от нагрузки и размера дисперсной фазы  $d_w$  ВТЭ



**Рис. 2.** Изменение удельного расхода топлива в зависимости от нагрузки и размера дисперсной фазы  $d_w$  ВТЭ

в цилиндре двигателя становится примерно равной скорости сгорания легких дизельных топлив. При этом вязкое топливо в виде ВТЭ успевает полностью сгорать даже в цилиндрах высокооборотных дизелей, интенсивность отложения нагаров на деталях цилиндропоршневой группы становится меньше чем на чистом дизельном топливе, в ряде случаев имеет место эффект «самоочистки». Вредного воздействия на детали топливной аппаратуры (по мнению авторов доклада) частицы воды водотопливной эмульсии не оказывают, так как их размеры меньше зазоров в плунжерных парах и распылителях форсунок, кроме того, частицы воды окружены снаружи прочной пленкой топлива, препятствующей непосредственному контакту металла с водой. К недостаткам указанного способа подачи воды в цилиндр стоит отнести ограниченное время существования эмульсии, продолжительность которого пропорциональна стоимости продукта (за счет использования более сложных технологий

и применения более дорогостоящих поверхностно активных веществ).

В докладе фирмы «Mitsubishi» и специалистов университета Киото рассматривается влияние непосредственного впрыска воды через специальную форсунку в цилиндр на процесс сгорания в двигателе в различные моменты рабочего цикла [2].

Вода подается в цилиндр для сокращения образования  $NO_x$  за счет уменьшения общей температуры цикла.

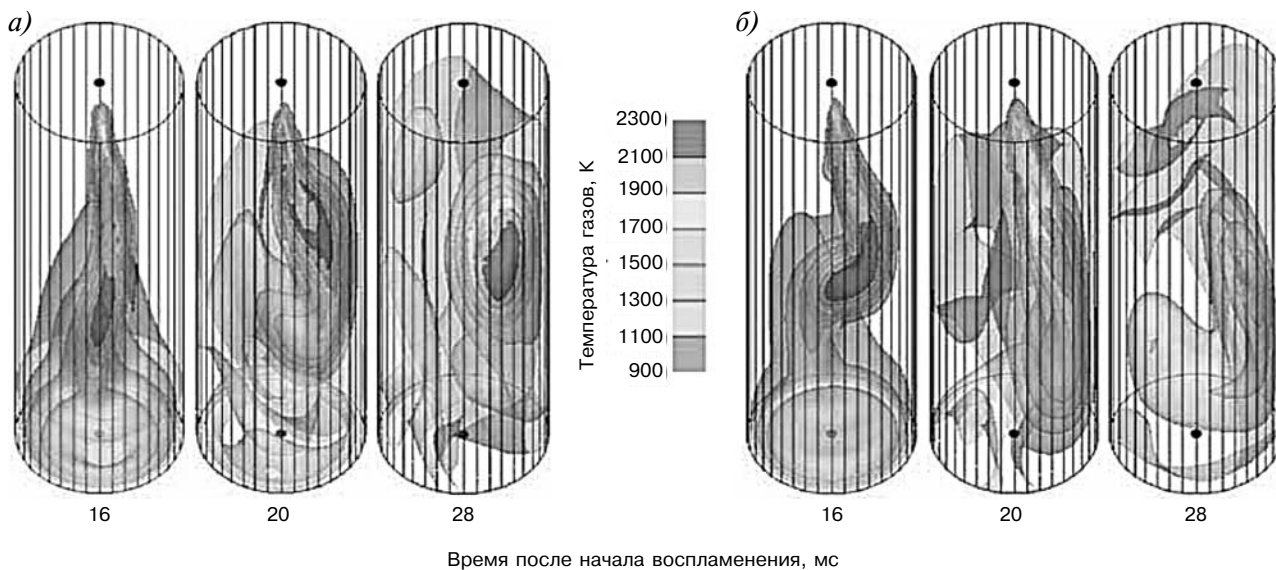
Картина уменьшения температуры цикла при подаче воды представлена на рис. 3.

Впрыск воды в определенный момент периода подачи топлива приводит к качественному и количественному улучшению процесса горения топлива. Предварительно очищенная и подогретая вода через отдельную форсунку впрыскивается в цилиндр двигателя уже после начала процесса горения. От контакта с горящим топливом, раскаленным поршнем и цилиндром, вода вскипает, и расширяющийся пар способствует турбулизации смеси и участвует в процессе получения полезной работы. Несмотря на снижение температуры газов в результате испарения воды, общее давление в цилиндре двигателя не уменьшается. При увеличении мощности возможно увеличить подачу воды в цилиндр, при этом снизить подачу топлива ровно настолько, чтобы от этой замены при существующей нагрузке ощутимо не изменился крутящий момент двигателя. С точки зрения экологии использование пара для совершения работы оправдывается тем, что несколько снижается расход топлива и воздуха.

Для того чтобы за очень короткое время рабочего такта двигателя (1/250 долю секунды) вода успела полностью испариться, необходимо обеспечить требуемое качество распыла, которое достигается за счет значительного давления и применения форсунки с диаметром сопловых отверстий около 0,1 мм. Впрочем, допустимо, чтобы какая-то часть воды переходила в пар уже после выхода из цилиндра с горячими отработавшими газами в выпускном коллекторе. Использование энергии пара в газовой турбине позволит повысить ее мощность и частично решить проблему очистки от сажистых отложений лопаток рабочего колеса.

При работе двигателя с впрыском воды в цилиндры водяной насос, помимо своей надежности, должен, независимо от режима работы ДВС, быстро и точно изменять свою производительность и давление подаваемой им воды. Для этого используется автономная система, действующая по принципу *common rail*.

Помимо прибавки мощности и экономии топлива на 15–20 %, существенно улучшается и



**Рис. 3. Влияние впрыска воды на общую температуру цикла:**

*a* — без впрыска воды; *б* — с впрыском воды

охлаждение двигателя, так как здесь цилиндры охлаждаются водой не столько снаружи, сколько изнутри, т. е. возможно снизить затраты энергии на привод насосов системы охлаждения.

К сожалению, из-за очень сложной настройки и сравнительной дороговизны системы, двигатели с впрыском воды получили распространение только в авиации, автоспорте и любительских автосамоделках (в последнем случае не всегда оправдывают себя). Но достижения современной науки позволяют надеяться, что в скором времени данное техническое решение найдет достойное применение в двигателестроении.

Таким образом, на сегодняшний день наиболее изученным и имеющим необходимые практические наработки способом подачи воды в цилиндр дизельного двигателя является использование эмульгированного топлива. С точки

зрения авторов, для улучшения экологических и экономических параметров дизельных электростанций длительного использования целесообразно включение в их систему топливоснабжения диспергаторов, что позволит осуществить использование ВТЭ непосредственно после ее приготовления. Такой подход позволит использовать положительный эффект от применения ВТЭ и решить проблему ее сохранности.

#### Литература

1. Zhang T., Okada H., Tsukamoto T., Ohe K. Experimental study on water particles action in the combustion of marine four-stroke diesel engine operated with emulsified fuels. Paper № 193, CIMAC 2007, Vienna.
2. Tajima H., Takasaki K., Takaishi T., Murakami S. New applications of direct water injection for marine diesel engines. Paper № 29, CIMAC 2007, Vienna.

#### КОММЕНТАРИИ РЕДАКЦИИ

Теория «микровзрывов» в процессе смесеобразования и горения эмульгированного топлива, которой придерживаются авторы доклада (paper № 29 CIMAC 2007), не подтверждается или во всяком случае не рассматривается как основная с учетом результатов исследований этого процесса специалистами российской научной школы [1, 2]. В результате этих исследований было установлено, что струя эмульгированного топлива при впрыске в сжатый воздушный заряд радикально меняет физические свойства в отношении способности к распаду (распылу) по сравнению со струей дизельного топлива. Это определяется значительным повышением

вязкости ВТЭ, сил поверхностного натяжения на границе раздела фаз воздух–ВТЭ, ростом скорости движения фронта и ядра факела и, как следствие, значительному снижению способности к распаду струи ВТЭ вследствие внутренних турбулентных пульсаций при взаимодействии с воздушным зарядом.

Исследование процесса смесеобразования и горения ВТЭ на установке с прозрачными окнами, действующей по реальному дизельному циклу показано, что основной распад и дробление струи эмульгированного топлива происходит вследствие прямого упругого удара струи ВТЭ о горячую стенку камеры сгорания. При этом

скоростной киносъемкой было зафиксировано, что время достижения стенки камеры сгорания фронтом струи ВТЭ меньше, чем период задержки самовоспламенения, что обусловлено ростом скорости движения фронта факела ВТЭ в 1,6–2,0 раза по сравнению со скоростью движения фронта факела дизельного топлива (до момента достижения стенки факел ВТЭ имеет вид практически не разрушенной струи с незначительной «вуалью»).

Причиной высокой скорости движения фронта факела ВТЭ являются как снижение трения при движении ВТЭ через элементы топливной системы, так и увеличение энергии, затраченной на впрыск эмульгированного топлива, поскольку за одинаковое время через топливную систему прокачивается более вязкая, чем топливо, жидкость, а цикловая подача увеличивается на объем воды, содержащейся в эмульсии. Таким образом «вторичный распыл» вследствие «ми-

кровзрывов», которые вероятно происходят уже после разрушения струи вследствие упругого удара и самовоспламенения ВТЭ, если и имеет место, то не оказывает решающего значения на процесс горения эмульгированного топлива.

Дальнейший характер смесеобразования и развития горения определяется в основном физическими свойствами воды вследствие ее испарения и диссоциации.

#### Литература

1. Новиков Л.А., Борецкий Б.М., Вольская Н.А. Механизм влияния состава водотопливных эмульсий на сажеобразование в дизелях с неразделенными открытыми камерами сгорания // Двигателестроение. — 1966. — № 1. — С. 35–40.
2. Данищikov В.В. Совершенствование процессов получения и сжигания эмульгированного дизельного топлива в высокооборотных дизелях. Дис... канд. тех. наук. — СПб., 1992.

#### НА ДВИГАТЕЛЕСТРОИТЕЛЬНЫХ ЗАВОДАХ РОССИИ

Газомотокомпрессор МКС12 — следующее поколение газомотокомпрессоров 10ГК, выпускаемых ОАО РУМО с 60-х годов XX века. Новые ГК в 2 раза производительнее предыдущих. Область применения ГК достаточна широка. Помимо закачки газа в подземные хранилища, ГК могут применяться на магистральных газопроводах, дожимных компрессорных станциях, газо-нефтеперерабатывающих заводах, холодильных установках, для газлифтной эксплуатации нефтяных скважин, для интенсификации добычи нефти путем закачки газа в нефтяные пласты.

#### ОАО «Звезда» победило во всероссийском конкурсе «100 лучших товаров России»

1.12.08 ОАО «Звезда» признано лауреатом Всероссийского конкурса Программы в номинации «Продукция производственно-технического назначения». Предприятие представило на конкурс один из самых массовых двигателей на российском железнодорожном транспорте М756Б-1.

Конкурс проводится ежегодно, начиная с 1998 г. Федеральным агентством по техническому регулированию и метрологии и межрегиональной общественной организацией «Академия проблем качества» при поддержке Совета Федерации Федерального Собрания Российской Федерации, участия Торгово-промышленной палаты Российской Федерации и Администраций субъектов Российской Федерации.

Конкурс направлен на возрождение традиций качества, поддержку и поощрение лучших отечественных товаропроизводителей, продвижение товаров и услуг российских регионов на национальный и зарубежный рынки.

#### Двигатели ОАО РУМО на страже Родины

10.10.2008 ОАО РУМО осуществило поставку дизель-электрического агрегата 8ДГ22Д1, мощностью 1000 кВт для одного из объектов Министерства обороны на о. Новая Земля. В состав агрегата входит дизельный двигатель 8ЧН22/28 (1052 кВт при 1000 об/мин) и генератор фирмы WEG (1000 кВт, 400 В).

Данный агрегат предназначен для повышения общей мощности энергетического объекта, установлен взамен выработавшего свой моторесурс двигателя. Одним из условий поставки стала специально изготовленная подмоторная рама, которая позволила установить новый агрегат вместо старого на существующий фундамент. Это значительно сократило время замены, снизило финансовые затраты. На данном объекте эксплуатируются еще четыре агрегата марки РУМО (ДГ72М) смонтированные ранее.

Дизель-генератор 8ДГ22Г1, одна из самых современных среднеоборотных установок, разработанная и произведенная ОАО РУМО.

#### Поставка первого газомотокомпрессора МКС12

3.10.2008 г. в г. Баку (Азербайджан) состоялась торжественная заливка первого из пяти фундаментов для газомотокомпрессора МКС12, разработки и производства ОАО РУМО.

Все пять МКС12 будут установлены на станции подземного хранения газа в г. Баку. В настоящее время на этой станции уже работают 4 газомотокомпрессора 10ГК производства ОАО РУМО. Установка новых ГК позволит увеличить мощность станции более чем в 2 раза.