

Рис. 4. Увеличение  $g_e$  при переходе на меньший угол опережения впрыска топлива

При уменьшении  $Q_{впр}$  произошло снижение максимального давления газов  $P_z$  до 14,8 МПа с одновременным ростом температуры выпускных газов перед турбиной до 620° С.

### 3. Заключение

1. Разработан комплекс доводочно-конструкторских мероприятий, позволяющий дизелям Д-3040 производства ОАО «ПО АМЗ» соответствовать требованиям ГОСТ Р 41.96-2005 по удельным выбросам вредных веществ.

УДК 621.43.068.7+662.756.3

**И.П. Васильев, канд. техн. наук**

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ РАЗРАБОТКИ КОМПЛЕКСНОЙ СИСТЕМЫ НЕЙТРАЛИЗАЦИИ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ ДИЗЕЛЕЙ ПРИ РАБОТЕ НА АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВАХ

### Введение

Ограниченные запасы на Земном шаре невозобновляемых источников энергии остро ставят проблему поиска альтернативных источников энергии, в частности, возобновляемых и поддерживающих экологическое равновесие. Также произошло стирание граница между традиционными сырьем и продуктами питания. Последние становятся сырьем не только для топливного сектора, но и для химического производства. Так на ЗАО «АЗОТ» (г. Северодонецк) планирует использование в качестве сырья биоэтан-

2. Установлено, что повышение коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  позволяет снизить степень ухудшения показателей дизеля, как по топливной экономичности, так и по эмиссии окислов азота  $NO_x$ , а также по продуктам неполного сгорания –  $CO$  и твердым частицам.

3. Предложен переход к увеличению доли объемного смесеобразования за счет увеличения диаметра камеры сгорания.

### Список литературы:

1. Матиевский Д.Д. Показатели эффективности двигателей внутреннего сгорания и их анализ. - Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2006. - 79 с.
2. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей. - Владимир: Изд-во Владим. гос. ун-та, 2000. - 256 с.
3. Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И., Кислов В.Г. Токсичность отработавших газов дизелей. - Уфа: Изд-во БГАУ, 2000. - 144 с.

нол для производства органических веществ и синтетических полимеров [1]. И этот процесс стал необратимым. Поэтому возникает задача рационального использования сырьевых ресурсов с обеспечением минимального вредного воздействия на окружающую среду и изменения климата.

Поэтому разработка мероприятий по обеспечению все ужесточающихся норм на вредные выбросы становится актуальной и важной практической задачей. Для ее решения необходимо опираться на комплексную оценку эффективности использования

не только топлив растительного происхождения, но и систем нейтрализации [2].

### Формулирование проблемы

При решении вопроса о выборе систем нейтрализации отработавших газов (ОГ) двигателя при работе на альтернативных топливах необходима комплексная оценка, отнесенная к единице мощности за единицу времени [3]. Она должна учитывать стоимости топлива, экологического ущерба от вредных выбросов (ВВ) с ОГ и выбросов «парниковых» газов. При этом следует учитывать изменения характеристик ВВ, вносимых переходом на альтернативные топлива и воздействием систем нейтрализации, использующих нейтрализующие добавки, которые также являются вредными веществами. В этом свете возникают задачи оценки влияния на ВВ с ОГ использования альтернативных топлив и параметров систем нейтрализации.

### Выбросы вредных веществ с ОГ при сгорании альтернативных топлив

Выбросы ВВ зависят от состава топлив, условий смесеобразования, граничных условий сгорания и т. д. Составляющими топлив различных видов являются С - углерод, Н - водород, О - кислород, S-сера, N - азот, P-фосфор. К вредным выбросам относятся NO<sub>x</sub>-оксиды азота; ТЧ- твердые частицы (дымность), СО – оксид углерода, СН - углеводороды, Р - соединения фосфора, S-соединения серы. К «парниковым» газам относятся СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, HFCs, PFCs, и SF<sub>6</sub>. В настоящее время наблюдается ужесточение норм на ВВ с ОГ, которые возможно проследить по данным из таблицы 1 [4].

В табл. 2 представлено изменение качественного состава альтернативных топлив и ВВ по сравнению с ДТ.

Таблица 1. Нормы на вредные выбросы с ОГ дизелей

Нормы	Год введения			Нормы выбросов, г/(кВт·ч)			
	Европа	Россия	Украина	СО	СН <sub>x</sub>	NO <sub>x</sub>	ТЧ
EURO-1	1993	1998		4,5	1,1	8	0,36
EURO-2	1995	1999	01.01.2006	4	1,1	7	0,15
EURO-3	1999	2006		2	0,6	4,5	0,1
EURO-4	2005	2008-2010		1,5	0,5	3,5	0,08
EURO-5	2006-2009	После 2010		1	0,5	2	0,05

Таблица 2. Изменение состава вредных выбросов по сравнению с выбросами при работе на ДТ

Альтернативное топливо	Состав топлива	Изменение вредных выбросов по сравнению с выбросами дизельного топлива	Парниковые газы
Дизельное топливо	С, Н, S	NO <sub>x</sub> , ТЧ, СО, СН, S	СО <sub>2</sub>
Водород	H <sub>2</sub>	При a<0,6 NO <sub>x</sub> ↓, При повышении a NO <sub>x</sub> ↑, N↓, СО↓	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> СО <sub>2</sub> ↓
Природный газ	90% СН <sub>4</sub>	NO <sub>x</sub> ↓, ТЧ↓, СО↓, СН↓, S↓	СО <sub>2</sub> , СН <sub>4</sub>
Спирты	СН <sub>3</sub> ОН С <sub>2</sub> Н <sub>5</sub> ОН	NO <sub>x</sub> ↓, ТЧ↓, СО↑, СН↑, СО <sub>2</sub> ↑	нет
Биоэтанол	С <sub>2</sub> Н <sub>5</sub> ОН	NO <sub>x</sub> ↓, ТЧ↓, СО↑, СН↑, СО <sub>2</sub> ↑	нет
Биодизельное топливо	С, Н, О, S, P	NO <sub>x</sub> ↑, ТЧ↓, СО↓, СН↓, S↓, P↑	нет
Растительные масла	С, Н, О, S, P	NO <sub>x</sub> ↑, ТЧ↓, СО↓, СН↓, S↓, P↑	нет
ЖСТ из угля	С, Н, О, S, N	NO <sub>x</sub> ↓, ТЧ↑, СО↓, СН↓, S↑	СО <sub>2</sub>

Хотя водород является перспективным энергоносителем, но существующие технологии автомобилей на топливных элементах с использованием водорода в качестве топлива далеки от стадии коммерциализации, и в ближайшие 25 лет не следует ожидать существенного сокращения выбросов  $\text{CO}_2$  за счет их использования. Здесь необходимо применение возобновляемых источников энергии [5].

Перспективно использование биомассы. Если сейчас используется биомасса первого поколения в виде растительных масел и биодизельного топлива, то второе поколения связано с получением компонентов моторного топлива из биомассы [6]. К 2050 году доля этого вида энергии только на транспорте составит около 30% [7].

При использовании природного газа наблюдается снижение выделения  $\text{NO}_x$  и ТЧ. Природный газ содержит 90% метана, поэтому в ОГ также содержится этот «парниковый» газ. В случае принятия ограничений по выбросам  $\text{CH}_4$  потребуются использование катализаторов окисления  $\text{CH}_4$  [8].

При использовании ЖСТ наблюдается увеличение дымности ОГ, и снижение выделения  $\text{NO}_x$ .

При использовании спиртов снижаются выбросы  $\text{NO}_x$  примерно на 70% и ТЧ на 40-50% и нет соединений серы. При этом наблюдается рост  $\text{CH}$ ,  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ .

При использовании биодизельного топлива и растительных масел как топлив наблюдается примерно на 10% повышение  $\text{NO}_x$ . При этом можно считать, что выделения  $\text{CO}_2$  нет, поскольку этот газ поглощается масличными растениями в процессе фотосинтеза на полях. При этом дымность снижается до 40%, но дисперсность частиц уменьшается, что является отрицательным фактором [9, 10].

### Системы нейтрализации ОГ

Системы нейтрализации ОГ дизельных двигателей содержат фильтры и каталитические нейтрализаторы. При этом следует учитывать особенности их эксплуатации. Так, когда ограничивают традицион-

ные ВВ, которые обеспечиваются за счет добавки, например, газов восстановителей, то в случае неполадок в системе нейтрализации вредное воздействие может быть выше, чем без системы нейтрализации.

Необходимо учитывать выбросы  $\text{CO}_2$  при разных системах нейтрализации. Например, использование сажевых фильтров, сажа из которых удаляется, имеет меньший уровень выделения  $\text{CO}_2$ , чем у фильтров, на которых происходит ее выжигание с образованием  $\text{CO}_2$  и  $\text{CO}$ .

### Решение проблемы

Возможности снижения вредных выбросов с отработавшими газами за счет рабочего процесса ограничены [11]. Совершенствование внутрицилиндровых процессов также не решает полностью поставленные задачи [12].

На основании рассмотренных материалов выявлено, что все ужесточающие нормы на ВВ с ОГ, нельзя выполнить только совершенствованием рабочего процесса двигателя, а необходимо использование альтернативных топлив и совершенствование систем нейтрализации. Поэтому целью данной работы является разработка комплексной системы оценки по снижению ВВ с ОГ. В этом свете необходимо определить фактическое воздействие указанных факторов на выбросы ВВ с ОГ, что требует создание стенда для исследования различных топлив и снабженного универсальной системой нейтрализации как  $\text{NO}_x$ , так и сажи.

### Экспериментальная установка и результаты исследований

Для исследования процесса селективного восстановления оксидов азота, называемого за рубежом – SCR и AdBlue [13] и обеспечивающего EURO-5, параметров регенерации сажи на катализаторах и определения влияния топлив растительного происхождения на показатели дизеля была модернизирована установка на базе вихрекамерного дизеля 2Ч8,5/11, которая приведена на рис. 1.

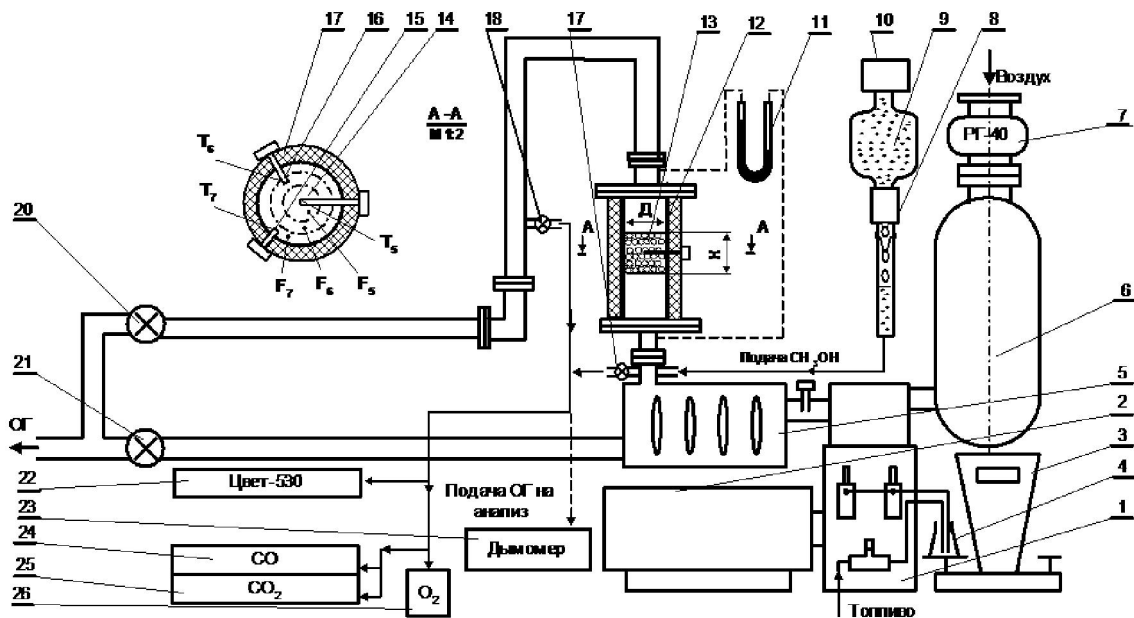


Рис. 1. - Схема установки с дизелем 2 Ч8,5/11

1-дизель; 2-электродвигатель (генератор); 3-весы; 4-мерная колба; 5-нагреватель ОГ; 6-воздушный ресивер; 7-газовый счетчик; 8- расходомер; 9-емкость с аммиакосодержащей жидкостью; 10-компрессор; 11-водяной манометр; 12-реактор; 13-носитель ШН-2; 14, 15, 16-термопары; 17-теплоизоляция; 18, 19-газоотборные краны; 20, 21-перепускные краны; 22-хроматограф "Цвет-530"; 23-дымомер ИДС-1; 24-ГИАМ-15; 25-ГИАМ-14

Наличие нагревателя ОГ позволяет без изменения режима работы двигателя (выделения  $\text{NO}_x$ ) изменять температуру катализатора. На основании исследований с разными катализаторами, при различных объемных скоростях и отношениях  $\text{NH}_3/\text{NO}_x$  было выявлено, что предпочтительный диапазон работы катализатора составляет  $250\text{-}450^\circ\text{C}$  и максимальная эффективность восстановления  $\text{NO}_x$  достигает 90% [14].

Одним из факторов, лимитирующем работу катализаторов является отложение сажи, которая блокирует активные центры каталитических реакций. Выявлено, что в зависимости от сажесодержания в объеме катализатора регенерация может носить как мягкий характер с повышением температуры на  $50\text{-}100^\circ\text{C}$ , так и жесткий с повышением температуры выше  $1350^\circ\text{C}$ , что ведет к выходу из строя нейтрализатора [15].

В результате приведенных исследований был

выявлено, что катализатор восстановления  $\text{NO}_x$  состава  $\text{CuO}:\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}5:5$  обеспечивается начало выгорания сажи с  $200\text{-}250^\circ\text{C}$ . К особенностям этого процесса следует отнести необходимость внутренней диагностики нейтрализатора. На данном двигателе были проведены также исследования по влиянию на показатели двигателя биодизельных топлив и смесей растительных масел с ДТ. Выявлено снижение дымности примерно на 40%, и повышения выделения  $\text{NO}_x$  на 10%.

### Комплексная оценка систем нейтрализации отработавших газов

Комплексной оценкой эффективности систем нейтрализации являются затраты, отнесенные к единице мощности за единицу времени  $\text{грн}/(\text{кВт ч})$  и определяются по формуле:

$$C_{\Sigma} = C_1 + C_2 + C_3 + C_4 + C_5,$$

где  $C_1$  - стоимость топлива, которая определяется как произведение массового расхода топлива на

стоимость 1 кг топлива (грн/(кВт ч));  $C_2$  - суммарный ущерб от выделения  $\text{NO}_x$ , твердых частиц,  $\text{CO}$ ,  $\text{CH}_4$ , которые определяются с учетом массового выброса и показателей агрессивности (грн/(кВт ч));  $C_3$  - ущерб от выделения парниковых газов, в частности,  $\text{CO}_2$ , который определяется как массовый выброс за единицу времени на единицу мощности (грн/(кВт ч)). Стоимость  $\text{CO}_2$  принимается равной 60 евро/т.;  $C_4$  - ущерб от остаточного газавосстановителя после нейтрализатора, например,  $\text{NH}_3$ , показатель относительной агрессивности которого на 30 % выше, чем  $\text{NO}$ . Определяется с учетом массового выброса  $\text{NH}_3$  и показателя агрессивности (грн/(кВт ч));  $C_5$  - ущерб от выделения газов при регенерации сажи, который определяется как массовый выброс  $\text{CO}_2$  при регенерации на стоимость  $\text{CO}_2$  (грн/(кВт ч)).

По данному комплексной оценке возможно сравнение комбинаций применения различных способов снижения ВВ при использовании альтернативных топлив.

### Заключение

В настоящее время одним из основных критериев выбора двигателей и топлив становятся экологические показатели, которые включают не только вредных выбросов с отработавшими газами, но и «парниковые» газы. Выбор процесса смесеобразования в цилиндре двигателя, подбора альтернативных топлив и параметров систем нейтрализации позволяет обеспечить все ужесточающиеся нормы не только на вредные выбросы, но и на «парниковые» газы. Данные требования возможно обеспечить принятием на межгосударственном уровне соответствующих нормативных документов, стимулирующих использование альтернативных топлив и применение комплексных систем нейтрализации отработавших газов.

### Список литературы:

1. Лищинина Н. А., Кулешов Н. П. Получение этилена из этилового спирта // Матеріали XI Всеукраїнської

науково-практичної конференції «Технологія-2008». - Сєвєродонецьк, 2008. - С. 18. 2. Крайнюк А. И., Васильев И. П. Комплексная оценка эффективности использования топлив растительного происхождения в дизелях // Двигатели внутреннего сгорания. - 2007. - № 2. - С. 77-81. 3. Парсаданов И. В. Наукові основи комплексного поліпшення показників паливної економічності та токсичності відпрацьованих газів дизелів вантажних автомобілів і сільськогосподарських машин: Автореф. дис...д-ра техн. наук: 05.05.03 / Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут» -Харків, 2003. - 37 с. 4. Гайворонский А. И., Марков В. А., Илатовский Ю. В. Использование природного газа и других альтернативных топлив в дизельных двигателях. - М.: ООО «ИРЦ Газпром», 2007.-480 с. 5. Romm Joseph J. The hype about hydrogen // IEEE Eng/ Manag. Rev. - 2006.-34.-№ 4.-С. 58-65. 6. Mathias Snåre, Iva Kubičková, Päivi Mäki-Arvela, Kari Eränen, and Dityu Yu. Murzin. Heterogeneous Catalytic Deoxygenation of Stearic Acid for Production of Biodiesel // Ind. Eng. Chem. Res.-2006. - 45.-С. 708-5715. 7. Nitsch von Joachim, Krewitt Wolfrarn. Erneuerbare Energien – Garantien einer zukunftsfähigen Energieversorgung // Sonnenenergie (Germany). - 2004.-№ 5.-S. 44-48. 8. Марков В. А., Баширов Р. М., Габитов И. И. Токсичность отработавших газов дизелей. 2-е изд. перераб. и доп. - М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2002.-С.336. 9. Звонов В. А., Симонова Е. А., Шеховцов Ю. И. Физико-химические и токсикологические характеристики частиц, выбрасываемых дизельными двигателями в окружающую среду (обзор) // Эко-технологии и ресурсосбережение. - 2005. - №2. - С. 37-47. 10. Васильев И. П. Методика определения дымности и дисперсности сажевых частиц отработавших газов дизеля при работе на биодизеле // Приоритетные направления науки и техники, прорывные и критические технологии: - (ЭЭТПЭ-2007). - Барнаул: ОАО "Алтайский дом печати", 2007. - С. 62-63. 11. Звонов В. А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания.-2-е изд., перераб. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с. 12. Васильев И. П., Ключ О. В. Внутрицилиндровый катализ в дизелях. - Калининград: КГТУ, 2008.- 133 с. 13. Hug H. T., Mayer F., Hartenstein A. Off-Highway Exhaust Gas After-Treatment: Combining Urea-SCR, Oxidation Catalysis and Traps // SAE Pap. Tech Ser.-1993.- № 930363. - p. 14. 14. Звонов В. А., Звонова З. Т., Фесенко П. П., Васильев И. П. Исследование каталитической нейтрализации отработавших газов дизеля // ДВС. - Харьков, 1978. - № 28. - С. 121-127. 15. Звонов В. А., Заиграев Л.С., Васильев И. П., Бодров Ю. К. Результаты исследований электромеханического фильтра для улавливания твердых частиц из отработавших газов дизеля // Эко-технологии и ресурсосбережение. - 1996. - № 4. - С. 59-64