

СНИЖЕНИЕ РАСХОДА ТОПЛИВА И ВРЕДНЫХ ВЫБРОСОВ ДИЗЕЛЯ НА РЕЖИМАХ МАЛЫХ НАГРУЗОК МЕТОДОМ ИЗМЕНЕНИЯ РАБОЧЕГО ОБЪЕМА

Н.Н. Патрахальцев, д.т.н., проф., Т.С. Аношина, асп., Р.О. Камышников, асп.
Российский университет дружбы народов

Приводятся результаты анализа возможности снижения расхода топлива и вредных выбросов дизеля на режимах малых нагрузок за счет отключения части цилиндров или циклов. Анализ эффективности метода выполнен на основе экспериментальных универсальных характеристик дизеля КамАЗ-7456 по показателям экономичности и вредных выбросов.

В условиях эксплуатации транспортные дизели значительное время работают на режимах малых нагрузок и холостого хода. Показатели экономичности и вредных выбросов на этих режимах работы дизеля существенно хуже аналогичных показателей на полных нагрузках. В результате эксплуатационные расходы топлива транспортным средством возрастают [1]. При этом возрастают и удельные выбросы CO_2 — газа, определяющего явление парникового эффекта. Отмечается также, что на режимах малых нагрузок и холостого хода увеличивается расход масла.

Одним из методов повышения экономичности дизеля на режимах малых нагрузок является метод изменения рабочего объема, что в простейшем случае достигается отключением части цилиндров или циклов [2]. Суть метода заключается в том, что оставшиеся в работе (активные) цилиндры развивают требуемую тормозную мощность за счет повышения среднего эффективного давления. В результате экономичность дизеля повышается, объемные концентрации оксидов азота (NO_x) в ОГ активных цилиндров возрастают, концентрации оксидов углерода (СО) и углеводородов (СН), как правило, снижаются, дымность (или концентрация сажи (W_C) в ОГ) активных цилиндров также повышается. При этом возникает необходимость оценки степени влияния отключения цилиндров на удельные и суммарные массовые выбросы вредных веществ. Указанная оценка выполнена с применением универсальных, (многопараметровых) характеристик дизеля, содержащих данные по удельному эффективному расходу топлива, объемным концентрациям оксидов азота, оксидов углерода, углеводородов и

сажи в координатах: среднее эффективное давление, частоты вращения вала ($b_e, W_{\text{NO}_x}, W_{\text{CO}}, W_{\text{СН}}, W_C = f(p_e, n)$). При анализе ордината p_e заменяется показателем удельной эффективной работы двигателя ($L_{\text{уд}}$) с использованием приведенных далее уравнений.

Работа дизеля на всех работающих (активных) цилиндрах (т. е. полноразмерного дизеля) характеризуется показателями эффективного крутящего момента (M_e) или среднего эффективного давления (p_e). При этом M_e отражает усредненную эффективность работы всех цилиндров двигателя, а p_e — эффективность работы как всех цилиндров двигателя, так и одного цилиндра. Если на данном режиме малой нагрузки часть цилиндров выключена (деактивирована), то M_e сохраняет постоянство, но теряется физический смысл понятия p_e . При этом можно оценить нагрузку двигателя, работающего на некотором количестве z активных цилиндров, значением выполняемой двигателем удельной работы ($L_{\text{уд}}$), отнесенной к рабочему объему активных цилиндров ($z \cdot V_h$) [2]. Метод применим для оценки экономичности и выбросов дизеля с отключением цилиндров при допущении, что абсолютные значения механических потерь зависят только от частоты вращения коленчатого вала дизеля.

Допустим, что режим нагрузки дизеля задан через среднее эффективное давление p_e , МПа. Тогда

$$L_{\text{полн}} = 500 \cdot p_e \cdot i \cdot V_h, \text{ Дж.} \quad (1)$$

Для всех активных цилиндров удельная работа, выполненная дизелем, равна

$$L_{\text{уд}} = 500 \cdot p_e, \text{ Дж}/(\text{дм}^3). \quad (2)$$

Для дизеля с отключенной частью цилиндров (ОЦ) или циклов, т. е. с числом активных цилиндров z получаем:

$$\begin{aligned} L_{\text{уд}}^{\text{ОЦ}} &= 500 \cdot p_e \cdot i \cdot V_h / (z \cdot V_h) = \\ &= 500 \cdot p_e \cdot i / z, \text{ Дж}/(\text{дм}^3). \end{aligned} \quad (3)$$

Апробация метода оценки эффективности отключения цилиндров выполнена на дизеле КамАЗ-7406 (8ЧН12/12) ($V_h = 1,36 \text{ дм}^3, i \cdot V_h = \text{дм}^3$). Универсальная характеристика дизеля (рис. 1) заимствована из работы [4] и адаптирована к условиям проведения расчетов по предлагаемой

методике. Адаптация выполнена как частичным интерполированием и экстраполированием параметров, так и заменой шкалы среднего эффективного давления (p_e) на удельную работу ($L_{уд}$) в соответствии с уравнением 2 и схемой на рис. 1.

Пусть полноразмерный дизель работает с малой нагрузкой при $M_{e,8} = 80$ Нм. Работа, выполняемая дизелем с числом активных цилиндров $i = 8$, составляет $L_{полн} = 502$ [Дж].

Допустим, что эту же работу дизель выполняет (а следовательно развивает тот же крутящий момент) при изменении числа активных цилиндров $z = 6, 4, 2, 1$, т. е. рабочий объем двигателя уменьшается пропорционально числу активных цилиндров и составляет $z \cdot V_h$.

Следовательно, значение удельной работы дизеля с разным числом активных цилиндров составит: при $z = 8$ $L_{уд,8} = 502/8 \cdot 1,36 = 46$ Дж/(дм³); при $z = 6$ $L_{уд,6} = 502/6 \cdot 1,36 = 62$ Дж/(дм³); а при $z = 1$ $L_{уд,1} = 502/1,36 = 369$ Дж/(дм³).

Тогда с использованием универсальной характеристики (рис. 1) получаем значение удельных эффективных расходов топлива полноразмерного дизеля $b_{e,8} = 350$ г/(кВт·ч), дизеля при работе на двух цилиндрах 229 г/(кВт·ч), а дизеля с одним активным цилиндром: $b_{e,1} = 210$ г/(кВт·ч). Относительный выигрыш в расходе топлива (Δb_e) определяем по соотношению

$$\Delta b_e = [(b_{e,8} - b_{e,z})/b_{e,8}] \cdot 100 \%, \quad (4)$$

т. е. для случая отключения семи цилиндров он составляет $\Delta b_e \approx 40 \%$, при работе на двух цилиндрах $\sim 34 \%$ и т. д.

Для анализа массовых выбросов окислов азота (NO_x) используем универсальную характе-

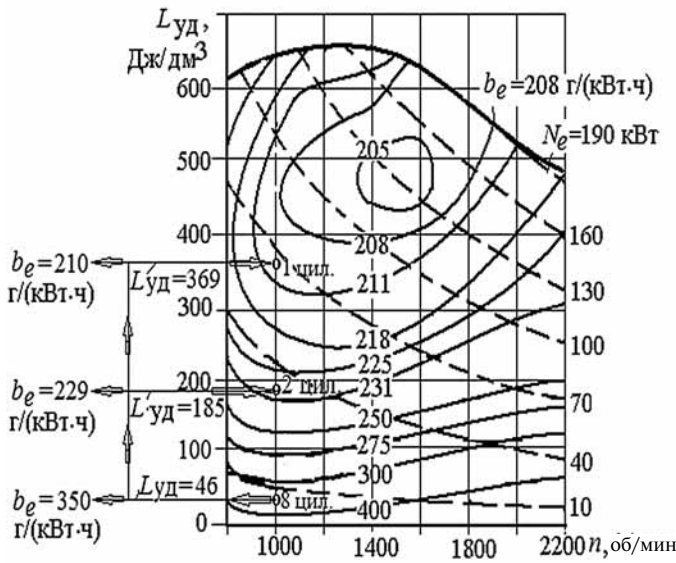


Рис. 1. Универсальная характеристика дизеля КамАЗ-7406 (8СН12/12) в координатах $L_{уд}-n$:

о — нагрузка дизеля с числом активных цилиндров $z = 8$ цилиндров, 2 цилиндров и $z = 1$ цилиндров при $n = 1000$ об/мин

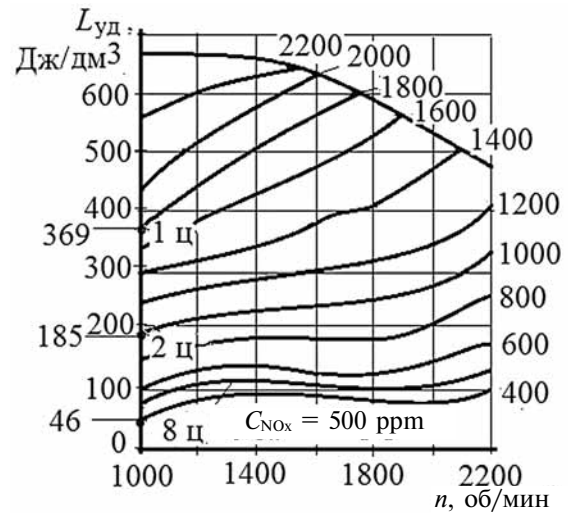


Рис. 2. Универсальная характеристика дизеля КамАЗ-7406 по концентрации окислов азота в ОГ [4]; (нагрузка соответствует режимам работы, показанным на рис. 1)

ристику, приведенную на рис. 2; для анализа выбросов СО аналогичную характеристику — на рис. 3 и т. д.

Расчеты выбросов выполнены по следующим соотношениям [5]:

$$G_{NO_x} = 0,001587 \cdot W_{NO_x} \cdot G_{ог}, \quad [г/ч]; \quad (5)$$

$$G_{CO} = 0,000966 \cdot W_{CO} \cdot G_{ог} \quad [г/ч]; \quad (6)$$

$$g_{CO} = G_{CO}/P_e \quad [г/(кВт·ч)]; \quad (7)$$

$$G_{CH} = 0,000478 \cdot W_{CH} \cdot G_{ог} \quad [г/ч]; \quad (8)$$

$$g_{CH} = G_{CH}/P_e \quad [г/(кВт·ч)], \quad (9)$$

где W_{NO_x} , W_{CO} , W_{CH} — измеренные на анализируемых режимах объемные концентрации окислов азота, окислов углерода и углеводородов (при отключении части цилиндров концентрации и массовые выбросы NO_x , СО и СН относятся

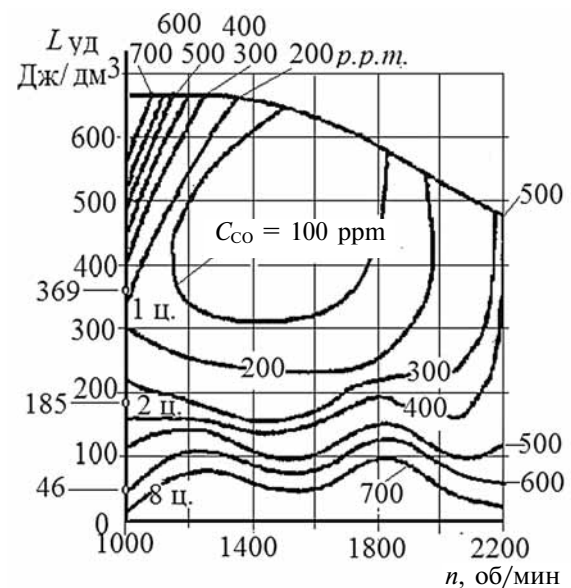


Рис. 3. Универсальная характеристика дизеля КамАЗ-7406 по концентрации окислов углерода в ОГ [4]

только к активным цилиндрам); $G_{ог}$ — часовой расход отработавших газов, определяемый как сумма часовых расходов топлива G_T и воздуха G_B , кг/ч. (При отключении части цилиндров расход ОГ определяется для активных цилиндров.)

Для полноразмерного дизеля на данном режиме

$$G_T = b_e \cdot P_e \cdot 10^{-3} = 350 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} = 1,94 \text{ кг/ч} \quad (10)$$

(b_e определяется по данным рис. 1).

$$G_{ог} = G_B + G_T = i \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_B \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot 30 + G_T = 8 \cdot 1,36 \cdot 0,73 \cdot 1,24 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 1,94 = 297 \text{ кг/ч}, \quad (11)$$

где η_v и ρ_B — соответственно коэффициент наполнения и плотность воздуха;

$$G_{NOx} = 0,001587 \cdot W_{NOx} \cdot G_{ог} = 0,001587 \cdot 400 \cdot 297 = 188 \text{ г/ч}; \quad (12)$$

$$g_{NOx} = G_{NOx} / P_e = 188 / 8,4 = \sim 22 \text{ г/(кВт·ч)}. \quad (13)$$

Для работы с одним активным цилиндром получаем следующее:

$$G_T = b_e \cdot P_e \cdot 10^{-3} = 210 \cdot 8,4 \cdot 10^{-3} = 1,76 \text{ кг/ч}; \quad (14)$$

$$G_{ог} = G_B + G_T = i \cdot V_h \cdot \eta_v \cdot \rho_B \cdot n \cdot 10^{-3} \cdot 30 + G_T = 1 \cdot 1,36 \cdot 0,73 \cdot 1,24 \cdot 1000 \cdot 10^{-3} \cdot 30 + 1,76 = 38,7 \text{ кг/ч};$$

$$G_{NOx} = 0,001587 \cdot W_{NOx} \cdot G_{ог} = 0,001587 \cdot 1800 \cdot 38,7 = 111 \text{ г/ч}; \quad (16)$$

$$g_{NOx} = G_{NOx} / P_e = 111 / 8,4 = \sim 13 \text{ г/(кВт·ч)}, \quad (17)$$

т. е. при одинаковой мощности, развиваемой всеми и одним цилиндром удельные выбросы оксидов азота снижаются на $\sim 40\%$.

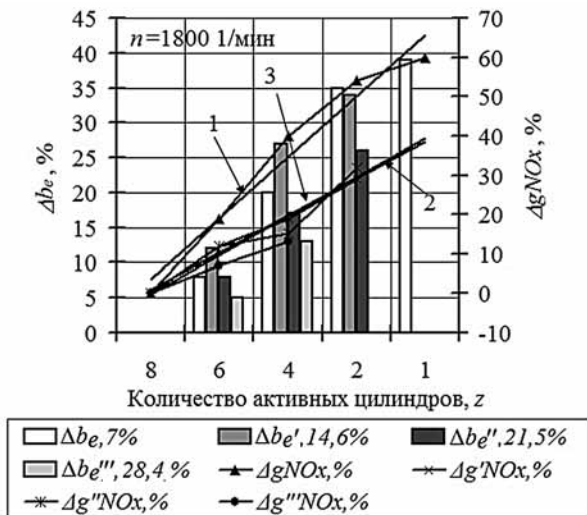


Рис. 4. Относительные изменения удельного расхода топлива (Δb_e) и удельного выброса оксидов азота (Δg_{NOx}) при реализации режимов нагрузок (7, 14,6, 21,5, 28,4% от значений мощности на ВСХ) при $n = 1800$ об/мин в зависимости от числа (z) активных цилиндров

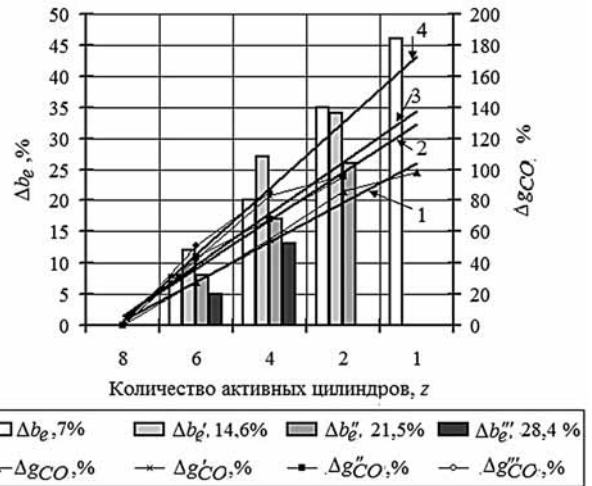


Рис. 5. Относительные изменения удельных расходов топлива (Δb_e) и удельного выброса оксидов углерода (Δg_{CO}) при реализации режимов нагрузок (7, 14,6, 21,5, 28,4% от значений мощности на ВСХ) при $n = 1800$ об/мин в зависимости от числа (z) активных цилиндров

Результаты анализа для режимов работы дизеля с частотой вращения $n = 1800$ об/мин и нагрузками следующих уровней: ~ 7 , ~ 14 , ~ 21 , $\sim 28\%$ от значения мощности на внешней скоростной характеристике (ВСХ) приведены на рис. 4. При этом для реализации одного и того же режима по мощности дизель может работать с разным числом активных цилиндров ($z = 8, 6, 4, 2, 1$).

Очевидно, что по мере возрастания уровня исходной нагрузки пропадает возможность отключения большого числа цилиндров, а также снижается эффект повышения экономичности и снижения выбросов NO_x . На графиках приведены также уравнения линейной аппроксимации выбросов NO_x в зависимости от числа активных цилиндров.

Аналогичный расчетный анализ проведен также в части оценки выбросов оксидов углерода (рис. 5). Следует отметить, что если концентрации оксидов азота в ОГ активных цилиндров при повышении нагрузки возрастают, то концентрации оксидов CO могут как возрастать, так и снижаться (рис. 3).

Уравнения линейной аппроксимации изменений относительного снижения выбросов CO (в соответствии с рис. 5) имеют следующий вид

$$1. \Delta g_{CO} \% = 25,4 \cdot (5 - z/2) - 22,8 \quad R^2 = 0,9848;$$

$$2. \Delta g_{CO}' \% = 30,9 \cdot (5 - z/2) - 25,5 \quad R^2 = 0,9797;$$

$$3. \Delta g_{CO}'' \% = 32,9 \cdot (5 - z/2) - 27,0 \quad R^2 = 0,9564;$$

$$4. \Delta g_{CO}''' \% = 42,5 \cdot (5 - z/2) - 39,667 \quad R^2 = 0,9868.$$

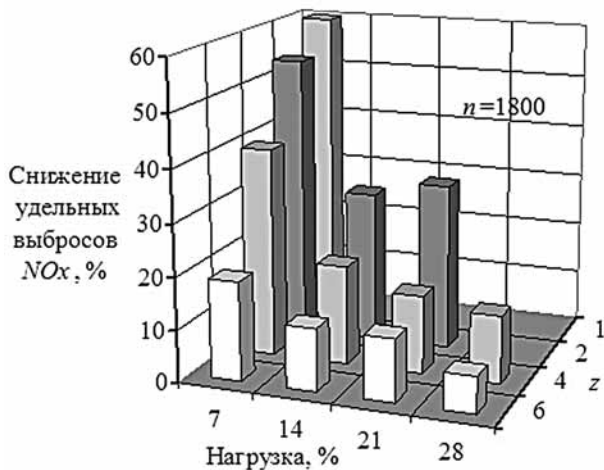


Рис. 6. Относительное уменьшение удельных выбросов оксидов азота (NO_x) в зависимости от числа активных цилиндров (z) при разном уровне нагрузки (%) двигателя КАМАЗ-7406 при частоте вращения вала 1800 об/мин

Хорошее визуальное представление о характере изменения тех или иных показателей дают трехмерные характеристики. Далее с использованием уравнений линейной аппроксимации проводится такое обобщение, т. е. зависимости снижения удельных выбросов токсичного компонента ОГ от количества активных цилиндров и исходного уровня нагрузки, причем для разных частот вращения коленчатого вала (рис. 6, 7).

Характер изменения возможных выбросов существенно зависит как от нагрузки двигателя,

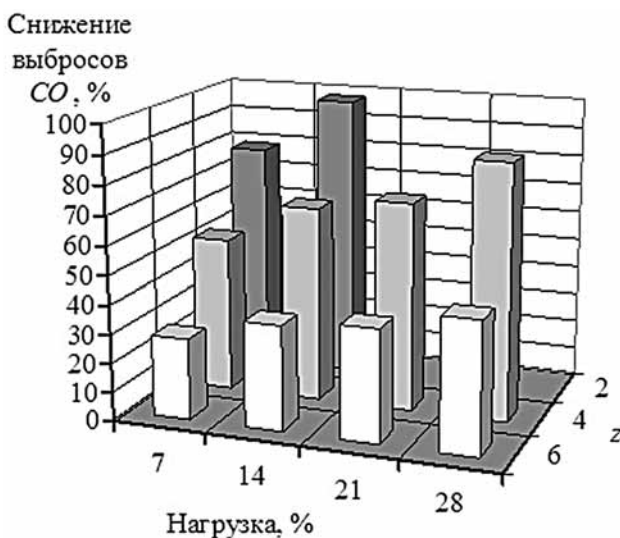


Рис. 7. Относительное уменьшение удельных выбросов (CO , %) в зависимости от числа активных цилиндров (z) при разном уровне нагрузки (%) двигателя КАМАЗ-7406 при частоте вращения вала 1800 об/мин

так и от частоты вращения, так как эти параметры определяют вид параметрических кривых постоянных объемных концентраций, например, оксидов азота (см. рис. 4). При частоте 1800 об/мин и минимальной нагрузке (~7 %) снижение выброса оксидов азота достигает 50 %. При повышенной нагрузке (~28 %) возможна работа дизеля только на шести или четырех цилиндрах, а эффективность снижения выбросов NO_x снижается до 10–15 %. Можно отметить, что длительная работа на режимах малых нагрузок и холостого хода происходит, как правило, на пониженных частотах вращения. Однако и при номинальной частоте вращения (2200 об/мин) и при минимальной нагрузке (~7 %) относительное снижение удельных выбросов оксидов азота может составить 50–60 %.

Таким образом, предложенная методика позволяет оценить возможности снижения токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок при применении метода регулирования дизеля отключением цилиндров или циклов (иначе говоря — изменением рабочего объема дизеля). Расчетно-экспериментальный анализ показал, что метод отключения цилиндров может быть достаточно эффективным при решении проблемы не только повышения экономичности, но и снижения вредных выбросов на режимах малых нагрузок и холостого хода.

Литература

1. Оценка возможности повышения экономичности автомобиля с двигателем с регулируемым рабочим объемом / Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников, Э.А. Савастенко. // Автомобильная промышленность. — 2014. — № 6. — С. 10–12.
2. Возможности повышения экономичности режимов малых нагрузок автомобильного двигателя / Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников, Э.А. Савастенко // Автомобильная промышленность. — 2014. — № 4. — С. 9–10.
3. Снижение токсичности и дымности выбросов дизеля добавкой СПБТ и изменением рабочего объема / Н.Н. Патрахальцев, И.А. Петруня, Р.О. Камышников, Д.С. Скрипник // Транспорт на альтернативном топливе. — 2014. — № 3 (39). — С. 41–47.
4. Марков В.А., Девянин С. Н., Мальчук В.И. Впрыскивание и распыливание топлива в дизелях. — М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2007. — 360 с.
5. Кульчицкий А.Р. Токсичность автомобильных и тракторных двигателей: учебное пособие для высшей школы. — 2-е изд., испр. и доп. — Академический проект, 2004. — 400 с.