

ОБ ОСОБЕННОСТЯХ РАБОТЫ ДВИГАТЕЛЕЙ С ИСКРОВОМ ЗАЖИГАНИЕМ НА БЕНЗИНАХ С ВЫСОКИМ СОДЕРЖАНИЕМ КИСЛОРОДОСОДЕРЖАЩИХ КОМПОНЕНТ

А.Ю. Шабанов, к.т.н., профессор, Ю.В. Галышев, д.т.н., зав. кафедрой, А.Б. Зайцев, к.т.н., доцент, С.В. Буторов, соискатель ФГАОУ ВО СПбПУ, Санкт-Петербург

Представлены результаты лабораторных исследований товарных бензинов и моторно-стендовых испытаний бензинового двигателя при его работе на топливе с различным содержанием кислородосодержащих добавок. Рассмотрены факторы влияния углеводородного и оксигенатного состава бензина на технико-экономические и экологические показатели бензинового двигателя. Определен оптимальный диапазон содержания в бензине кислорода по параметрам мощности, экономичности и токсичности отработавших газов современного двигателя с непосредственным впрыском бензина.

Современные требования к качеству автомобильных бензинов устанавливаются Техническим регламентом Таможенного союза 013/2011. Согласно этим требованиям (Приложение 2 к ТР ТС 013/2011) в составе бензинов, разрешенных к реализации на территории Российской Федерации, запрещено использовать металлосодержащие антидетонаторы на базе свинца, железа и марганца, высокооктановые добавки типа монометиланилина, ограничено содержание бензола. В этих условиях одним из легальных способов получения товарных автомобильных бензинов является применение высокооктановых компонент на базе комбинаций спиртов и эфиров. Однако их использование также ограничено Техническим регламентом, устанавливающим требования по предельным концентрациям отдельных компонент: метанол — запрещен; этанол — не более 5 %; изопропанол — не более 10 %; третбутанол — не более 7 % и т. д. Все высокооктановые компоненты этих видов являются кислородосодержащими. Поэтому, помимо ограничений по их концентрации, накладывается ограничение по суммарному массовому содержанию связанного кислорода в топливе (не более 2,7 % по массе) [1, 2].

Как показывает практика эксплуатации автомобильного транспорта с бензиновыми двигателями, содержание кислорода в топливе су-



щественно влияет на качество его сгорания в цилиндрах и, следовательно, меняет мощностные, экономические и экологические показатели силовой установки транспортного средства [4, 7, 6, 13–15].

В настоящей статье выполнен анализ степени влияния количества кислородосодержащих компонент (оксигенатов) в топливе на показатели работы автомобильного двигателя. Анализ базируется на интегральной оценке большого массива экспериментальных данных, полученных при проведении моторных стендовых испытаний двигателей различного типа.

Определение углеводородного и оксигенатного состава бензинов, реализуемых в настоящее время на топливном рынке Северо-Западного федерального округа, показывает, что по бензинам видов АИ-92-К5 и АИ-95-К5 содержание кислорода в топливе изменяется от 0,0 до 12,5 % по массе при изменении содержания ароматических углеводородов от 14 до 35 % по объему [9, 10, 14,15]. Очевидно, что максимальные показатели по содержанию кислорода далеко выходят за разрешенные требованиями ТР ТС 013/2011, однако такие топлива до сих пор занимают на рынке достаточно значимую нишу, особенно в зоне низшего ценового диапазона. Из рас-

смотрения такие топлива не исключались в целях расширения диапазона варьирования исследуемого параметра (т. е. содержания кислорода в топливе), хотя основная масса товарных высокооктановых бензинов содержит кислород в диапазоне 0,0–2,3 %.

В проведенном исследовании в качестве базового принято топливо вида АИ-95-К5, не содержащее оксигенатов с долей ароматических углеводородов 34,1 об.%. Так как кислородосодержащие компоненты в базовом бензине отсутствовали, массовая доля связанного кислорода здесь равнялась нулю. Опытные образцы топлива с кислородосодержащими компонентами получались путем добавления к базовому бензину соответствующих объемов метилтретбутилового эфира (МТБЭ) и спиртов. Кроме того, в испытании был включен образец товарного бензина с экстремально высоким содержанием оксигенатов, не соответствующим требованиям ТР ТС (образец № 6).

Кислородосодержащие компоненты бензина оказывают влияние на эксплуатационные показатели двигателя за счет влияния на процесс сгорания по нескольким направлениям.

Во-первых, высокое содержание кислорода существенно снижает теплотворную способность топлива, уменьшая тем самым количество теплоты, выделяющейся в цилиндре при сгорании фиксированной цикловой подачи топлива (таблица), что существенно влияет на показатели мощности и удельного расхода топлива ДВС. Так, увеличение содержания кислорода в топливе до 2,5 % снижает низшую теплотворную способность сравнительно немного (на 1,8 %), что приводит к уменьшению мощности двигателя в среднем на 2,3 %. Но при увеличении содержания кислорода до 11 % теплотворная способность снижается существенно – до 12 % относительно базового топлива, вследствие чего заметно ухудшились показатели мощности двигателя (рис. 1). При этом наблюдается монотонное падение эффективной мощности двигателя по мере роста содержания кислорода в топливе.

Увеличение удельного расхода топлива, особенно при работе двигателя по внешней скоростной характеристике, не столь заметно. Наблюдается наличие оптимума содержания кислорода в бензине, при котором достигается максимальная топливная экономичность двигателя. Это объясняется тем, что кислород, находящийся в топливе, дополнительно обедняет топливовоздушную смесь, повышает полноту сгорания. Однако это не может полностью компенсировать снижение количества выделяемого в процессе сгорания тепла из-за уменьшения теплотворной способности топлива (рис. 2). Для исполь-

Состав и физико-химические параметры испытанных образцов бензинов

№	Показатель	Образец бензина					
		1	2	3	4	5	6
1	Содержание МТБЭ	0,0	1,50	3,20	6,60	13,30	0,80
2	Содержание спиртов	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	20,0
Расчетные физико-химические показатели							
3	Объемное содержание углеводородов:						
	— алкановых	59,71	59,65	59,58	59,38	59,08	44,80
	— ароматических	34,75	33,99	33,12	29,94	22,87	16,45
	— нафтеновых	3,69	3,67	3,67	3,66	3,65	10,98
	— непредельных	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	2,78
4	Объемное содержание оксигенатов, %	0,0	1,50	3,20	6,60	13,30	24,98
5	Массовая доля кислорода, %	0,0	0,28	0,60	1,21	2,46	11,23
6	Низшая теплотворная способность, МДж/кг	43,47	43,36	43,24	43,06	42,72	38,59
7	Стехиометрическое соотношение, кг воздуха/кг топлива	14,81	14,77	14,73	14,67	14,54	13,07
8	Мольное стехиометрическое соотношение, кмоль воздуха/кг топлива	0,511	0,510	0,508	0,506	0,502	0,451
9	Средняя молярная масса топлива, кг/кмоль	93,13	93,03	92,90	92,48	91,06	81,66

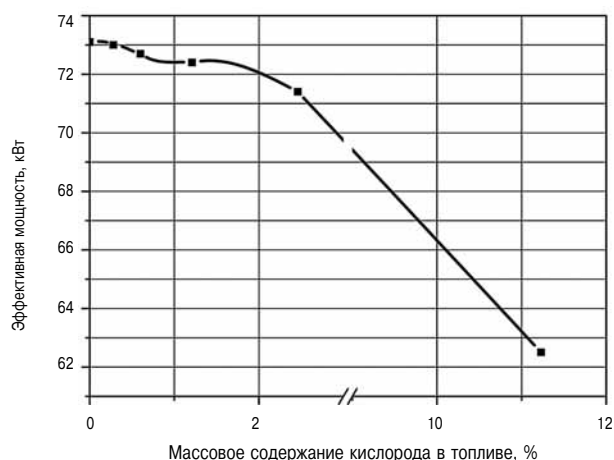


Рис. 1. Зависимость эффективной мощности двигателя от массового содержания кислорода в топливе

зованного в исследовании базового бензина оптимальное содержание МТБЭ составило около 4 об.%. Однако эта величина существенно зависит от фракционного состава базового топлива и поэтому должна определяться индивидуально для каждого вида базового бензина.

Второй фактор влияния кислорода в топливе на показатели двигателя — изменение действительного стехиометрического числа топлива (таблица). Высокое содержание оксигенатов в зоне

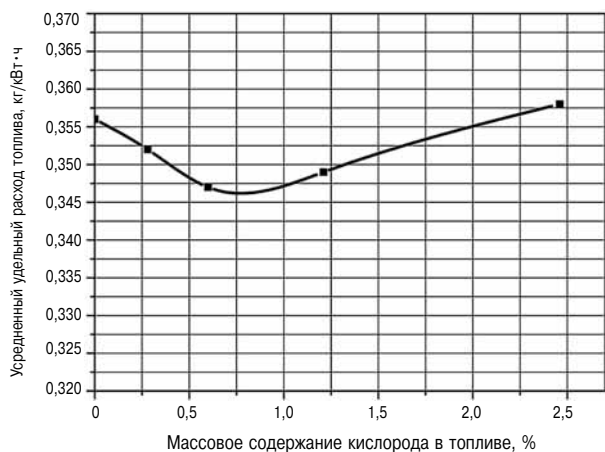


Рис. 2. Зависимость удельного расхода топлива, усредненного за цикл испытаний, от массового содержания кислорода в топливе

работы двигателя на высоких нагрузках, при которых отключается обратная связь по остаточному кислороду, заметно повышает величину коэффициента избытка воздуха топливо-воздушной смеси (рис. 3). На малых и средних нагрузках, в зоне работы обратной связи, высокое содержание кислорода приводит к неустойчивой работе датчика остаточного кислорода, что в силу специфического «триггерного» режима работы этого датчика также приводит к некоторому обеднению топливо-воздушной смеси (рис. 4). Неустойчивый сигнал датчика приводит к постоянной корректировке цикловой подачи топлива, что приводит к неустойчивой работе двигателя. Как следствие — наблюдается определенное увеличение расхода топлива и рост содержания остаточных углеводородов СН в отработавших газах двигателя при заметном снижении выхода оксидов углерода СО. Крайне негативным фактором, сопровождающим неустойчивую работу двигателя, является существенный рост темпа загрязнения катализатора системы очистки отработавших газов, что способствует снижению срока его службы и преждевременному выходу из строя.

Третий фактор влияния содержания кислорода в топливе — это изменение скорости горения топливо-воздушной смеси. Для анализа значимости данного фактора произведен расчет условной продолжительности сгорания с использованием методик, изложенных в [5, 6].

Результаты этой части исследования приведены на рис. 5, из которого видно, что при определенном содержании кислорода в бензине достигается минимальная продолжительность (следовательно — максимальная скорость) сгорания топливо-воздушной смеси. Для исследованного варианта базового топлива этот максимум соответствует содержанию кислорода в топливе в

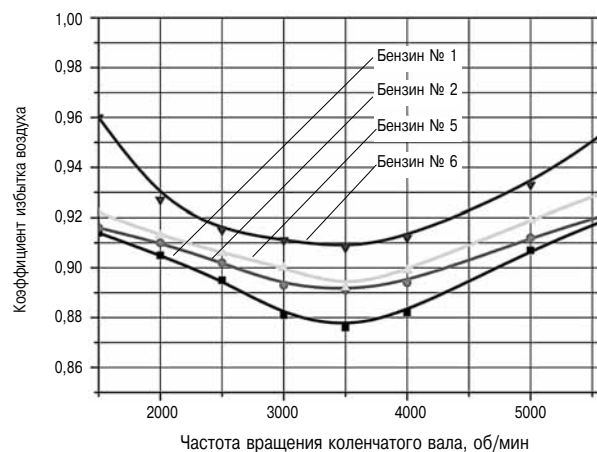


Рис. 3. Изменение коэффициента избытка воздуха топливо-воздушной смеси при работе двигателя по внешней скоростной характеристике на бензинах с различным содержанием кислорода

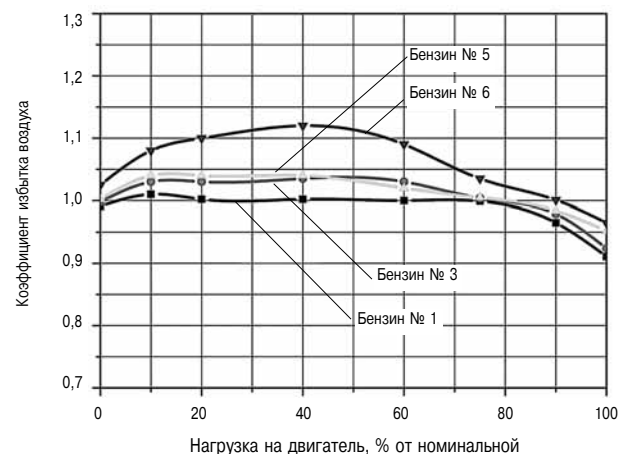


Рис. 4. Изменение коэффициента избытка воздуха топливо-воздушной смеси при работе двигателя по нагрузочной характеристике на бензинах с различным содержанием кислорода

диапазоне 0,3–0,6 % масс. и зависит от режима работы. Можно предположить, что подобная зависимость определяется необходимостью достижения компромисса между увеличением концентрации активных центров окислителя, обеспечиваемой дополнительным кислородом, с одной стороны; и общим снижением скорости сгорания топлива, сопутствующим росту его детонационной стойкости (октанового числа) при добавлении высокооктановой компоненты. Очевидно, что величина оптимальной концентрации кислородосодержащих компонент в топливе зависит от углеводородного состава исходного бензина и должны определяться индивидуально для каждого из них.

Четвертый фактор влияния содержания кислорода на показатели двигателя связан с увеличением плотности топлива при вводе в него некоторых кислородосодержащих компонент.

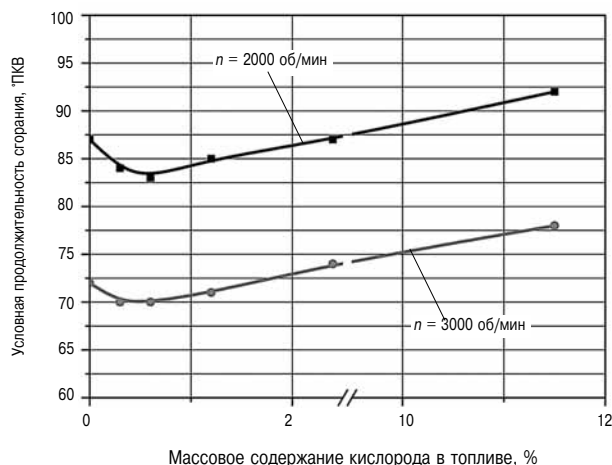


Рис. 5. Зависимость условной продолжительности сгорания от содержания кислорода в топливе

Так, при вводе в базовый бензин с плотностью 732 кг/м³ при 15 °С 15-ти % по объему спиртов плотность смеси возрастает до 741 кг/м³. При дозировании цикловой подачи, осуществляемой изменением времени открытия форсунок системы впрыскивания топлива, рост плотности топлива приводит к некоторому увеличению массы бензина, подаваемой в каждом цикле работы двигателя по сравнению с базовым топливом. Это также частично компенсирует снижение теплотворной способности топливо-воздушной смеси, однако приводит к увеличению расхода топлива.

Таким образом, проведенным исследованием показано, что даже при изменении кислородосодержания в автомобильном бензине в разрешенном требованиями ТР ТС 013/2011 диапазоне наблюдается существенное различие в моторных показателях товарного топлива. Это различие определяется многофакторным влиянием связанного кислорода топлива на физико-химические показатели, состав смеси, скорость и полноту сгорания топлива, а также работу системы управления двигателем. При этом одни факторы вызывают улучшение технико-экономических и экологических показателей двигателя, другие — их ухудшение. Это предполагает наличие определенного оптимального оксигенатного состава топлива, обеспечивающего максимальную эффективность его использования. Однако конкретное значение этого максимума будет зависеть не только от группового состава бензина, но и от преобладающих режимов эксплуатации двигателя.

Поэтому задача оптимизации состава и количества вводимых кислородосодержащих компонент должна решаться индивидуально, с учетом всех рассмотренных факторов.

Литература

1. Борзаев Б.Х., Карпов С.А., Капустин В.М. Многофункциональные добавки к автомобильным бензинам // Химия и технология топлив и масел. — 2007. — № 2. — С. 18–20.
2. Данилов А.М., Емельянов В.Е. Метанол в бензине // Газохимия. — 2009. — № 5. — С. 20–23.
3. Данилов А.М., Емельянов В.Е. О безопасности автомобильных бензинов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. — 2015. — № 4. — С. 17–19.
4. Емельянов В.Е. Влияние качества бензинов на токсичность отработавших газов автомобиля (по материалам зарубежных публикаций) // Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе. — 2006. — № 1. — С. 20–22.
5. Петриченко Р.М., Батурич С.А., Шабанов А.Ю. и др. Элементы системы автоматизированного проектирования ДВС: Алгоритмы прикладных программ: учеб. пособие. — Л.: Машиностроение, 1990. 328 с.
6. Петриченко Р.М. Физические основы внутрицилиндровых процессов в ДВС // Л.: Изд-во ЛГУ, 1983., 268 с.
7. Карпов С.А., Кунашев Л.Х., Царев А.В. и др. Применение алифатических спиртов в качестве экологически чистых добавок в автомобильные бензины // Электронный научный журнал Нефтегазовое дело. — 2006. — № 2. — С. 48–60.
8. Потанин Д.А., Ершов М.А., Емельянов В.Е. и др. Опыт и перспективы использования метанола при производстве автомобильных бензинов // Нефтепереработка и нефтехимия. Научно-технические достижения и передовой опыт. — 2015. — № 10. — С. 3–5.
9. Томин А.В. Методика комплексной оценки эффективности современных автомобильных бензинов // Мир нефтепродуктов. Вестник нефтяных компаний. — 2013. — № 11. — С. 35–42.
10. Kak, A., Kumar, N., Singh, B., Singh, S. et al. Comparative Study of Emissions and Performance of Hydrogen Boosted SI Engine Powered by Gasoline Methanol Blend and Gasoline Ethanol Blend. SAE Technical Paper 2015-01-1677, 2015, doi:10.4271/2015-01-1677.
11. Rockstroh, T., Floweday, G., Wilken, C. Options for Use of GTL Naphtha as a Blending Component in Oxygenated Gasoline. SAE Int. J. Fuels Lubr. 9(1):191-202, 2016, doi:10.4271/2016-01-0879.