

А.М. Левтеров, канд. техн. наук, Л.И. Левтерова, инж., Н.Ю. Гладкова, инж.

ОБРАЗОВАНИЕ МОНООКСИДА АЗОТА И ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НА ЕГО ЭМИССИЮ РЕГУЛИРУЕМЫХ ПАРАМЕТРОВ ДВИГАТЕЛЯ И ВИДА ИСПОЛЬЗУЕМОГО ТОПЛИВА

Источниками антропогенного загрязнения атмосферы являются теплоэнергетика, нефтегазопереработка, промышленность, транспорт. Негативные изменения атмосферы Земли связаны, главным образом, с изменением концентрации второстепенных компонентов атмосферного воздуха. Такие соединения, как угарный газ, монооксиды азота и серы, кроме того, что сами опасны для живых организмов, будучи активными окислителями, создают не менее опасные соединения. Так, окислы азота становятся пусковыми веществами фотохимического смога. А их доля постоянно растет с ростом количества отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу автомобилями, парк которых увеличивается и будет неуклонно расти, таким образом превращая ДВС в основной антропогенный источник оксидов азота в атмосфере.

Оксиды азота представлены следующим рядом: NO , NO_2 , N_2O , N_2O_3 , N_2O_5 , N_2O_4 . Они физиологически активны: в больших концентрациях как оксиды, так и диоксиды азота могут вызывать удушье, поражать центральную нервную систему. Около 80% всех оксидов азота приходится на долю NO . Образованием монооксидов азота окружающая среда обязана сжиганию топливовоздушных смесей в энергоустановках различного типа, когда безобидный азот воздуха, попадая в пламя, окисляется в основном до монооксида азота кислородом воздуха, участвующего в горении. Как соединение с промежуточной степенью окисления, монооксид азота может быть как восстановителем, так и окислителем. Попадая в атмосферу NO , постепенно превращается в гемиоксид азота (N_2O) путем взаимодействия с озоном и гидроперекисными радикалами, при обычных условиях NO быстро окисляется до NO_2 . Образующаяся в процессе сгорания углеводородного топлива окись азота после выхода из выпускной системы двигателя вступает в реакцию с кислородом воздуха и дает неустойчивое соединение диоксида азота NO_2 , а затем ряд устойчивых соединений с разным содержанием элементов в молекуле и обозначается как NO_x . Проблема нейтрализации монооксидов азота, а, следовательно, изучение условий их образования и ко-

личественной оценки даже в случае использования в качестве топлива чистого водорода «с повестки дня» не снимается.

Современное состояние теории и практики процесса горения топливно-воздушной смеси в ДВС характеризуется все возрастающей сложностью решаемых научно-практических проблем и рассматриваемых при этом динамических задач и связанной с этим необходимостью адекватного количественного и качественного описания сложнейших гидродинамических и термодинамических, химических и физических процессов, включая процессы переноса энергии, импульса, массы. К сожалению, классификация подобных динамических задач по данным [1], где автор делает попытку такой классификации, отсутствует.

Адекватное описание процессов горения возможно только с учетом детальной кинетики химических реакций (микрокинетики). Важной проблемой является учет равновесного состава продуктов сгорания при наличии в них градиента температуры, обусловленного Махе-эффектом, т. е. различной эволюцией отдельных объемов, которые изменяются в процессе сгорания.

Можно выделить несколько работ, посвященных методике определения эмиссии NO в процессе горения. Так, в [2] согласно принятой гипотезе массовый выброс NO пропорционален количеству теплоты, выделившийся к моменту достижения в камере сгорания максимального давления. Взаимосвязь этих параметров основывается на материалах экспериментальных исследований.

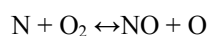
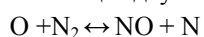
В работе [3], опираясь на модель сгорания Разлейцева Н.Ф., реакции горения углеводородов сводят к бимолекулярным реакциям, идущим в одну сторону и дополняют их моделированием эмиссии NO в соответствии с механизмом Зельдовича. В работе [4] моделирование горения в ДВС и образование продуктов сгорания, в том числе и токсических веществ, рассматривается в рамках многозонной модели. В [5,6,7] представлен метод химического турбулентного теплообмена в ДВС, где рассматривается горение неоднородной в пространстве смеси, химическая кинетика горения на

микраламинарном участке фронта горения, турбулентное догорание в объеме за фронтом горения и в процессе расширения. Там же представлены результаты исследований на базе этого метода двигателя GDI фирмы "MITSUBISHI" с непосредственным впрыском и двигателя ВАЗ 21011.

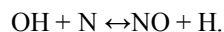
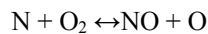
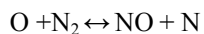
Снижение норм на эмиссию оксидов азота обуславливает применение новых технологий организации процесса сгорания в ДВС, как-то: рециркуляция отработавших газов, турбонаддув, добавки к топливу, изменение геометрии камеры сгорания, использование альтернативных топлив. Естественно, использование таких технологий требует предварительных расчетных исследований.

Используя результаты численного эксперимента, частично представленные в [8, 9], проведем дополнительные расчетные исследования, рассмотрим, как влияют методы расчета и основные параметры двигателя на эмиссию монооксидов азота.

Согласно общепринятой теории термического механизма Зельдовича Я.Б. окисление азота воздуха в топливоздушной смеси происходит за фронтом пламени с температурой выше 1800 К в зоне продуктов сгорания комбинацией свободных радикалов О и N, которые соединяются при высоких температурах. Окисление происходит по цепному механизму, насчитывающему несколько десятков реакций, но хорошо себя зарекомендовала и широко используется как в упрощенных термодинамических моделях процесса горения топлива, так и в 3-мерных постановках аналогичных задач, схема образования NO, включающая двух-



и трех-ступенчатый механизмы



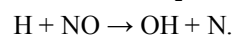
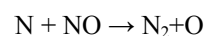
При условиях, близких к стехиометрическим, становится важной последняя реакция [10].

Значительно увеличить концентрацию NO может флуктуация температуры, так как при механизме его образования имеет место большая зависимость скорости реакции от температуры [11].

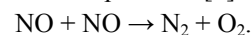
Опираясь на то, что в случае рассмотрения горения легких и тяжелых углеводородов с точки зрения детального кинетического механизма В.Я.Басевича в кинетическую схему реакций окисления топлива вводятся реакции окисления азота воздуха по механизму Л.Б.Зельдовича [5], считаем

правомочным рассмотреть автономно эмиссию монооксида азота при горении различных топлив на основе совместного решения уравнений, определяющих получение равновесных концентраций N, O, H, OH, N₂, O₂, и уравнения кинетического механизма образования NO. Согласно механизму Зельдовича скорость образования NO много меньше скорости сгорания, и основная часть NO образуется после завершения горения. Отсюда следует, что процесс образования NO может быть выделен из процесса горения и скорость образования монооксида азота $\frac{d}{dt}(NO)$ может быть рассчитана в предположении равновесности реакций горения.

В области высоких температур все реакции окисления углеводородного топлива интенсивно генерируют NO, вдали от фронта горения концентрация NO уменьшается под воздействием ведущих реакций восстановления азота.



Это уменьшение значительно усиливается в пограничном слое за счет реакции [7].



Там же показано, что основное изменение температуры и содержания NO, O₂ и OH в цилиндры наблюдается на такте расширения.

При моделировании эмиссии NO не учитывалось образование оксидов азота в соответствии с механизмом Фенимора, так называемых "быстрых", и "топливных" оксидов в виду малости их величины по отношению к превалирующей роли "термических" оксидов [3].

На рис. 1 и 2 представлен характер взаимовлияния эмиссии NO, максимальной и текущей температуры в камере сгорания, атмосферного азота и свободного кислорода в зависимости от коэффициента избытка воздуха и продолжительности процесса сгорания в фазах "горение-расширение", полученный для бензиновоздушной смеси, сгорающей с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1$ в камере сгорания автомобильного двигателя 4Ч 7,9/8,0 с жидкотопливной системой питания и искровым зажиганием.

Выход NO определяется максимальной температурой сгорания и равновесными концентрациями азота и кислорода в продуктах сгорания.

Умеренная эмиссия NO соответствует обогащенной и обедненной смесям. Концентрация NO в богатой смеси ограничивается недостатком кисло-

рода и низкой температурой горения, в зоне бедной смеси – температурой и временем пребывания в фазе горения. С уменьшением температуры до 2300 К и $\alpha > 1$ концентрация азота становится постоянной.

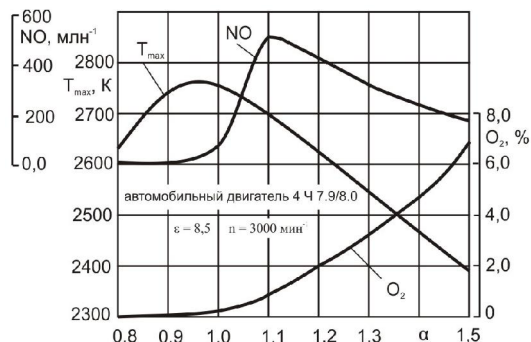


Рис. 1. Соотношение в продуктах сгорания содержания кислорода и оксида азота на фоне температуры и коэффициента избытка воздуха

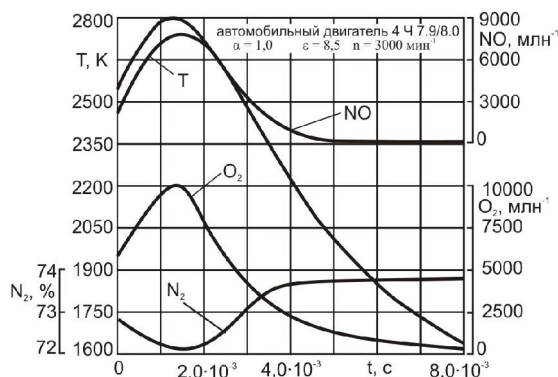


Рис. 2. Зависимость температуры, NO, O₂ и N₂ на такте сгорания-расширение от времени

Сравнение расчетных значений эмиссии монооксида азота по разным видам топлива для режима максимального крутящего момента указанного двигателя представлено на рис. 3. Преимущество явно на стороне природного газа и биогаза. Спирты, как и водород, по эмиссии NO сопоставимы с бензином.

На рис. 4 дана диаграмма изменений эмиссии NO для бензоэтанола и биогаза в зависимости от процентного соотношения компонент смеси топлива. С увеличением доли этанола в смеси наблюдается и рост эмиссии NO. Об увеличении токсичности ОГ двигателя на смешевых топливах на основе легких спиртов по оксидам азота на 10–15 % отмечено и в работе [12], что объясняется большей максимальной температурой цикла.

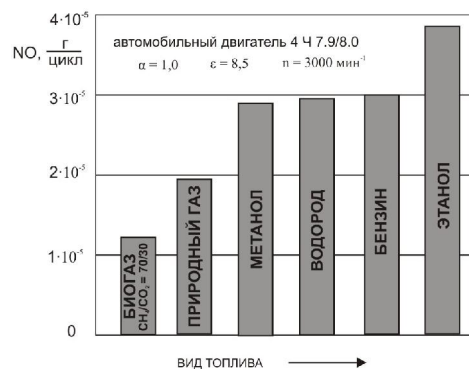


Рис. 3. Значение эмиссии NO для разных видов топлива

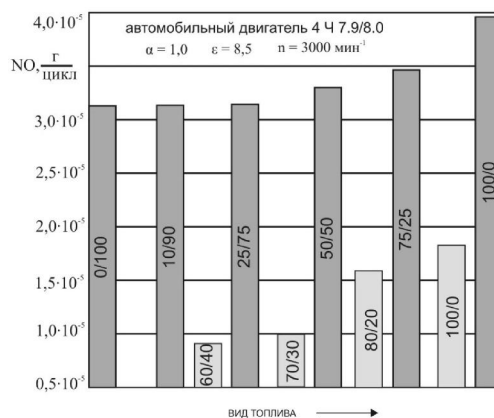


Рис. 4. Зависимость эмиссии NO от процентного соотношения компонент смеси топлива
 ■ – этанол-бензин в; □ – метан-CO₂

Предварительный прогноз уровня токсичности в зависимости от режимных, регулировочных и конструктивных параметров двигателя получен варьированием в заданных пределах коэффициента избытка воздуха (α), степени сжатия (ϵ), частоты вращения коленчатого вала (n), угла опережения зажигания (ϕ) и нагрузки для двух типов двигателей — 4Ч 7,9/8,0 и газового двигателя с искровым зажиганием 2Ч 10,5/12, полученного конвертированием дизеля Д21А. Рисунок 5 демонстрирует зависимость от варьируемых параметров эмиссии NO при работе на бензине, безоэтаноле и биометане, т.е., метане, полученном очисткой биогаза. Подобный прогноз позволяет с достаточной точностью (в пределах 3–12 %) сделать оптимальный по критериям токсичности ОГ или экономичности выбор регулируемых параметров.

Влияние частоты вращения коленчатого вала и нагрузки на содержание NO в ОГ незначительно. Можно отметить тенденцию к увеличению содержания NO при большей частоте и рост ее влияния по мере уменьшения угла опережения зажигания.

Зависимость образования NO от угла опережения зажигания носит нелинейный характер, хорошо видна область минимального его содержания для

угла опережения зажигания в интервале 20 – 30 градусов п.к.в. до ВМТ.

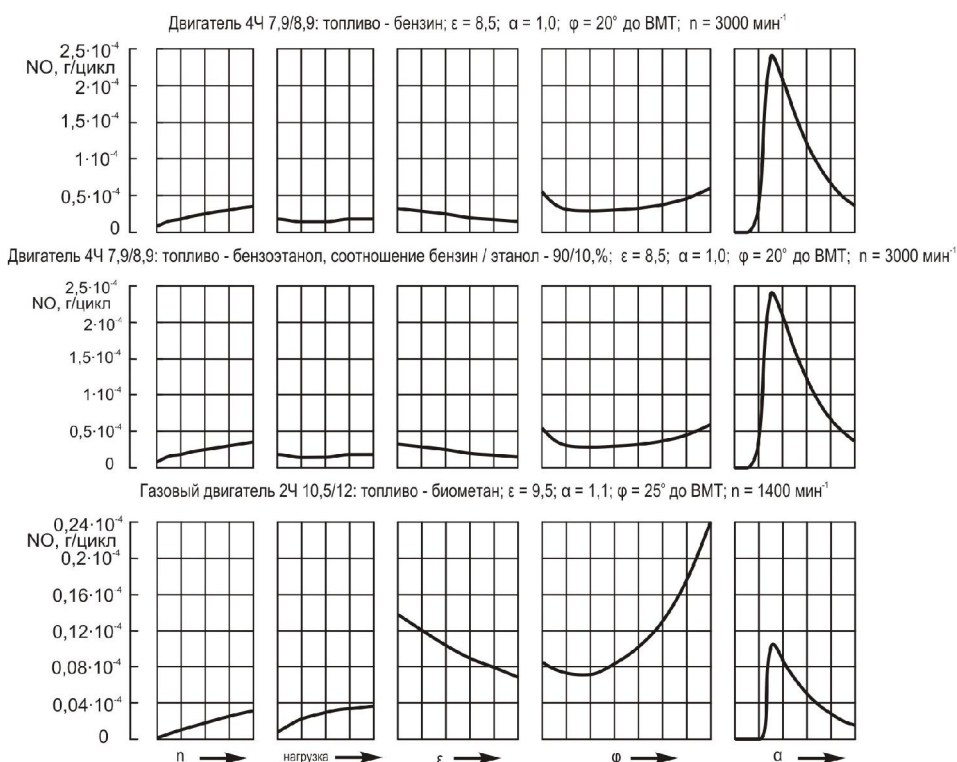


Рис.5. Зависимость эмиссии NO от регулировочных параметров двигателя и топлива

Максимальная концентрация монооксида азота соответствует $1,05 \leq \alpha \leq 1,2$.

Уменьшение содержания NO в ОГ наблюдается с ростом степени сжатия. Именно введение ограничений по показателям эмиссии NO, в свое время, стало мотивом повышения степени сжатия на дизеле фирмы MTU [2].

Выводы, сделанные по результатам численного эксперимента, согласуются с аналогичными исследованиями [2,7]. Следует отметить, что в работе [4], где исследования горения в ДВС альтернативных и традиционных топлив проводятся в рамках многозонной модели сгорания, сделаны противоположные выводы по влиянию степени сжатия и коэффициента избытка воздуха на эмиссию монооксидов азота. По нашему мнению, это объясняется использованием равновесной модели образования продуктов сгорания, которая для моделирования образования монооксидов азота является недостаточно точной: равновесные концентрации монооксида азота по реакции $N_2 + O_2 \leftrightarrow 2 NO$ согласно химической энциклопедии [13] составляют в процентах: при 2000°C – 61%, а при температуре 3200°C уже только 4,48%.

И, действительно, если провести сравнение величины NO (двигатель 4Ч 7,9/8,0), получаемой по равновесной и кинетической моделям образования, будем иметь разницу в три порядка, а максимум значений эмиссии NO сместится из области $\alpha = 1,2 - 1,3$ в область $\alpha = 1,05 - 1,1$. Таким образом, проведенное комплексное исследование образования монооксидов азота и характера влияния на его эмиссию изменения в широком диапазоне режимных параметров автомобильного двигателя 4Ч 7,9/8,0 и газового двигателя 2Ч 10,5/12, позволило сравнить различные топлива, в том числе и альтернативные, по токсичности ОГ, дать рекомендации по рациональному сочетанию регулируемых параметров двигателя и проведению стендовых испытаний альтернативных топлив.

Список литературы:

1. Сеначин П. К. Некоторые вопросы моделирования процессов самовоспламенения и горения в ограниченных объемах и двигателях внутреннего сгорания / П. К. Сеначин // Вестник АлтГТУ им. И.И. Ползунова. – 2000. – № 2. – С. 54–61.
2. Лебедев С. В. Формирование рационального поля технических характеристик дизелей унифицированного типоразмера / С. В. Лебедев, В. И. Решетов, Г. В. Лебедева // Двигателестроение. –

2002. – №3. – С. 18–22. 3. Гаврилов В. В. Математическое моделирование горения топлива и образование окиси азота в дизеле / В. В. Гаврилов // Изв. вузов. Машиностроение. – 2003. – № 7. – С. 3–40. 4. Жгутова В. И. Моделирование горючей смеси в ДВС с искровым зажиганием с образованием токсичных веществ в рамках многозонной модели / В. И. Жгутова, М. Ю. Свердлов, Д. Д. Матиевский, П. К. Сеначин // Вестник АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – 2000. – № 2. – С. 65–75. 5. Чесноков С. А. Моделирование смесеобразования и горения в ДВС с непосредственным впрыском / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов // Двигателестроение. – 2005. – №1. – С. 3–5. 6. Чесноков С. А. Турбулентность при горении в ДВС / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов // Двигателестроение. – 2008. – № 1. – С. 13–16. 7. Чесноков С. А. Моделирование горения и образования токсических веществ в ДВС / С. А. Чесноков, Н. Н. Фролов // Двигателестроение. – 2005. – № 2. – С. 18–22. 8. Левтеров А. М. Исследование характеристик двигателя с искровым зажиганием, работающего на бензоэтанольных топливных композициях / А. М. Левтеров, Л. И. Левтерова, Н. Ю. Гладкова // Двигатели внутреннего сгорания. – 2008. – № 1. – С. 52–57. 9. Левтеров А. М. Прогнозирование характеристик поршневого двигателя, работающего на биогазе / А. М. Левтеров, Л. И. Левтерова, Н. Ю. Гладкова // Пробл. машиностроения. – 2009. – №4. – С. 59–64. 10. Зельдович Я. Б. Окисление азота при горении. / Я. Б. Зельдович, П. Я. Садовников, Д. А. Франк-Каменецкий. – М.-Л.: Изд-во АН СССР. – 1947. – 145 с. 11. Куценко Ю. Г. Применение методов вычисления газовой динамики для моделирования многокомпонентного потока газа, горения, теплообмена в камере сгорания газотурбинного двигателя / Ю. Г. Куценко, С. Ф. Онегин // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. С. П. Королева. – 2002. – Вып. 2(2), – С. 60–64. 12. Вагнер А. А. Применение альтернативных топлив в ДВС / А. А. Вагнер // Вестник АлтГТУ им. И. И. Ползунова. – 2000. – № 2.– С. 76–84. 13. Химическая энциклопедия в 5 т. том 1, Изд-во советская энциклопедия. – М. – 1988. – С. 58–60.