

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ ЭКСПЕРИМЕНТА, ВЛИЯЮЩИХ НА ТОЧНОСТЬ РАСЧЕТОВ NO ПРИ ОЦЕНКЕ АДЕКВАТНОСТИ ДВУХЗОННОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СГОРАНИЯ

Гиринovich М.П., Звонов В.А., Иванов А.Г.
ГНЦ РФ ФГУП «НАМИ», г. Москва

В настоящее время проблема уменьшения токсичности отработавших газов двигателей является актуальной. В дизелях более 95% общей токсичности приходится на оксиды азота и частицы (PM), причем наибольший вклад вносят NO. Их снижение до требований перспективных экологических норм - наиболее сложная задача, для выполнения которой требуется проведение большой исследовательской и экспериментальной работы. Применение математических моделей может существенно упростить решение данной задачи.

Для проведения расчетов образования оксидов азота в камере сгорания двигателя хорошо себя зарекомендовала двухзонная математическая модель сгорания, разработанная проф. Звоновым В.А. [2]. При проведении идентификации данной модели вычисления выполняются по опытным индикаторным диаграммам. Тогда результаты расчетов тепловыделения, а, следовательно, и значение нормирующего фактора для NO (коэффициент избытка воздуха в зоне продуктов сгорания α_g), будут зависеть от точности определения положения ВМТ поршня, степени сжатия и тепловых потерь в стенки. Поэтому для проведения идентификации модели необходимо установить требования к точности определения вышеперечисленных параметров. Кроме того, необходимо оценить влияние цикловой и межцилиндровой неравномерности работы дизеля на образование NO.

1. Двухзонная математическая модель процесса сгорания

На образование оксидов азота в процессе сгорания существенное влияние оказывают температура и концентрация активных веществ (O, OH и CH) в зоне горения и продуктов сгорания, причем последние зависят от состава смеси и уровня температуры. Поэтому в моделях сгорания, применяемых для расчета образования NO, необходимо определять локальные температуры и концентрации в зоне реакции.

Этим требованиям в полной мере отвечает двухзонная модель [1, 2].

При математическом моделировании процесса сгорания и образования оксидов азота в цилиндре дизеля с использованием двухзонной модели процесс сгорания условно разделяют на две зоны: зону свежей смеси и зону продуктов сгорания. Сгорание происходит с локальным коэффициентом избытка воздуха (α_g) близким к единице. При этом предполагается отсут-

ствие тепломассообмена между зонами, а также однородность по температуре и составу зоны продуктов сгорания на каждом участке времени.

Образование оксидов азота

Для определения выбросов NO по двухзонной модели рассчитывалась объемная доля оксидов азота ($r_{\text{NOобр}}$) в продуктах сгорания, образовавшихся на участке расчета ($\Delta M_{\text{пс}}$) и изменение доли оксидов азота (Δr_{NO}) в основной зоне продуктов сгорания ($M_{\text{пс}}$).

Общее количество NO в зоне продуктов сгорания на конце участка расчета определялось по формуле:

$$r_{\text{NO2}} = \frac{\Delta M_{\text{пс}} \times r_{\text{NO}_{\text{вх}}} + M_{\text{пс1}} \times (r_{\text{NO1}} + \Delta r_{\text{NO}})}{M_{\text{пс2}}}, \quad (1)$$

где (r_{NO1}) – количество NO, образовавшегося на предыдущем шаге расчета.

Расчеты NO производились на каждом временном шаге по разработанной ранее «комбинированной» модели [1]: образование NO в зоне продуктов сгорания, образовавшихся на участке расчета ($\Delta M_{\text{пс}}$), определялось по детальному кинетическому механизму, который учитывает образование «быстрых» NO, а в основной области продуктов сгорания ($M_{\text{пс}}$) – по 3-м реакциям «термического» механизма Зельдовича.

Адекватность модели была подтверждена при выполнении расчетно-экспериментальных работ [1, 2].

3. Анализ факторов эксперимента

Испытания производились на одноцилиндровой установке 1ЧН 12/12 в учебной лаборатории МАДИ (ТУ). Для проведения анализа был выбран режим работы двигателя, соответствующий режиму максимального крутящего момента ($n=1400 \text{ мин}^{-1}$, Нагрузка=100%).

ВЛИЯНИЕ ТОЧНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ ВМТ

Точность индицирования зависит от точности определения положения поршня датчиком угловых меток, установленным на носке коленчатого вала, то есть от точности привязки метки начала отсчета датчика к положению ВМТ цилиндра. Для определения влияния этого фактора на точность расчетов NO был проведен численный эксперимент с изменением положения ВМТ на $\pm 1^\circ$ пкв. Результаты представлены на рис. 1.

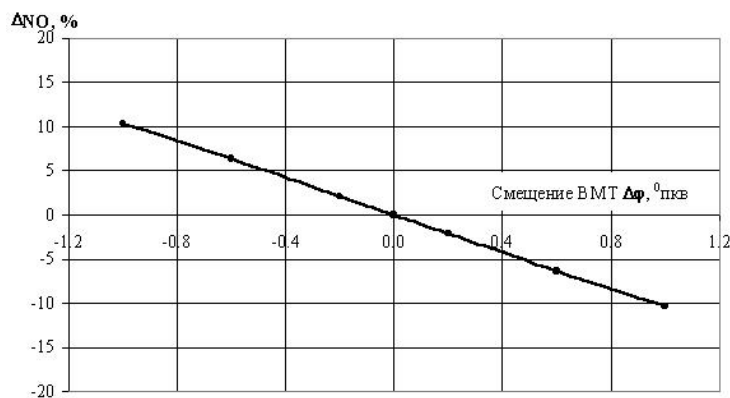


Рис. 1. Влияние изменения положения ВМТ на расчеты NO.

Определения положения ВМТ поршня выполняется с максимально возможной точностью $\pm 0,1^\circ$ ПКВ. При такой точности влиянием этого фактора на расчеты NO можно пренебречь.

Влияние точности определения степени сжатия

Другим существенным фактором, влияющим на расчеты NO, является правильное определение степени сжатия (ϵ). Для этого необходимо точно измерить объем камеры сгорания V_c . Из-за сложной геометрии этого объема при его определении возникают ошибки. Для анализа влияния ошибки определения ϵ на результаты расчетов тепловыделения и NO будем изменять этот параметр в пределах $\pm 5\%$ от величины базового значения (см. рис. 2).

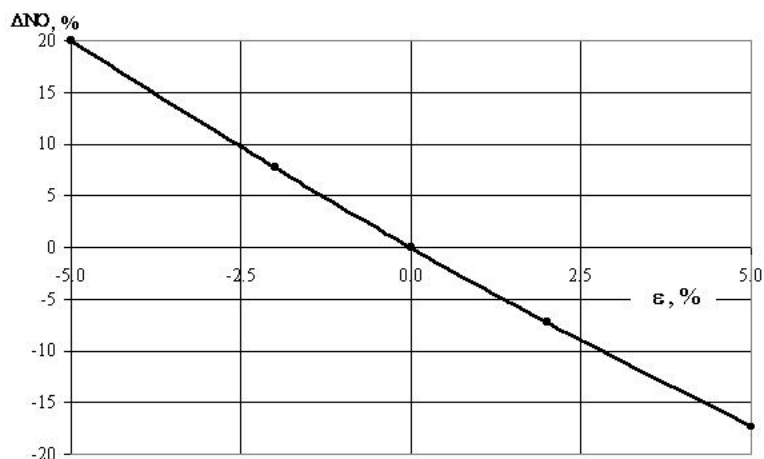


Рис. 2. Влияние изменения ϵ на расчеты NO.

Неверно определенная величина ϵ оказывает сильное влияние на расчет температуры в камере сгорания, что сказывается на расчетах NO. В соответствии с уравнением состояния идеального газа при увеличении ϵ происходит уменьшение объема V , тогда, при заданном индикаторном давлении P , будет происходить снижение температуры T . Это ведет к сни-

жению температуры в зоне продуктов сгорания и расчетных концентраций NO.

Влияние точности определения потерь тепла в стенки КС

В двухзонной модели сгорания расчет тепловых потерь в стенки (Q_w) производится по формуле Вошни. Для ее использования необходимо определить температуры и площади поверхностей, образующих КС.

Измерение температур - сложная и трудоемкая работа, поэтому она не проводится в рамках экспериментов по анализу рабочего процесса, их выбирают исходя из результатов анализа работ, посвященных проблемам измерения температур деталей двигателя.

Для определения степени влияния Q_w на расчеты NO в программе расчета тепловыделения и образования оксидов азота был введен множитель, который изменял долю тепловых потерь в стенки на $\pm 20\%$ от базового значения. Результаты расчетов представлены на рис. 3.

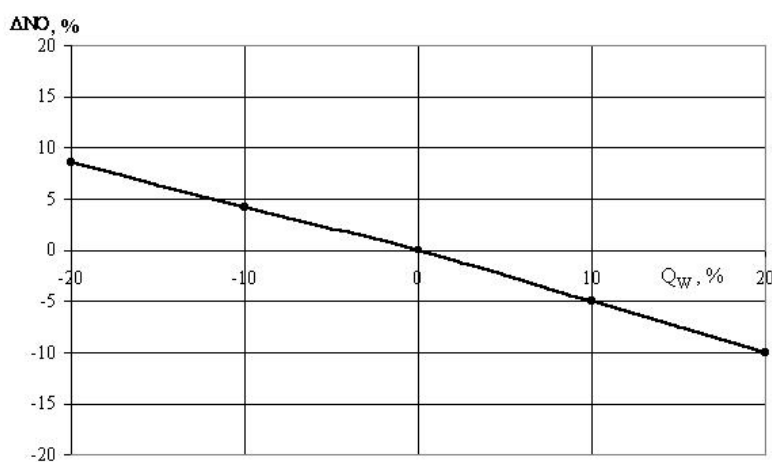


Рис. 3. Влияние изменения Q_w на расчеты NO.

Из полученных данных можно сделать вывод, что ошибка определения Q_w оказывает относительно небольшое влияние на расчет NO. Для того чтобы отклонение NO не превышало 5% необходимо рассчитывать Q_w в пределах $\pm 10\%$ от базового значения, что легко достигается при используемом подходе определения Q_w .

Анализ цикловой неравномерности

Анализ индикаторных диаграмм единичных циклов показал, что при испытаниях современных дизелей с механическими системами подачи топлива фактором цикловой неравномерности можно пренебречь. Для исключения высокочастотной составляющей диаграммы давлений, вызванной стохастическими процессами в цилиндре, проводится осреднение не-

скольких единичных циклов и сглаживание полученной индикаторной диаграммы.

Анализ межцилиндровой неравномерности

Ввиду сложности эксперимента и трудоемкости его обработки, индицирование на развернутом двигателе проводится только в одном цилиндре, то есть по индикаторной диаграмме одного цилиндра делается вывод о процессе сгорания и образования NO во всех цилиндрах. В действительности они могут существенно отличаться, что вызвано в первую очередь неравномерностью подачи топлива и воздуха.

Для анализа влияния этих параметров будем изменять их значения в программе расчета процесса сгорания и образования NO по заданному закону относительного тепловыделения $x(\varphi)$, полученному ранее при обработке экспериментальной индикаторной диаграммы.

При проведении расчетов предполагалось, что малое изменение цикловой подачи топлива и массы воздушного заряда цилиндра не влияет на закон сгорания. Поэтому функция $x(\varphi)$ для всех расчетов была принята одинаковой.

Результаты расчетов концентраций и удельных выбросов NO при изменении цикловой подачи топлива на $\pm 8\%$ представлены на рис. 4.

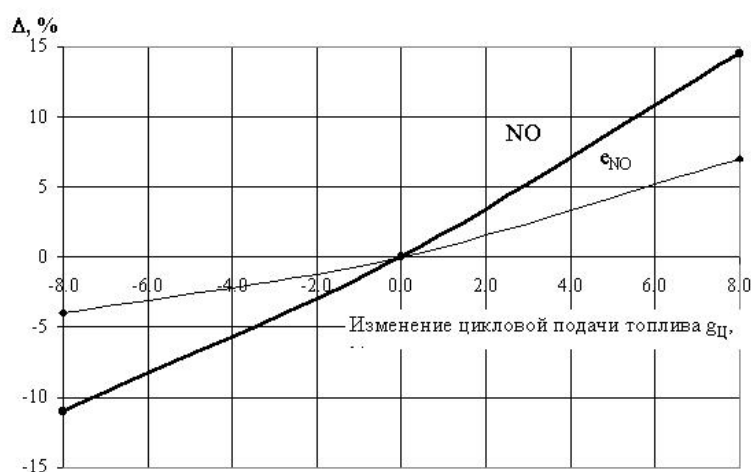


Рис. 4. Зависимость NO и e_{NO} от изменения цикловой подачи топлива ($n=1400 \text{ мин}^{-1}$, Нагрузка=100%).

Из полученных результатов следует, что при изменении цикловой подачи топлива в пределах рассмотренных значений отклонение удельных выбросов оксидов азота e_{NO} не превышает 7%.

Неравномерность воздушного заряда цилиндров оценивалась в пределах $\pm 10\%$. Результаты расчетов представлены на рис. 5.

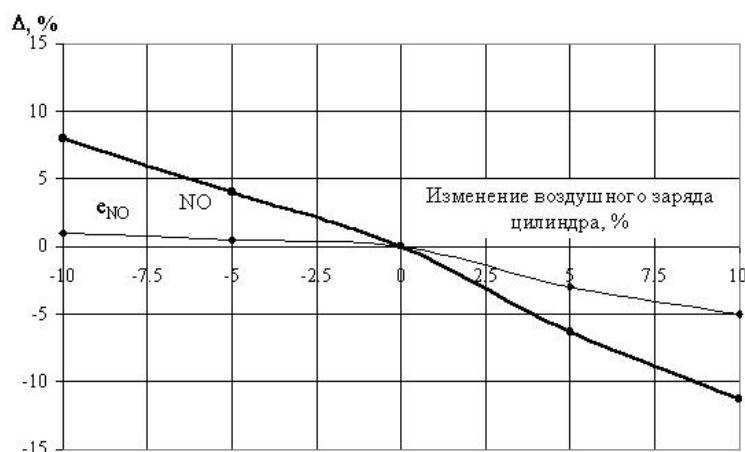


Рис. 5. Зависимость NO и ϵ_{NO} от изменения массы воздушного заряда цилиндра ($n=1400 \text{ мин}^{-1}$, Нагрузка=100%).

Изменение массы воздушного заряда цилиндра оказывает более слабое влияние на результаты расчетов удельных выбросов NO по сравнению с изменением подачи топлива и не превышает 5% в рассматриваемом диапазоне. Поэтому фактором неравномерности распределения воздуха по цилиндрам двигателя можно пренебречь.

Таким образом, при проведении испытаний и идентификации двухзонной математической модели сгорания и образования NO необходимо учитывать, что:

- 1) из рассмотренных факторов наибольшее влияние на результаты расчетов NO оказывает точность определения степени сжатия;
- 2) изменение положения ВМТ на индикаторной диаграмме и количества тепловых потерь в стенки, в рассмотренных интервалах, оказывают относительно небольшое влияние на расчеты NO , а необходимый диапазон точности их определения легко достигается при используемом подходе;
- 3) неравномерность образования NO по цилиндрам двигателя определяется главным образом неравномерностью топливоподачи;
- 4) при отклонении цикловой подачи топлива в индицируемом цилиндре более чем на 6% от среднего значения необходимо производить корректировку расчетов образования NO для повышения точности вычислений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Звонов В.А., Гиринович М.П. Анализ механизмов образования оксидов азота при сгорании углеводородных топлив в камере сгорания ДВС (часть 2): Приводная техника. 2004, №5.
2. Звонов В.А. Токсичность двигателей внутреннего сгорания. Изд. 2-у перераб. - М.: Машиностроение, 1981. - 160 с.