
ВЛИЯНИЕ НИЗКО- И ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ РЕЦИРКУЛЯЦИИ ОГ НА РАБОЧИЙ ПРОЦЕСС ДВС

С.В. Гусаков, П.Р. Вальехо Мальдонадо, А.М. Довольнов

Кафедра комбинированных ДВС
Российский университет дружбы народов
Ул. Миклухо-Маклая, 6, Москва, Россия, 117198

Рассмотрено влияние температуры рециркулирующих отработавших газов (ОГ) на параметры рабочего процесса в поршневых двигателях. Рециркуляция ОГ важна не только как один из методов снижения токсичности отработавших газов ДВС, но и способ управления рабочим процессом двигателей с самовоспламенением гомогенного заряда (НССИ).

В последние десятилетия рециркуляция отработавших газов все шире применяется для снижения токсичности отработавших газов (в основном для снижения выбросов оксидов азота NO_x) как двигателей с искровым зажиганием, так и дизелей. В двигателях с традиционными рабочими процессами, как правило, реализуется схема подвода отработавших газов по внешнему трубопроводу, соединяющему выпускной и впускной коллекторы. Изменение количества рециркулирующих газов осуществляется специальным клапаном по сигналам блока электронного управления двигателя в зависимости от скоростного, нагрузочного режимов работы и других параметров ДВС. Отработавшие газы, проходя по системе рециркуляции, охлаждаются, и в этом случае можно говорить о низкотемпературной рециркуляции. Эффект от подмешивания к свежему заряду отработавших газов — продуктов сгорания с низкой температурой при этом можно рассматривать как разбавление свежей смеси инертным газом, в основном состоящем из азота, диоксида углерода и паров воды. В результате увеличения балласта снижается температура горения топлива и, как следствие, уменьшаются выбросы с ОГ оксидов азота, термический механизм образования которых является преобладающим в условиях ДВС.

В двигателях с НССИ-процессом, в котором реализуется самовоспламенение от сжатия, предварительно подготовленной топливовоздушной смеси, также применяется рециркуляция ОГ, однако при этом преследуются другие цели. Условием организации НССИ-процесса является высокая температурная и концентрационная однородность смеси перед воспламенением, вследствие чего реакции самовоспламенения протекают практически одновременно по всему объему камеры сгорания. Скорость сгорания, определяемая только кинетикой химических реакций, очень высока, и все поданное в двигатель топливо окисляется за крайне малый угол поворота коленчатого вала (ПКВ), который составляет на большинстве режимов работы менее 10 град ПКВ. При малых значениях коэффициента избытка воздуха это приводит к недопустимо высоким значениям скорости нарастания давления и максимального давления цикла. Добавка инертного разбавителя (рециркуляция ОГ) снижает скорость тепловыделения, позволяя увеличить мощность двигателя без превышения допустимых нагрузок на кривошипно-шатунный механизм двигателя.

Однако есть еще один аспект применения рециркуляции ОГ в двигателях с НССИ-процессом. Дело в том, что в области получения высоких индикаторных показателей рабочего цикла ДВС с самовоспламенением гомотенного заряда важной проблемой является обеспечение оптимального расположения процесса тепловыделения по углу ПКВ относительно ВМТ конца сжатия. Отсутствие таких управляющих факторов, как угол опережения зажигания в двигателях с принудительным воспламенением или угол опережения впрыскивания топлива в дизелях, требует поиска иных методов воздействия на момент начала активного тепловыделения при самовоспламенении гомотенной смеси.

Анализируя решение дифференциального уравнения саморазогрева смеси при тепловом взрыве, полученное О.М. Тодесом — зависимость периода задержки воспламенения τ_i в функции температуры T , давления p , условной энергии активации топлива E и порядка реакции n

$$\tau_i = A \cdot p^{-(n-1)} \cdot e^{E/RT},$$

можно выбрать факторы, позволяющие управлять периодом индукции, а следовательно, и смещением самовоспламенения относительно ВМТ. Условная энергия активации является характеристикой топлива, определяющей его склонность к самовоспламенению, что, в свою очередь, зависит от химического состава топлива. Известны вещества, добавление которых снижает склонность топлив к самовоспламенению (антидетонаторы), например тетраэтилсвинец, и вещества, способствующие самовоспламенению (промоторы), например, формальдегид, перекиси и др. Продукты сгорания углеводородного топлива, имеющие температуру к концу такта расширения порядка 1000 К и более, содержат большое количество активных радикалов и промоторов воспламенения, которые, будучи сохранены в цилиндре, в последующем цикле сыграют роль активаторов самовоспламенения, понизив эффективную энергию активации топлива. Таким образом, осуществив высокотемпературную рециркуляцию, можно воздействовать на момент воспламенения как через температурный фактор, так и через химический, причем их действие направлено в одном направлении. Чем выше количество рециркулирующих ОГ, тем выше температура смеси и концентрация активных молекул, что в обоих случаях ведет к сокращению периода задержки воспламенения.

Проанализировать влияние температурного фактора достаточно просто. Температура смеси в начале такта сжатия T_a , зависящая от температуры на впуске T_0 , подогрева смеси ΔT , коэффициента остаточных газов γ_r с температурой T_r и коэффициента рециркуляции остаточных газов γ_{EGR} с температурой T_{EGR} , равна

$$T_a = \frac{T_0 + \Delta T + \gamma_r \cdot T_r + \gamma_{EGR} \cdot T_{EGR}}{\gamma_r + \gamma_{EGR}}.$$

Принимая воспламенение происходящим в ВМТ, имеем температуру для расчета периода задержки воспламенения по зависимости $\tau_i = A \cdot p^{-(n-1)} \cdot e^{E/RT}$, считая, что давление в начале сжатия p_a не зависит от степени рециркуляции

$$T = T_a \cdot \varepsilon^{n_1-1}, \quad p = p_a \cdot \varepsilon^{n_1},$$

где ε — степень сжатия, n_1 — показатель политропы сжатия.

Теплота сгорания топливовоздушной смеси, разбавленной отработавшими газами H_{Us} и адиабатическая температура пламени $T_{пс}$, равны

$$H_{Us} = \frac{H_U}{(\alpha \cdot l_0 + 1)(1 + \gamma_r + \gamma_{EGR})}, \quad T_{пс} = T + H_{Us} / c_s,$$

где: α — коэффициент избытка воздуха; l_0 — стехиометрическое количество воздуха; H_U — низшая теплота сгорания топлива; c_s — массовая теплоемкость смеси.

На рис. 1 приведены расчетные графики, иллюстрирующие влияние температуры и степени рециркуляции ОГ на период задержки воспламенения.

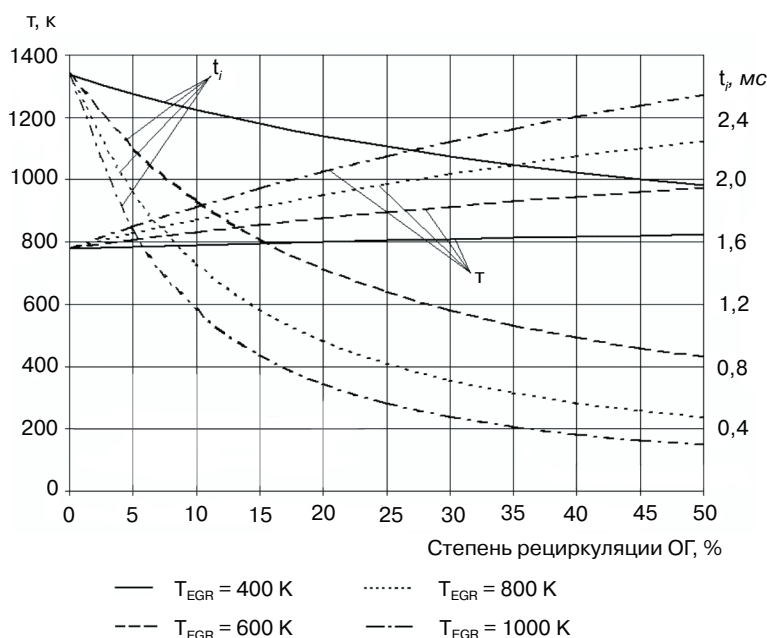


Рис. 1. Влияние степени рециркуляции на температуру конца сжатия и период задержки воспламенения для различной температуры рециркулирующих ОГ

Как видно из приведенных графиков, наблюдается естественный эффект снижения периода задержки воспламенения при увеличении степени рециркуляции и повышении температуры рециркулирующих ОГ. Однако влияние температуры T_{EGR} на адиабатическую температуру продуктов сгорания не столь однозначно (рис. 2).

При низкотемпературной рециркуляции ($T_{EGR} = 400$ К, рис. 2а), с увеличением степени рециркуляции ОГ наблюдается снижение температуры продуктов сгорания во всем диапазоне изменения коэффициента избытка воздуха топливовоздушной смеси. При высокотемпературной рециркуляции ($T_{EGR} = 1000$ К, рис. 2б) в области средне обогащенных и бедных смесей ($\alpha = 2,5$ — $5,5$) прослеживается обратный эффект — адиабатическая температура пламени увеличивается.

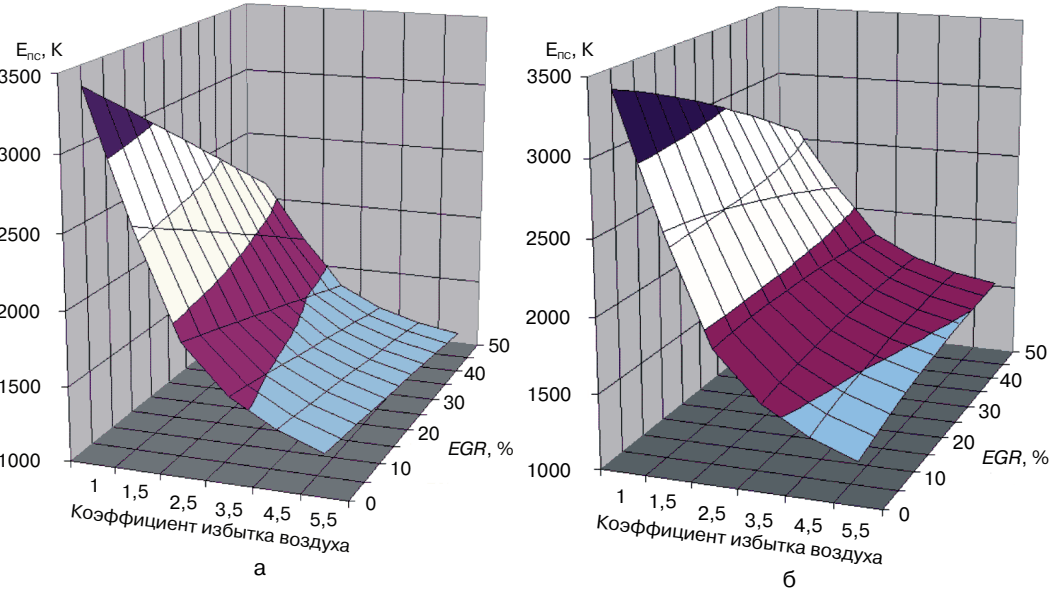


Рис. 2. Влияние температуры рециркулирующих ОГ (T_{EGR}) на адиабатическую температуру продуктов сгорания в зависимости от коэффициента избытка воздуха и степени рециркуляции (EGR):
а — $T_{\text{EGR}} = 400 \text{ K}$; б — $T_{\text{EGR}} = 1000 \text{ K}$

Это объясняет экспериментально зарегистрированный факт (рис. 3), что при увеличении коэффициента ОГ, путем позднего открытия впускного клапана и раннего закрытия выпускного, т.е. увеличения «отрицательного» перекрытия клапанов (эффект высокотемпературной «внутренней рециркуляции»), с повышением степени рециркуляции удельные выбросы CO и HC уменьшаются, тогда, как чувствительные к температуре выбросы NO_x увеличиваются.

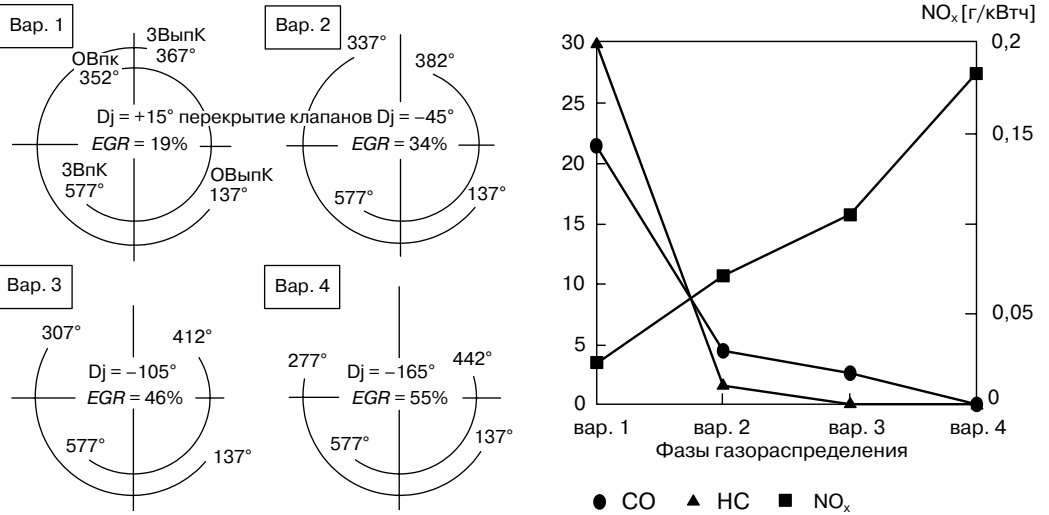


Рис. 3. Влияние «внутренней рециркуляции» на эмиссию вредных веществ с ОГ [1]

ЛИТЕРАТУРА

- [1] *Persson H., Agrell M., Olsson J., Johansson B., Strom H.* The effect of intake temperature on hcci operation using negative valve overlap, SAE Paper 2004-01-0944.

INFLUENCE LOW- AND HIGH TEMPERATURE EGR TO WORKING PROCESS ICE

S.V. Gusakov, P.R. Vallejo Maldonado, A.M. Dovolnov

Department of Internal Combustion Engines
Peoples' Friendship University of Russia
Miklukho-Maklaya str., 6, Moscow, Russia, 117198

Influence of temperature exhaust gases recirculation (EGR) on parameters of working process in piston engines is considered. EGR it is important not only as one of methods of reduction toxicity of exhaust gases to ICE, but also a way of management of working process of engines with homogeneous charge compression ignition.