

## МЕТОД ОЦЕНКИ СМЕСЕОБРАЗОВАНИЯ В БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

*И.И. Неяченко, ведущий инженер-конструктор,*

*Научно-технический центр ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти, Российская Федерация*

### Введение

Ужесточение стандартов по ограничению токсичности отработавших газов автомобилей вынуждает разработчиков автомобильной техники обращать всё большее внимание на оптимизацию фазы холодного пуска и прогрева. Современный легковой автомобиль, оснащенный системами электронного управления двигателем и каталитической очисткой отработавших газов, на этой фазе выбрасывает до 70 ÷ 80% от суммарного выброса продуктов неполного сгорания топлива CO и HC при испытании по стандартному городскому циклу и температуре  $t = 20^{\circ}\text{C}$ . При понижении температуры до  $t = -7^{\circ}\text{C}$  эти выбросы увеличиваются в абсолютном значении в 2.5 ÷ 4 раза [1]. Автомобиль, удовлетворяющий нормам ЕВРО-3, выбрасывает в атмосферу 80% эмиссии HC в первые 40 секунд после холодного пуска двигателя [2].

Основными причинами повышенной токсичности о.г. на данном режиме являются:

во-первых, неоптимальная работа двигателя вследствие ухудшения смесеобразования и вынужденного обогащения смеси, а также вследствие неоптимального управления;

во-вторых, задержка вступления в работу каталитического нейтрализатора из-за необходимости его предварительного прогрева.

Как известно, недостаточно хорошее смесеобразование и, как следствие, присутствие топлива в виде пленки на стенках впускной системы двигателя представляет собой основную проблему для организации точного дозирования топливоподачи и полного сгорания рабочей смеси в цилиндрах на динамических режимах работы двигателя. Наибольшие затруднения возникают с понижением температуры двигателя и

при холодном пуске двигателя проблемы достигают максимума. Таким образом, определение массы топливной пленки во впускной системе может рассматриваться как основная оценка качества смесеобразования, по крайней мере, при пониженных температурах.

Для улучшения показателей бензинового двигателя на режимах пуска и прогрева применяются различные конструкторские разработки, направленные на улучшение смесеобразования на этих режимах. В частности, находят применение форсунки с улучшенными характеристиками распыления топлива, электроподогреватели и турбулизаторы смеси на впуске в цилиндры двигателя, системы быстрого прогрева с использованием тепловых аккумуляторов и т. п. [2, 3].

Как показано в ряде исследований, при отложении нагара на клапанах и стенках впускного тракта, орошаемых топливом, и/или изменении параметров факела распыления топлива форсунками также возникают изменения в настенном пленкообразовании и как следствие необходимость изменения калибровок топливоподачи [4, 5].

При испытаниях или разработке новых систем улучшенного смесеобразования в настоящее время, как правило, используются традиционные методы оценки, включающие в себя полномасштабные испытания двигателей и автомобилей, что дает исчерпывающий итоговый ответ, однако связано с большими трудовыми и материальными затратами.

В связи с приведенными обстоятельствами существует потребность в быстром и нетрудоемком количественном методе оценки смесеобразования, в частности, на режимах пуска и прогрева двигателя.

## Выбор метода

Из известных подходов к анализу процессов смесеобразования наибольшее развитие получил метод, в основе которого лежит представление впускной системы двигателя в виде инерционного звена первого порядка по отношению к транспортировке топлива [6, 7].

Первоначально метод был предложен и получил развитие как основа стратегии управления топливоподачей на динамических режимах работы двигателя. Суть метода заключается в предварительном экспериментальном определении реакции двигателя на динамическое воздействие по каналу управления топливоподачей для различных условий работы двигателя и последующем использовании полученных коэффициентов динамической модели поведения топливной пленки во впускной системе двигателя для оперативной компенсации задержек в процессе реального управления. Такая стратегия успешно апробирована автопроизводителями и позволила получить существенное улучшение характеристик двигателя, в том числе на режимах холодного пуска [8], а также была положена в основу алгоритма адаптивного управления [5].

Однако приведенный метод предоставляет информацию о динамических свойствах двигателя и может быть использован для оценки систем смесеобразования. В работе [4] приводятся данные по такой оценке смесеобразования на режиме прогрева двигателя с системой распределенного впрыскивания топлива во впускной трубопровод. При этом было исследовано влияние различного направления топливного факела и характеристик испаряемости топлива на динамическое управление двигателем. В качестве возмущающего динамического воздействия на двигатель в процессе стендовых экспериментов использовалось быстрое (1 с) перемещение дроссельной заслонки из фиксированных положений при стабилизированной частоте вращения вала двигателя. Динамическая реакция двигателя определялась по сигналу широкополосного кислородного датчика ( $\lambda$ -метра) UEGO (universal exhaust oxygen sensor), установленного в выпу-

скающей системе двигателя и определяющего текущий состав смеси, поступившей в цилиндры. Такая процедура должна проводиться без компенсации задержек топлива во впускной системе и имеет смысл только для режимов устойчивой работы двигателя, т.к. возможные пропуски воспламенения в цилиндрах двигателя вносят искажения в показания кислородного датчика, что в свою очередь вызывает недопустимые погрешности в определении параметров динамической модели. Очевидно, для режимов холодного пуска двигателя такая процедура неприемлема как вследствие того, что нестабильность работы двигателя в таких условиях повышается, так и по причине отклонения процедуры от реальной – пуск двигателя происходит при постоянном положении дроссельной заслонки. Для исследований режимов пуска подходит тестовое возмущающее воздействие в виде “ступенчатого” изменения топливоподачи в пределах устойчивой работы двигателя на данном режиме. Правомочность такого подхода экспериментально проверена автором и подтверждается рядом исследований [8–10]. Такой подход был принят за основу в предлагаемом методе.

## Цель исследований

Целью исследований являлась разработка метода быстрой оценки смесеобразования во впускных системах бензиновых двигателей внутреннего сгорания с преимущественным использованием для исследования режимов холодного пуска и прогрева двигателя.

## Модель топливной пленки

Известно, что каждому установившемуся режиму работы двигателя, характеризуемого нагрузкой, скоростью вращения коленчатого вала, тепловым состоянием двигателя, соответствует вполне определенное количество топлива, находящегося в виде пленки на стенках впускного тракта. Переход от одного режима к другому приводит к переходному процессу по массе топливной пленки, что приводит к рассогласованию между количеством топлива, пода-

ваемого топливodosирующим устройством, и количеством топлива, поступающего в цилиндры.

Согласно принятой модели часть топлива  $X$ , впрыснутого форсункой, оседает на стенках впускного тракта в виде топливной пленки  $m_{in} = X \times G_{met}$ , а оставшаяся часть  $(1-X)$  увлекается воздушным потоком в цилиндры в виде пара и мелких капель. Унос топлива из топливной пленки осуществляется благодаря испарению и простому перетеканию по стенкам к впускному клапану. Скорость уноса принимается пропорциональной массе топливной пленки  $m_{out} = m/\tau$ . Поясняющая схема приведена на рис. 1.

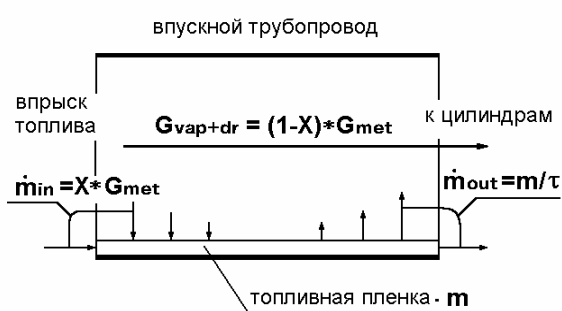


Рис. 1. Схема транспортировки топлива во впускном трубопроводе

Основные уравнения следующие:

$$G_{cyl} = G_{met} - dm/dt, \quad (1)$$

$$dm/dt = X \times G_{met} - m/\tau, \quad (2)$$

где  $G_{cyl}$  - расход топлива, поступающего в цилиндры двигателя;

$G_{met}$  - расход топлива, подаваемого топливodosирующим устройством;

$m$  - масса топливной пленки на стенках впускного тракта;

$X$  - доля топлива, оседающего на стенках в виде топливной пленки (параметр м.м.);

$\tau$  - постоянная времени топливной пленки (параметр м.м.);

$t$  - время.

Для стационарного режима работы двигателя при известных параметрах  $X$  и  $\tau$  справедливо выражение

$$m_{ss} = G_{met} \times X \times \tau, \quad (3)$$

где  $G_{met}$  - секундный расход топлива;

$m_{ss}$  - масса топливной пленки на стенках впускного тракта на стационарном режиме.

Применительно к стартерному режиму уравнение (3) дает оценку массы топливной пленки к моменту начала разгона двигателя, если в качестве  $\tau$  принять время появления первых вспышек в цилиндрах двигателя.

Таким образом, измеряя массовый расход воздуха на впуске и соотношение воздух/топливо рабочей смеси в цилиндрах двигателя, например, по показаниям  $\lambda$ -метра в процессе выполнения тестовой процедуры, можно рассчитать параметры математической модели  $X$  и  $\tau$  и, следовательно, массу настенной топливной пленки, характерную для данного теплового, скоростного и нагрузочного режима двигателя. Причем параметры модели  $X$  и  $\tau$ , а также рассчитанная удельная масса настенной пленки, отнесенная к цикловой подаче топлива, будут характеризовать степень совершенства применяемой конструкции и могут использоваться в качестве одного из критериев сравнительной эффективности при выборе систем смесеобразования или их компонентов.

### Процедура эксперимента и обработка данных

Отработка методики эксперимента проводилась на моторном стенде холодильной камеры при температурах до  $-20^\circ\text{C}$  с использованием 4-цилиндрового двигателя –  $V_h = 1.5$  л, 16 клапанов и системы распределенного впрыскивания топлива. Стенд оборудован электрической балансирной машиной, позволяющей поддерживать заданный скоростной режим независимо от нагрузки.

Процедура проведения эксперимента включала в себя:

- стабилизацию температуры двигателя и его компонентов при температуре испытаний;
- пуск двигателя от динамометра (сцепление включено) и быстрый выход ( $20 \div 30$  с) на заданный режим по частоте вращения коленчатого вала и составу смеси. Положения регулятора холостого хода и дроссельной заслонки устанавливаются до начала эксперимента;

- прогрев двигателя до рабочей температуры ( $t_{о.ж.} = 80^{\circ}\text{C}$ ) при постоянных частоте вращения коленчатого вала и регуляторов наполнения двигателя;
- при окончании процедуры двигатель прогревается под нагрузкой 50% при  $N = 2000 \text{ мин}^{-1}$  в течение 10 мин для подготовки следующего эксперимента

В процессе прогрева производится ступенчатое изменение подачи топлива по команде управляющего компьютера. Очередное переключение по составу смеси производится после достижения стабилизации показаний  $\lambda$ -метра UEGO ( $10 \div 15 \text{ с}$ ).

При испытаниях измеряются с непрерывной регистрацией данные по частоте вращения вала двигателя ( $N$ ), составу смеси по сигналу кислородного датчика ( $\lambda$ ), расходу воздуха, длительности открытия форсунок (INJ), температуре охлаждающей жидкости ( $T_{о.ж.}$ ), воздуха, топлива.

На рис. 2 приведен пример записи измеряемых параметров в процессе проведения эксперимента со ступенчатым изменением подачи топлива.

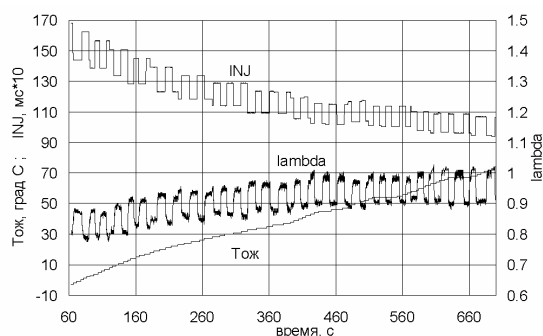


Рис. 2. Пример записи измеряемых параметров при выполнении тестовой процедуры

Для поддержания состава смеси, близкого к реальному в процессе эксперимента по мере прогрева двигателя проводилось ступенчатое уменьшение базовой подачи топлива с интервалами 30 ч 60 с. Благодаря применению быстродействующего анализатора смеси LA-4 (90% сигнала менее чем за 0.05 с) и системы скоростного сбора данных ф. ETAS (частота опроса на измерительный канал до 100 Гц) измеряемый сигнал по составу смеси фиксировался практически без искажений. На рис. 3 приведен фрагмент записи сигнала анализатора смеси.

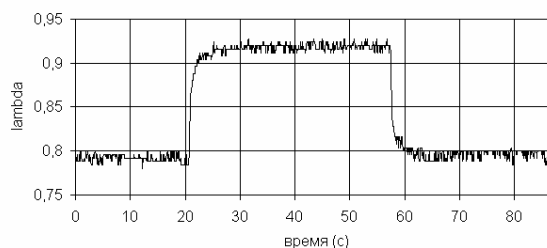


Рис. 3. Фрагмент записи сигнала  $\lambda$ -метра

После обработки измеренных значений  $\lambda$ -метра и расходомера воздуха получается сигнал переходного процесса по расходу топлива. Выделенный полезный сигнал в свою очередь подвергается обработке по методу минимизации суммы квадратичных отклонений с процедурой оптимизации по методу Нелдера-Мида в целях аппроксимации экспериментальной кривой экспоненциальной функцией. Подобранные таким образом коэффициенты экспоненты и являются параметрами модели для данного режима работы двигателя. На рис. 4 приведен выделенный полезный сигнал и его аппроксимация по описанной выше процедуре.

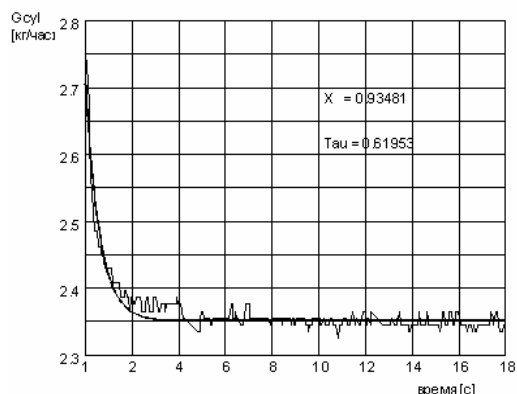


Рис. 4. Аппроксимация переходного процесса

### Результаты исследований

Оценка смесеобразования по приведенной выше методике была проведена для режима прогрева двигателя на холостом ходу при частоте вращения вала  $N = 1000 \text{ мин}^{-1}$  после его пуска при  $t = -10^{\circ}\text{C}$ .

В результате были определены зависимости параметров  $X$  и  $\tau$  от температуры охлаждающей жидкости  $t_{о.ж.}$ , измеряемой стандартным датчиком ЭСУД (см. рис. 5). На графике приводятся как эксперимен-

тальные данные после обработки, так и их линейная аппроксимация.

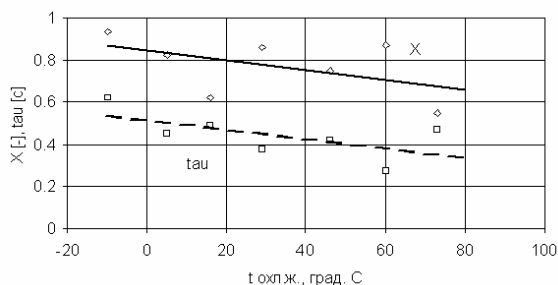


Рис. 5. Зависимость параметров  $X$  и  $\tau$  от температуры охлаждающей жидкости

Несмотря на некоторый разброс данных, присутствует определенная закономерность в изменении параметров. Как видно с прогревом двигателя происходит существенное изменение параметров  $X$  и  $\tau$ , что является следствием изменения условий смесеобразования. Доля топливной пленки  $X$ , характеризующая интенсивность процессов пленкообразования во впускных каналах, в среднем уменьшается с  $X = 0.88$  при  $t = -10^\circ\text{C}$  до  $X = 0.66$  при  $t = 80^\circ\text{C}$ . Таким образом, при  $t = -10^\circ\text{C}$  даже на режиме холостого хода в двигатель в виде испаренного топлива по данной оценке попадает лишь 12% от поданного количества. Постоянная времени топливной пленки  $\tau$ , характеризующая скорость реакции двигателя на изменение топливоподачи, уменьшилась при этом в среднем с  $\tau = 0.53$  с при  $t = -10^\circ\text{C}$  до  $\tau = 0.32$  с при  $t = 80^\circ\text{C}$ .

Как уже упоминалось ранее, более универсальным параметром, характеризующим качество смесеобразования, может служить приведенная масса топливной пленки, скапливающейся на стенках впускных каналов на том или ином стационарном режиме работы двигателя –  $M_{\text{пр}}$ , выраженная в эквивалентах цикловой подачи топлива на данном режиме (см. рис. 6). Обозначения “0.8/0.9” и “0.9/0.8” соответствуют процедуре переключения состава смеси при эксперименте с  $\lambda=0.8$  на  $\lambda=0.9$ , и наоборот.

Как видно, на данном режиме масса топливной пленки достигает 17-18 цикловых подач при  $t = -10^\circ\text{C}$  и уменьшается до 9-10 при  $t = 80^\circ\text{C}$  и, таким образом,

в процессе прогрева двигателя приведенная масса топливной пленки уменьшается практически в два раза. Реально в процессе прогрева двигателя изменение массы топливной пленки может быть еще большим в связи с обеднением состава смеси при прогреве до  $\lambda = 1.0$  и более. Такую оценку при необходимости можно сделать, выполняя процедуру переключения в районе  $\lambda = 1.0$ .

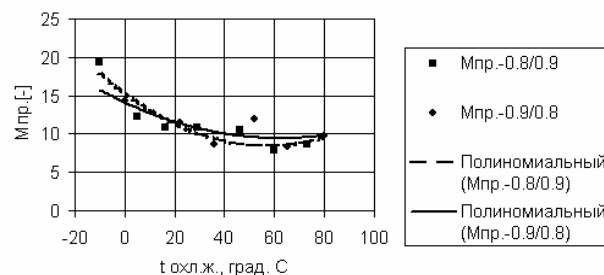


Рис. 6. Изменение массы топливной пленки  $M_{\text{пр}}$  при прогреве двигателя

Таким образом, выполняя описанную экспериментально-расчетную процедуру на двигателях с опытными системами смесеобразования (например электроподогрев топливовоздушной смеси, топливные форсунки с улучшенными параметрами смесеобразования и т.д.), можно количественно оценивать эффективность этих систем, в том числе в отношении влияния на динамические качества двигателя.

## Выводы

1. Представление процессов смесеобразования во впускной системе бензиновых двигателей с использованием математической феноменологической модели образования топливной пленки на стенках впускных каналов имеет ряд полезных применений. Такой подход потенциально позволяет

- модернизировать алгоритм управления топливоподачей на динамических режимах работы двигателя, включая холодный пуск;
- автоматизировать поиск оптимальных калибровок топливоподачи при пуске, что в свою очередь позволит облегчить и сократить затраты на проведение калибровочных работ;

– разработать алгоритм самоадаптации к качеству используемого топлива в процессе эксплуатации автомобиля;

– количественно оценивать эффективность различных систем питания в отношении качества смешения на динамических режимах;

– проводить экспресс-анализ технического состояния систем питания и характеристик применяемого топлива, влияющих на динамические показатели и пусковые качества двигателя.

2. Проведенные расчетно-экспериментальные исследования показали заметный разброс рассчитываемых параметров математической модели и чувствительность к выбору параметров переходного процесса (установившиеся значения до и после переключения состава смеси, момент переключения). Для уменьшения разброса и получения однозначных результатов необходимо уточнить расчетные методы и ввести критерии параметров переходного процесса по составу смеси во время тестовой процедуры.

Автор выражает признательность и благодарит проф. Б.Я. Черняка ТУ МАДИ г. Москва за ценные дискуссии и методологическую поддержку, инж. И.В. Бурцева НТЦ АВТОВАЗ г. Тольятти за содействие в проведении расчетных исследований, а также сотрудников управления проектирования двигателя НТЦ АВТОВАЗ, участвовавших в проведении экспериментов.

### Литература

1. Laurikko J. Emissions Performance of Current TWC Vehicles at Low Ambient Temperature over FTP and ECE Test Cycles // SAE Pap. No 940933.

2. Kemmler R., Waltner A., Schon C., Godwin S. Current Status and prospects for gasoline Engine Emission Control Technology – Paving the Way for Minimal Emissions // SAE Pap. No 2000-01-0856.

3. Kishi N., Kikuchi S., Suzuki N., Hayashi T. Technology for Reducing Exhaust Gas Emission in Zero Level Emission Vehicles (ZLEV) // SAE Pap. No 1999-01-0772.

4. Russ S., Stevens J., Aquino C., Curtis E., Fry J. The Effects of Injector Targeting and Fuel Volatility on Fuel Dynamics in a PFI Engine During Warm-Up: Part 1, 2 // SAE Pap. No 982518, 982519.

5. Moraal P., Meyer D., Cook J., Rychlick E. Adaptive Transient Fuel Compensation: Implementation and Experimental Results // SAE Paper No 2000-01-0550.

6. Aquino C.F. Transient A/F Control Characteristics of the 5 Liter Central Fuel Injected Engine // SAE Pap. No 810494.

7. Hires S.D. and Overington M.T. Transient Mixture Strength Excursions - An Investigation of Their Causes and the Development of a Constant Mixture Strength Fueling Strategy // SAE Pap. No 810495.

8. Horie K., Takahashi H. and Akazaki S. Emissions Reduction During Warm-Up Period by Incorporating a Wall-Wetting Fuel Model on the Fuel Injection Strategy During Engine Starting // SAE Pap. No 952478.

9. Neyachenko I. Method of A/F Control During SI Engine Cold Start // SAE Pap. No 982521.

10. Shayler P.J., Teo Y.C., Scarisbrick A. Fuel Transport Characteristics of Spark Ignition Engines for Transient Fuel Compensation // SAE Pap. No 950067.

*Поступила в редакцию 19.05.03*

**Рецензенты:** канд. тех. наук, доц. кафедры "Тепловые двигатели" Скирков Н.Д., Государственный технический университет г. Тольятти; канд. тех. наук, директор проекта НТЦ ОАО "АВТОВАЗ" Коржов М.А., ОАО "АВТОВАЗ", г. Тольятти.