

УДК 621.43.057.3

**ПОПОВ Д.В., к.т.н., доцент; ЧУХАРКИН А.В., ассистент,**  
Донбасская национальная академия строительства и архитектуры, г. Макеевка

## ПЕРСПЕКТИВЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДОТОПЛИВНЫХ СМЕСЕЙ В ДИЗЕЛЯХ

*Одним из способов обеспечения топливной экономичности и снижения токсичности дизельного двигателя является использование воды в качестве добавки к дизельному топливу. Участие воды в рабочем цикле дизеля позволяет уменьшить максимальную температуру цикла, что повлияет на экологические показатели работы двигателя. В статье рассмотрены способы подачи воды в цилиндры, ее влияние на протекание рабочего процесса в цилиндрах, а также на экологические показатели работы дизеля.*

**Ключевые слова:** водотопливная эмульсия, экологические нормы, дизельный двигатель; рабочий цикл дизеля; топливная аппаратура.

Одной из основных проблем мирового дизелестроения является токсичность отработавших газов и снижение расхода топлива.

Постоянный рост цен на топливо приводит к тому, что во многих отраслях промышленности экономия топлива является основной задачей, а законодательные ограничения по выбросам вредных веществ с отработавшими газами в сочетании с этим требуют производить двигатели, соответствующие этим двум требованиям.

В отработавших газах находится около 300 компонентов. По химическим свойствам и характеру воздействия на организм человека эти вещества подразделяются на нетоксичные (азот, кислород, водород, водяные пары, а также диоксид углерода) и токсичные (оксид углерода, оксиды азота, углеводороды, альдегиды, сажа). Токсичные компоненты составляют 0,2...5% от объема отработавших газов в зависимости от типа двигателя и режима его работы.

Основными токсичными веществами отработавших газов дизелей являются оксиды азота  $NO_x$  (в основном,  $NO$  и  $NO_2$ ) и углерода  $CO$ , углеводороды  $C_nH_m$ , сажа  $C$ . Вредность сажи заключается в адсорбции на поверхности ее частиц канцерогенных полициклических углеводородов. В последнее время также учитываются выбросы с отработавшими газами углекислого газа  $CO_2$ . Диоксид углерода не является токсичным веществом, но повышенное его содержание в атмосфере приводит, как считается, к парниковому эффекту.

Наибольшее внимание уделяется выбросам оксида азота и сажи. С точки зрения экологии, вредность воздействия на окружающую среду оксида азота и сажи в 41 раз выше по сравнению с оксидом углерода и в 13 раз выше по сравнению с углеводородами. Так, проектом экологического стандарта *Euro VI*, регулирующего содержание вредных веществ в выхлопных газах, по сравнению с *Euro V* предусмотрено снижение именно  $NO_x$  и твердых частиц (таблица 1). Кроме этого, предусматривается сокращение выбросов углекислого газа до 120 г/км. Это существенно отразится на экологической ситуации и состоянии здоровья человека. Данный стандарт предполагалось ввести в действие в Европе 31 декабря 2013 года, но впоследствии, по заявлениям 27 государств-членов ЕС, его введение было отложено еще на 1 год. Концентрация угарного газа и углеводородов в отработавших газах дизеля сравнительно мало, но побочным эффектом мероприятий по снижению выбросов окислов азота и твердых частиц может быть рост доли этих компонентов.

Одним из способов решения этих проблем является использование смесей традиционного (нефтяного) и альтернативных (газы, спирты, растительные масла и их эфиры) топлив. Значительные результаты по снижению токсичности отработавших газов дизелей получены при использовании топлив с водяными и спиртовыми присадками.

Использование жидких присадок к рабочему телу в цикле ДВС позволяет улучшить смесеобразование, снизить расход топлива и тепловую напряженность, уменьшить нагарообразование, дымность и токсичность отработавших газов и др. Например, введение в цикл воды используется для снижения теплонпряженности, а наличие воды в топливе в виде водотопливной эмульсии (ВТЭ) является средством интенсификации процесса сгорания. Еще одним преимуществом использования водотопливной смеси является возможность применять высокоэффективные водорастворимые присадки к топливу, которые невозможно использовать с обезвоженным топливом, в котором они нестабильны.

Участие воды в процессе испарения снижает максимальную температуру цикла. Это приводит к значительному снижению интенсивности жидкой фазы пиролитических реакций, приводящих к образованию несгоревшего углеродного остатка. Разбавление водяным паром может подавить химические реакции в газовой фазе за счет уменьшения скорости тепловыделения в пламени. Поскольку высокая температура пламени, как правило, является основным источником образования окислов азота, подавление химической реакции приводит к снижению температуры пламени и, следовательно, значительному снижению концентрации  $NO_x$ . Введение воды значительно улучшает смешивание топлива с воздухом, что обеспечивает более полное сгорание, а также сокращает выбросы  $NO_x$  и  $CO$  за счет оптимизации процесса в фазе диффузионного горения. Интенсификация смешивания, вместе с химическим эффектом присутствия воды в реакции горения, приводит к увеличению задержки воспламенения. Это способствует увеличению фазы быстрого горения и уменьшению фазы диффузионного горения.

Вода может быть добавлена к топливу несколькими способами: непосредственным впрыском топлива и воды (отдельными форсунками или одной общей), с помощью стабилизированной водотопливной эмульсии, непрерывным одноточечным впрыском в воздушный поток или периодическим многоточечным впрыском у впускных клапанов.

Водотопливные эмульсии (ВТЭ) представляют собой систему, включающую в себя воду, которая является дисперсной фазой с диаметром капель 0,1...10 мкм, и топливо, являющейся дисперсной средой. Их называют «эмульсии обратного типа» (вода в топливе). Использование их исключает контакт металлических поверхностей топливной аппаратуры и стенок трубопроводов с водой. Водотопливные эмульсии получают в гомогенизаторах и диспергаторах. Важным показателем качества эмульсий является стабильность. Стабильность эмульсий обеспечивается добавкой в нее поверхностно-активных веществ – эмульгаторов. Применение водотопливных эмульсий не требует конструктивных переработок дизеля и позволяет заметно улучшить экологические характеристики двигателей внутреннего сгорания.

Топливные эмульсии получают различными способами, как правило, вне топливной аппаратуры и независимо от нее. Это является значительным недостатком, поскольку оптимальное процентное содержание воды в топливе зависит от режима работы дизеля, а инерционность либо неизменность такой системы приготовления эмульсии не позволяет применять ее для быстроходных двигателей, у которых время изменения режима работы может составлять доли секунды. Состав эмульсии необходимо изменять для холодного запуска и переходных режимов эксплуатации. Снижение температуры ведет к увеличению задержки воспламенения и шума двигателя, поэтому угол опережения впрыска топлива необходимо корректировать при изменении доли воды в эмульсии. Так как чрезмерное снижение температуры в процессе сгорания и

задержка самовоспламенения могут привести к росту концентрации углеводородов в отработавших газах при низких нагрузках на двигатель, чаще всего водотопливные эмульсии содержат не более 12% воды, что недостаточно для достижения оптимальных значений выбросов  $NO_x$  и твердых частиц при высоких нагрузках. Среди мировых производителей дизельных топлив растет интерес к производству стабильных водотопливных эмульсий как стандартного топлива для дизелей, либо производству топлив и воды, способных после смешивания выдерживать состояние эмульсии продолжительное время [1].

Таблица 1

Экологические нормы *Euro V* и *Euro VI*

Норматив	Категория транспортного средства	Контрольная масса, кг или тип цикла	Нормы выбросов					Твердые частицы (PT)	Дымность, $m^{-1}$
			CO	CH	$NO_x$	CH + $NO_x$			
Euro V	$M_1$ полной массой до 2500 кг	–	0,50 г/км	–	0,2 г/км	0,25 г/км	0,005 г/км	–	
	$M_1$ полной массой более 2500 кг и $N_1$	до 1305 включительно	0,50 г/км	–	0,2 г/км	0,25 г/км	0,005 г/км	–	
		от 1305 до 1760 включительно	0,63 г/км	–	0,26 г/км	0,32 г/км	0,005 г/км	–	
		более 1760	0,74 г/км	–	0,31 г/км	0,38 г/км	0,005 г/км	–	
	$M_1$ полной массой более 3500 кг, $M_2, M_3, N_1, N_2, N_3$	циклы ESC и ELR для дизелей	1,5 г/(кВт·ч)	0,46 г/(кВт·ч)	2,0 г/(кВт·ч)	–	0,02 г/(кВт·ч)	0,5	
		цикл ETC для дизелей и газовых двигателей	4,0 г/(кВт·ч)	0,55 <sup>1)</sup> (1,1) <sup>2)</sup> г/(кВт·ч)	2,0 г/(кВт·ч)	–	0,02 г/(кВт·ч)	–	
Euro VI (проект)	$M_1$ полной массой до 2500 кг	–	0,50 г/км	–	0,08 г/км	0,17 г/км	0,005 г/км	–	
	$M_1$ полной массой более 2500 кг и $N_1$	до 1305 включительно	0,50 г/км	–	0,08 г/км	0,17 г/км	0,005 г/км	–	
		от 1305 до 1760 включительно	0,63 г/км	–	0,105 г/км	0,195 г/км	0,005 г/км	–	
		более 1760	0,74 г/км	–	0,125 г/км	0,215 г/км	0,005 г/км	–	
	$M_1$ полной массой более 3500 кг, $M_2, M_3, N_1, N_2, N_3$	циклы ESC и ELR для дизелей	1,5 г/(кВт·ч)	0,46 г/(кВт·ч)	0,5 г/(кВт·ч)	–	0,002 г/(кВт·ч)		
		цикл ETC для дизелей и газовых двигателей	4,0 г/(кВт·ч)	0,55 <sup>1)</sup> (1,1) <sup>2)</sup> г/(кВт·ч)	0,5 г/(кВт·ч)	–	0,003 г/(кВт·ч)		

Примечание: 1 – неметановые углеводороды, 2 – метан, ESC – Европейский цикл постоянных (стационарных) режимов; ELR – Европейская методика соответствия нагрузке; ETC – Европейский цикл переменных режимов.

Касательно протекания процесса сгорания при работе дизеля на ВТЭ существует несколько гипотез. Согласно теории микровзрыва, предложенной В.М. Ивановым [2], в эмульсии, представляющей собой капли воды, находящиеся внутри оболочки дизельного топлива, происходят разрывы капель вследствие того, что из-за различной теплоемкости вода прогревается быстрее и вскипает. Таким образом, увеличивается дисперсность струи за счет дополнительного дробления капель топлива. Согласно второй теории, повышенное содержание паров воды в смеси и продуктах сгорания, действуя как катализатор и, частично разлагаясь на водород, кислород и гидроксильную группу, положительно влияет на процесс и скорость распространения пламени в цилиндре дизеля. Кроме того, молекула воды полярна, что способствует улучшению ориентации разорванных или возбужденных молекул углеводородов и существенно ускоряет процесс окисления. А разложение воды на радикалы в фазе быстрого диффузионного сгорания способствует доокислению осколков молекул углеводородов в фазе догорания.

Качество воды, идущей на приготовление ВТЭ, значительно влияет на износ деталей топливной аппаратуры и цилиндропоршневой группы. Особенно это важно при использовании сернистых сортов дизельных топлив, поскольку водяной пар, образующийся в результате сгорания, взаимодействует с серой, образуя серную и сернистую кислоты на стенках камеры сгорания. Возможно и отложение водорастворимых солей в виде накипи. Поэтому вода ВТЭ должна быть коррозионно неактивной и не иметь солей. Достигается это электрохимической обработкой в электролизере и озонированием.

На данный момент наибольший интерес к использованию топлив в ВТЭ проявляют в судостроительной отрасли.

Впрыск воды в начале сжатия позволяет сжимать в цилиндре двухфазовую смесь (газовая фаза – смесь атмосферного воздуха и остаточных газов и водяной аэрозоль). Впрыск воды в начале процесса сжатия не только снижает максимальную температуру рабочего процесса, но и уменьшает потери работы на сжатие, увеличивая, тем самым, суммарную работу за цикл [3]. Впрыск позволяет сконцентрировать капли воды в объеме камеры сгорания и предотвратить контакт ее со стенками цилиндра и проникновение ее в картер. Появляется возможность регулировать ее долю в заряде.

Теоретические и практические исследования показали [4], что вода и топливо могут быть введены одновременно одной форсункой. При этом конструкцией форсунки может быть предусмотрено предварительное смешивание компонентов в эмульсию внутри форсунки в полости над распылителем. Степень смешения воды с топливом значительного влияния на уровень сокращения выбросов не оказывает.

При подаче воды в воздух на входе в двигатель полное испарение воды происходит еще до попадания воздуха в цилиндр либо в цилиндре во время такта сжатия. При этом сокращаются выбросы  $NO_x$ , но жидкая вода в камере сгорания располагается в этом случае в зонах, где она менее эффективна с точки зрения снижения выбросов, из-за чего требуется примерно в два раза большее (по сравнению со впрыском воды в цилиндр) ее содержание в заряде при тех же экологических показателях [5]. Увеличение доли воды может привести к попаданию ее в моторное масло и увеличению износа двигателя. Как показали эксперименты [6], наибольшее снижение температуры в цилиндре дает именно этот способ.

Впрыскивать воду во впускной коллектор можно и при паровой фазе. При этом, как показывают исследования [7], уменьшаются выбросы  $NO_x$  и сажи, а также удельный расход топлива, и незначительно (до 3%) увеличиваются эффективная мощность и крутящий момент.

С точки зрения уменьшения выбросов окислов азота (до 80%) перспективным видится использование добавки воды совместно с рециркуляцией отработавших газов, хотя в этом случае уменьшаются мощностные и экономические показатели двигателя [7].

Проводятся исследования по впрыску воды в сверхкритическом состоянии [8]. В сверхкритическом состоянии вода ( $\text{scH}_2\text{O}$ ) неограниченно смешивается с кислородом, водородом и углеводородами, облегчая их взаимодействие между собой. Таким образом, в ней очень быстро протекают все реакции окисления. Поскольку параметры критической точки воды – 22,06 МПа и 646,9 К (374°C), а вблизи ее свойства воды изменяются в широких пределах, впрыск производят под давлением 35 МПа, а температуру воды с помощью теплообменника увеличивают отработавшими газами до 400°C и выше.

Независимо от способа подачи воды, концентрация окислов азота и твердых частиц уменьшается значительно, угарного газа – в меньшей степени, углеводородов – может как уменьшаться, так и увеличиваться.

Проводятся исследования [9] по использованию этанола-топливной эмульсии (этанол – 25%, вода – 7%, ДТ – 67,5%, ПАВ – 0,5%). При той же мощности выявлено снижение концентрации окислов азота, окиси углерода, сажи и рост содержания углеводородов и углекислого газа.

Независимо от способа подачи воды, есть необходимость в перестраивании топливной аппаратуры для изменения угла опережения впрыска топлива, оптимальные значения которого определяются экспериментальным путем.

Наибольший интерес к использованию топлив с ВТЭ проявляют пока что судостроители. Для автомобильных двигателей видится перспективным использование впрыска воды с электронным управлением процессом, что требует продолжения исследований в этом направлении.

### Список литературы

1. Nitesh Kumar Singh. Experimental Investigation of Diesel Emulsions as Fuel in Small Direct Injection Compression Ignition Engines. // MIT International Journal of Mechanical Engineering. – 2012. – Vol. 2, No. 1. – P. 39-44.
2. Иванов В.М. Топливные эмульсии. М.: АН СССР. – 1962. – 216 с.
3. Белоусов Е.В., Агеев М.С., Свиридов В.И. Влияние на рабочий процесс среднеоборотного судового дизеля путем впрыскивания воды в рабочий цилиндр. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2010. – №1. – С. 40-43.
4. Christopher J. Chadwell, Philip J. G. Dingle. Effect of Diesel and Water Co-injection with Real-Time Control on Diesel Engine Performance and Emissions. // SAE 2008-01-1190. – 2008. – 12с.
5. F. Bedford and C. Rutland, P. Dittrich, A. Raab and F. Wirbeleit. Effects of Direct Water Injection on DI Diesel Engine Combustion // SAE 2000-01-2938. – 2000. – 10с.
6. N. Samec, R.W. Dibble, J.Y. Chen, A. Pagon. Reduction of NOx and Soot Emission by Water Injection During Combustion in a Diesel Engine // Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress June 12-15, 2000, Seoul, Korea. – F2000A075. – 2000. – 6 pp.
7. Gorkem KOKKULUNK, Adnan PARLAK, Vezir AYHAN, Ddris CESUR. Investigation of Steam Injection with Exhaust Gas Recirculation (EGR) on a Diesel Engine. // Latest Trends in Sustainable and Green Development. – С.41-46.
8. Kuninori ITO, Akihiro YUUKI and Kenichi KOSUGE. On Super Critical Water Diesel. // Proceedings of the 7th International Symposium on Marine Engineering. – Tokyo, October 24th to 28th, 2005. – 8 с.
9. Лиханов В.А., Лопатин О.П. Снижение содержания оксидов азота в отработавших газах дизеля 4Ч 11,0/12,5 путем применения этанола-топливной эмульсии // Транспорт на альтернативном топливе. – 2012. – №4 (28). – С. 70-73.



**Попов Д.В., Чухаркін А.В. Перспективи використання водопаливних сумішей у дизелях**

**Анотація.** Одним зі способів забезпечення паливної економічності й зниження токсичності дизельного двигуна є використання води в якості добавки до дизельного палива. Участь води в робочому циклі дизеля дозволяє зменшити максимальну температуру циклу, що вплине на екологічні показники роботи двигуна. У статті розглянуті способи подачі води в циліндри, її вплив на протікання робочого процесу в циліндрах, а також на екологічні показники роботи дизеля.

**Ключові слова:** водопаливна емульсія, екологічні норми, дизельний двигун, робочий цикл дизеля, паливна апаратура.

**Popov D.V., Chukharkin A.V. Prospects of using water-fuel mixture in diesel engines**

**Abstract.** One way to ensure fuel efficiency and reduce the toxicity of the diesel engine is the use of water as an additive to diesel fuel. Participation of water in working diesel cycle can reduce the maximum temperature of the cycle, which will affect the environmental performance of the engine. The article describes how to water supply in the cylinders, its impact on the course of the working process in the cylinders, as well as the environmental performance of diesel.

**Keywords:** water-fuel emulsions, ecological standarts, diesel engine, duty cycle of the diesel, fuel equipment.

Стаття надійшла до редакції 09.12.2013 р.