

Таким образом, проблему использования смазочных материалов следует рассматривать не только как техническую и экономическую, но в значительной степени как экологическую, где одним из эффективнейших способов предотвращения загрязнения окружающей среды есть максимальное вовлечение ОСМ в переработку.

#### **Литература:**

1. Данилов-Данильян В.И., Горшков В.Г., Арский Ю.М. и др. Окружающая среда между прошлым и будущим: мир и Россия. – М.: ВИНТИ, 1994.
2. Картошкин А.П. Экономия энергетических ресурсов путём создания и реализации комплексной технологии регенерации отработанных смазочных масел для автотракторной техники: Автореф. дис. ... д-ра техн. наук. – С-Пб: 2002 – 50 с.
3. Сурин С.А. Отработанные масла: вторая жизнь // Мир нефтепродуктов. – 2000.-№2 – С.22...24.
4. Фукс Г.И., Евдокимов А.Ю., Лашхи В.Л. Экологические проблемы рационального использования смазочных материалов. – М.: Издательство «Нефть и газ», 1993.-164 с.
5. Юзефович В.И. Организация сбора отработанных масел // Мир нефтепродуктов. – 2001. - №3. – С.28...30.
6. Baklyng P., Holmbom B., Lieppjakosky A. The Baltic Sea Environment/ National Environmental Protection Agency, 1996, Sweden, № 5, p. 26.

## **ХИМИЧЕСКИЙ ТУРБУЛЕНТНЫЙ ТЕПЛОМАССОБМЕН В ДВС**

**Чесноков С.А., Потапов С.А., Тишин С.А.**

(Тульский государственный университет)

Необходимость уменьшения токсичных выбросов тепловых двигателей требует описания процесса горения на уровне задач турбулентного теплообмена с использованием методов химической кинетики горения. Определяющим токсичность процессом в условиях ДВС является процесс турбулентного перемешивания и догорания за фронтом горения и в процессе расширения вплоть до выхлопа. Решение проводится для перспективного ДВС типа Mitsubishi Galant GDI - с прямым впрыском топлива в цилиндр. Приняты следующие основные допущения:

1. В условиях высоких давлений (~ 5 МПа) за счет эффективного обмена энергией при многочисленных соударениях молекул равновесное распределение молекул по энергиям не нарушается, несмотря на интенсивные химические реакции. Поэтому внутри продуктов сгорания устанавливаются общие для всех компонентов поля температур.

2. В связи с небольшой скоростью течения (менее 50 м/с) в зоне продуктов сгорания пренебрегаем кинетической энергией газа по сравнению с внутренней. Кроме того, учитывая сравнительно небольшие различия температур в пределах поля решения, теплоемкость смеси считаем постоянной. Излучением пренебрегаем.

3. Эффекты термо- и бародиффузии, а также диффузионную теплопроводность и перенос энергии диффузионным потоком не учитываем.

4. Поля турбулентных коэффициентов переноса определяем при решении транспортных уравнений  $k-\varepsilon$  модели турбулентности [1] по известным полям скорости, полученным для нереагирующей смеси с помощью программы GAS-2 проф. Дунаева В.А. В трехмерных задачах для сокращения машинного времени поля коэффициентов переноса задаем как однородные, используя среднюю по

объему кратность коэффициента турбулентного обмена (КТО)  $\bar{N}_T(\tau)$ . Считаем, что изменение турбулентного коэффициента температуропроводности смеси  $a_T$  определяется только турбулентной теплопроводностью  $\lambda_T$ , поскольку плотность  $\rho$  по сравнению с  $\lambda_T$  меняется незначительно.

5. Термическое сопротивление ламинарного подслоя было учтено в виде простого соотношения стационарной теплопередачи в форме граничного условия 4-го рода.

6. Догорание горючих компонентов смеси за фронтом пламени характеризуется 26 ведущими реакциями для 14 компонентов.

7. Компоненты и смесь в целом являются идеальными газами.

Математическое описание химического турбулентного тепломассообмена (ХТТ), полученное на основе общих уравнений теории взаимнопроникающих континуумов Р.И. Нигматулина, выглядит следующим образом:

$$\frac{\partial T}{\partial \tau} + u \frac{\partial T}{\partial x} + w \frac{\partial T}{\partial y} + v \frac{\partial T}{\partial z} = \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( a_T \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( a_T \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( a_T \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right] + F_Q;$$

$$\frac{\partial g_i}{\partial \tau} + u \frac{\partial g_i}{\partial x} + w \frac{\partial g_i}{\partial y} + v \frac{\partial g_i}{\partial z} = \frac{1}{\rho} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \rho D_T \frac{\partial g_i}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \rho D_T \frac{\partial g_i}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \rho D_T \frac{\partial g_i}{\partial z} \right) \right] + F_{Mi};$$

$$F_Q = \frac{1}{c_p} \left[ \sum_j H_j (S_j^p - S_j^o) + \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial \tau} \right]; \quad F_{Mi} = \mu_i \sum_j (\pm S_j^p \mp S_j^o).$$

где  $F_Q$  и  $F_{Mi}$  – источники теплоты и массы компонентов, возникающие за счет химических реакций;  $H_j$  – тепловые эффекты реакций. Начальные условия - в небольшой зоне вокруг точки зажигания, в зависимости от местного значения коэффициента избытка воздуха  $\alpha$ , задаются:  $T_n = T_G(\alpha)$ ;  $g_{ni} = g_i(\alpha)$ . Граничные условия: на поверхности стенки  $T = T_0$ ;  $\partial g_i / \partial n = 0$ ; на выходе фронта горения:  $T_F = T_G(\alpha)$ ;  $g_{Fi} = g_i(\alpha)$ . На выходе фронта горения состав смеси, за исключением оксида азота NO (и кислорода O<sub>2</sub>), считаем равновесным [1]. Учтено наличие остаточных газов в горючей смеси.

Турбулентные характеристики переноса определяются средней кратностью КТО  $N_T(\tau)$ :  $a_T = a_{\text{ЛАМ}} \cdot N_T$ ;  $D_T = D_{\text{ЛАМ}} \cdot N_T$ . Для скорости реакций имеем:

$$S_j^{p,o} = k_j^{p,o} g_\alpha g_\beta / (\mu_\alpha \mu_\beta); \quad k_j^{p,o} = \kappa A T^n \exp(-E / RT),$$

где  $\kappa$  - коэффициент, учитывающий влияние турбулентных пульсаций температур [1]. На основе детального кинетического механизма (ДКМ) горения легких углеводородов в условиях ДВС проф. Басевича В.Я. [2] при имитации догорания в рамках нульмерной кинетики определен сокращенный ДКМ для догорания смеси за фронтом пламени (табл.).

Математическая модель включает 15 уравнений и позволяет произвести расчет полей температуры и массовых долей 14-ти компонентов: H, H<sub>2</sub>, OH, HO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, HCO, O, O<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub>, NO, N, N<sub>2</sub>.

Таблица. Ведущие реакции догорания

Реакции		Реакции		Реакции
OH+H <sub>2</sub> ↔H+H <sub>2</sub> O	10	OH+HO <sub>2</sub> ↔O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	19	H+CO↔HCO
OH+O↔H+O <sub>2</sub>	11	OH+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ↔HO <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	20	HCO+O <sub>2</sub> ↔HO <sub>2</sub> +CO
OH+H↔O+H <sub>2</sub>	12	OH+OH↔H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	21	OH+HCO↔CO+H <sub>2</sub> O
OH+OH↔O+H <sub>2</sub> O	13	O+H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> ↔O <sub>2</sub> +H <sub>2</sub> O	22	H+HCO↔H <sub>2</sub> +CO
OH+H↔H <sub>2</sub> O	14	HO <sub>2</sub> +HO <sub>2</sub> ↔H <sub>2</sub> O <sub>2</sub> +O <sub>2</sub>	23	N+NO↔N <sub>2</sub> +O

	$\text{H} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{H}_2 + \text{O}_2$	15	$\text{CO} + \text{OH} \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$	24	$\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$
	$\text{H} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{H}_2\text{O}$	16	$\text{CO} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{OH}$	25	$\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$
	$\text{H} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{OH} + \text{OH}$	17	$\text{CO} + \text{O} \leftrightarrow \text{CO}_2$		
	$\text{O} + \text{HO}_2 \leftrightarrow \text{O}_2 + \text{OH}$	18	$\text{CO} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{CO}_2 + \text{O}$		

Рассмотрим особенности выхлопа и выпуска. При открытии выпускного клапана большая часть продуктов сгорания быстро выбрасывается в выпускную магистраль (выхлоп) и затем, вместе с принудительно вытесняемыми газами, уходит через нее в атмосферу (выпуск). Учитывая, что основное ( $> 90\%$ ) изменение содержания CO (и NO) наблюдается в процессах горения и расширения, рассмотрена упрощенная постановка задачи выхлопа и выпуска. Предположим, что быстрый процесс выхлопа, продолжительностью  $< 2$  мс, является внешне адиабатическим процессом, происходящим без теплообмена с поверхностью цилиндра, поршня и клапана. Примем, что при выхлопе смесь мгновенно перемешивается и становится идеально однородной. При этом в ней ускоряются химические реакции, в частности, окисление CO с выделением тепла. Этот процесс выхлопа можно описать в рамках нульмерной кинетики реакций догорания, вычисляя по известной из эксперимента кривой давления на каждом шаге по времени адиабатную температуру и выделение теплоты химических реакций в течение шага, повышающее эту температуру.

Проведем анализ результатов. Динамика изменения средних по объему температуры и содержания основных компонентов в процессах горения, расширения и выпуска изображена на рис. 1. Основное падение температуры  $T$  и содержания CO и OH наблюдается в процессах горения и расширения. Компоненты активно реагируют между собой с образованием диоксида углерода  $\text{CO}_2$ .

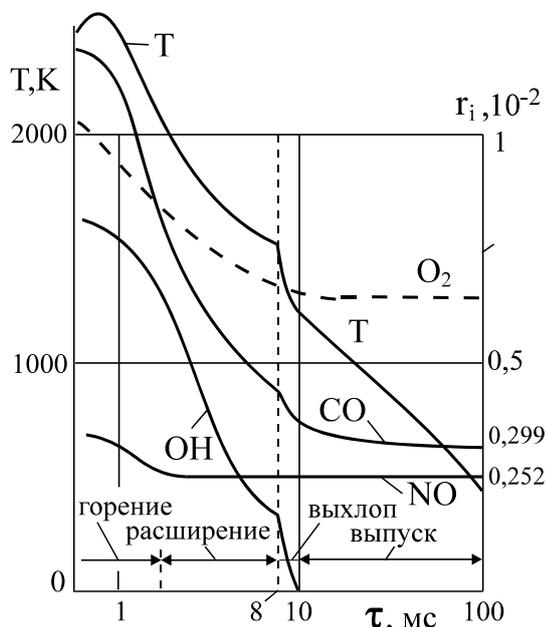


Рис. 1. Изменение средних в объеме цилиндра температуры и мольных долей основных компонентов во времени процесса – от горения до выпуска ( $\alpha_{\text{ср}} = 1,00$ ;  $\alpha = 0,90-1,06$ )

Расходование радикала OH (и O) происходит за счет кислорода  $\text{O}_2$ , содержание которого уменьшается. В процессах выхлопа и выпуска доля CO несколько снижается, причем это заметно даже после выхлопа, при  $\tau > 10$  мс, то есть на начальном участке выпускной магистрали, что подтверждается известными экспериментальными данными. На остальной длине магистрали содержание CO остается постоянным из-за "замораживания"

реакций при температурах менее 1000 К. Этот же эффект определяет постоянное содержание оксида азота NO при температурах менее 2200...2400 К.

Поле коэффициента избытка воздуха  $\alpha$  в камере сгорания (КС) перед зажиганием (рис. 2,а), полученное при решении задачи впрыска топлива через форсунку и его испарения, неоднородное и имеет богатую (вверху) и бедную (внизу) области; W – направление впрыска, S – точка зажигания.

К концу горения турбулентное поле скорости в КС (рис. 2,б) имеет вихревую зону с центром  $C_1$ . Пунктиром выделены зоны источников теплоты или массы компонента: положительные (+) и отрицательные (-). Температура 2230 К (в) является температурой границы турбулентного поля решения и ламинарного подслоя у стенки (толщиной всего  $\sim 0,1$  мм).

Для нескольких контрольных точек поля решения 1 - 4 проведен анализ скоростей химических реакций. Низкие температуры пограничного слоя определяют меньшие скорости реакций, но из-за их неуравновешенности суммарные (по всем реакциям) скорости образования большинства компонентов в несколько раз больше, чем в объеме КС.

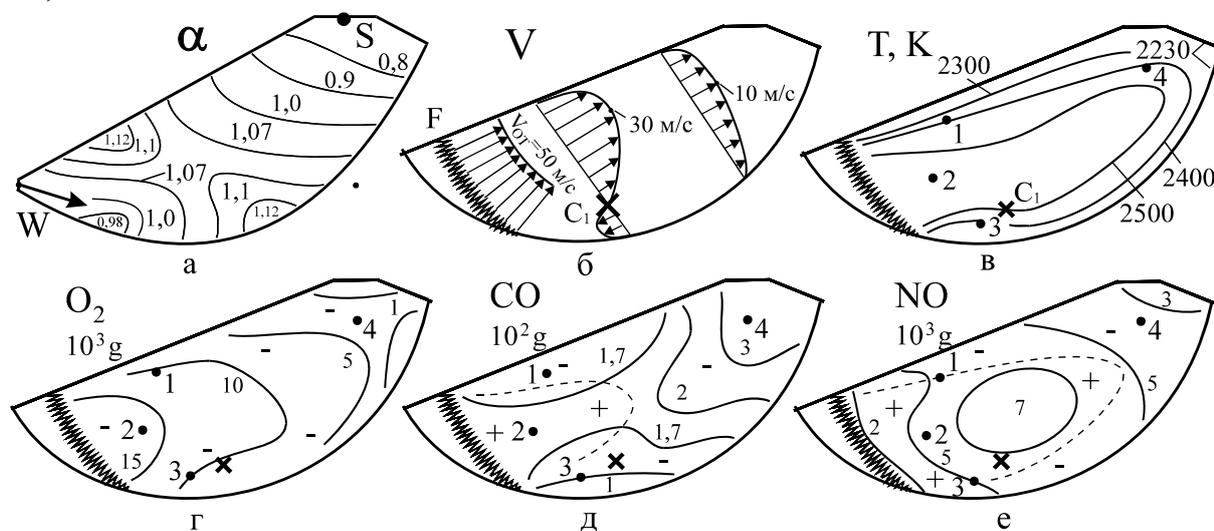


Рис. 2. Поле коэф. избытка воздуха в топливной смеси (а), а также поля скорости (б), температуры (в) и массовых долей основных компонентов (г-е) в камере сгорания для конца горения ( $\tau = 1$  мс;  $n = 3000$  об/мин)

Наибольшая концентрация окиси углерода сохраняется в верхней части КС, где горела богатая топливная смесь (а). В основном поле камеры доля CO снижается во времени под влиянием ведущих реакций догорания:  $CO + OH \rightarrow CO_2 + H$ ,  $CO + NO_2 \rightarrow CO_2 + OH$ ,  $CO + O \rightarrow CO_2$  и  $H + CO \rightarrow HCO$ . В пограничном слое для первых двух реакций результирующие скорости (разность скоростей прямой и обратной реакций) возрастают в несколько раз, в результате чего выгорание CO ускоряется. Максимальное содержание оксида азота наблюдается в зоне, где горела стехиометрическая горючая смесь. В области высоких температур все реакции  $N_2 + O \rightarrow NO + N$ ,  $N + O_2 \rightarrow NO + O$ ,  $N + OH \rightarrow NO + H$  интенсивно генерируют оксид азота. Вдали от фронта горения концентрация NO уменьшается под воздействием реакций раскисления азота:  $N + NO \rightarrow N_2 + O$ ,  $H + NO \rightarrow OH + N$ .

В центре вихрей конвективное перемешивание отсутствует, реакции расщедования радикалов замедляются, что способствует сохранению их повышенной концентрации. В отличие от радикалов, поля молекулярных компонентов: кислорода  $O_2$  (и NO),  $CO_2$ ,  $H_2O$  и др. определяются в основном конвекцией и турбулентной диффузией. Для всех компонентов результирующие скорости ведущих реакций максимальны в зоне высоких температур. В турбулентном пограничном слое,

в отличие от периода горения, значения результирующих скоростей реакций на порядок ниже, тем не менее суммарная скорость расходования каждого компонента (кроме NO) по абсолютной величине на порядок выше. Это определяет, в частности, интенсивное выгорание оксида углерода CO в пограничном слое. Заметное раскисление оксида азота NO наблюдается в зоне высоких температур ( $> 2000$  K).

Результаты для отработавших газов (ОГ) приведены ниже. Расчеты для однородных полей  $\alpha = \text{const}$  в КС (рис. 4) показали небольшое отличие содержания CO, NO и O<sub>2</sub> от известных экспериментальных данных. Данные по содержанию CO и NO, представленные на диаграмме рис. 5, позволяют произвести предварительный прогноз уровня токсичности ОГ для данного ДВС по заданным характеристикам поля  $\alpha$  перед зажиганием, полученного в монографии [1]: среднему в объеме КС значению  $\alpha_{\text{ср}}$  и величине неоднородности поля  $\Delta\alpha = \alpha_{\text{макс}} - \alpha_{\text{мин}}$ . Возможен и обратный подход – по заданной токсичности ОГ определить необходимые значения  $\alpha_{\text{ср}}$  и  $\Delta\alpha$ , которые должна обеспечить система впрыска. Результаты, полученные при решении задачи впрыска показывают, что неоднородность  $\Delta\alpha$  можно изменять, варьируя, например, продолжительность впрыска.

В процессе расширения смеси (рис. 3) образуются две вихревых зоны (а) с центрами C<sub>1</sub> и C<sub>2</sub> с противоположным вращением. Максимум температуры T (б) наблюдается в центре основного вихря.

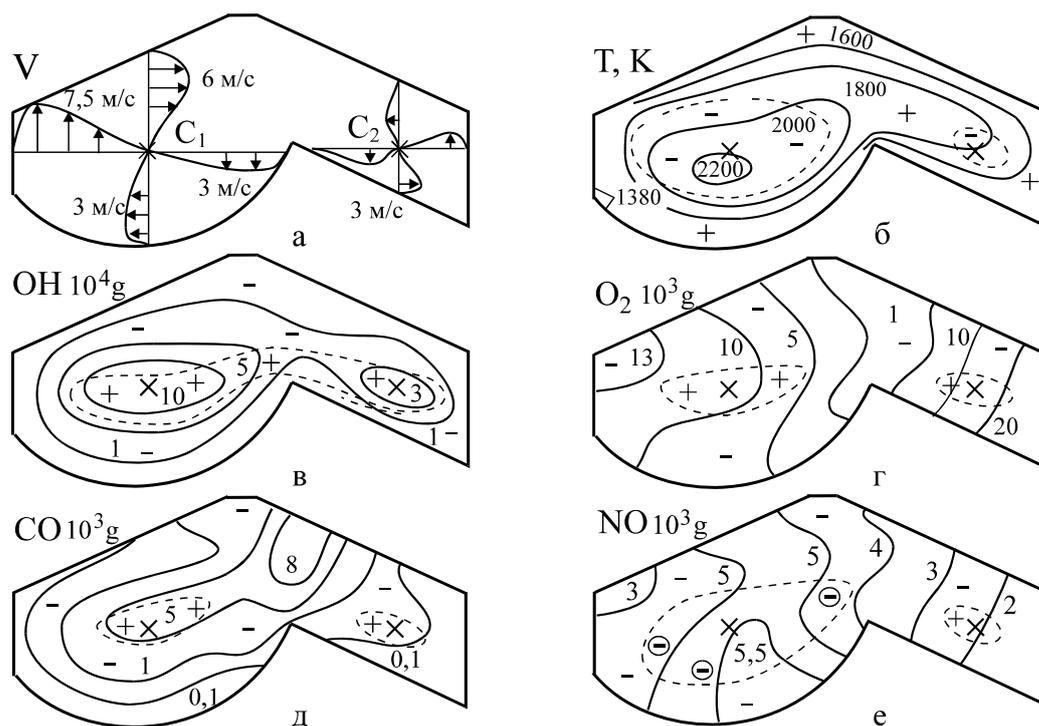


Рис. 3. Поля скорости (а), температуры (б) и массовых долей компонентов (г-з) в диаметральной плоскости цилиндра двигателя GDI для середины такта расширения ( $\tau = 4$  мс;  $n = 3000$  об/мин) NO<sub>2</sub>, OH, O и CO формируются быстрыми химическими реакциями с участием этих компонентов.

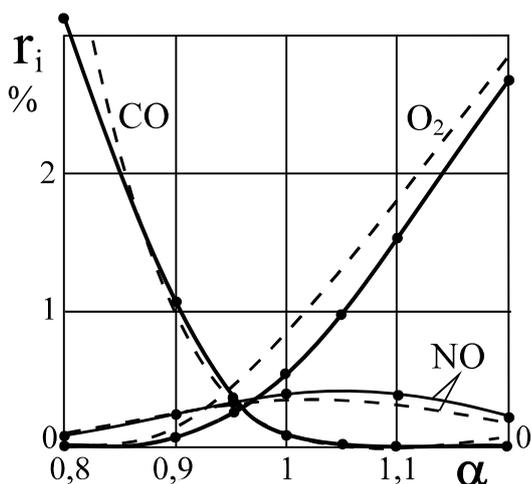


Рис. 4. Объемное содержание компонентов в ОГ при однородных полях  $\alpha$ :  
 —• расчеты для ВАЗ-21011;  
 - - - экспериментальные данные [3]

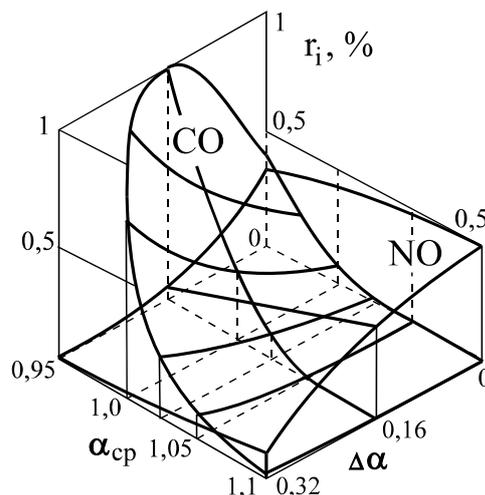


Рис. 5. Объемное содержание оксидов в ОГ при различных значениях  $\alpha_{cp}$  и неоднородности поля  $\Delta\alpha$  ( $n = 3000$  об/мин)

### Литература:

1. Чесноков С.А. Химический турбулентный теплообмен в ДВС. – Тула: Изд-во ТулГУ, 2005. – 466 с.
2. Басевич В.Я., Веденеев В.И., Арутюнов В.С. Моделирование задержек самовоспламенения метановоздушных смесей в двигателе внутреннего сгорания // ФГВ. – 1994. - № 2. - С. 7-14.
3. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей / Вырубов Д.Н., Иващенко Н.А., Ивин В.И. и др. Под ред. Орлина А.С., Круглова М.Г. – М.: Машиностроение, 1983. - 372 с.

## 7. ГАЗОВАЯ ДИНАМИКА, ВОЗДУХОСНАБЖЕНИЕ, НАДДУВ

### УЛУЧШЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДВИГАТЕЛЯ ВАЗ-2112 С ПОМОЩЬЮ НАДДУВА ПРИВОДНЫМ КОМПРЕССОРОМ ЦЕНТРОБЕЖНОГО ТИПА

Галышев Ю. В., Сидоров А. А., Пономарев А. С.

(Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)

Повышение динамических и экономических характеристик бензиновых ДВС с обеспечением допустимого уровня токсичности отработавших газов возможно применением механического наддува и оптимизацией фаз газораспределения.

Механический наддув бензиновых ДВС в области своей эффективной работы, а это область низких давлений наддува до  $P_k=0,15$  МПа, имеет некоторые преимущества перед газотурбинным наддувом (ГТН). Во-первых, механический привод улучшает динамические качества двигателя, во-вторых, сравнительно небольшая степень форсирования позволяет применять механический наддув на большинстве серийных бензиновых двигателях без значительного изменения конструкции их деталей. Такая модернизация двигателя дешевле, чем применение ГТН. овым ремнем с передаточным