

# Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-38-52

## Форсирование четырехтактного двигателя путем перевода на работу по двухтактному циклу в режимах с низкими частотами вращения

В.А. Марков<sup>1</sup>, Ф.Б. Барченко<sup>1</sup>, Э.А. Савастенко<sup>2</sup>, А.А. Савастенко<sup>2</sup>,  
Ш.Р. Лотфуллин<sup>3</sup>, В.А. Неверов<sup>1</sup>

<sup>1</sup> МГТУ им. Н.Э. Баумана

<sup>2</sup> Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет

<sup>3</sup> ООО «РариТЭК-Технологии»

## Forcing a Four-Stroke Engine by Switching it to a Two-Stroke Cycle at Low-Speed Modes

V.A. Markov<sup>1</sup>, F.B. Barchenko<sup>1</sup>, E.A. Savastenko<sup>2</sup>, A.A. Savastenko<sup>2</sup>,  
Sh.R. Lotfullin<sup>3</sup>, V.A. Neverov<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Bauman Moscow State Technical University

<sup>2</sup> Moscow Automobile and Road Construction State Technical University

<sup>3</sup> ООО RariTEK

Улучшение динамических качеств двигателей внутреннего сгорания и приемистости оборудованных ими транспортных средств — актуальная задача двигателестроения. Для ее решения предложено перевести четырехтактный двигатель на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими частотами вращения. Отмечено, что худшие показатели топливной экономичности двухтактных двигателей отчасти скомпенсированы лучшими показателями их удельной мощности. Рассмотрены особенности перевода бензинового двигателя 2/4 Sight британской компании Ricardo с четырехтактного цикла на двухтактный. Для реализации двухтактной работы использованы двухступенчатый наддув с промежуточным охлаждением воздуха и система переключения клапанов газораспределения. Показано, что этот метод применим и к дизельным двигателям. Исследован дизельный двигатель Д-245 (4 ЧН 11,0/12,5), установленный на гусеничную машину. При частоте вращения коленчатого вала 1600...2400 мин<sup>-1</sup> такой двигатель работает по четырехтактному циклу, при ее меньших значениях — по двухтактному. Проведены расчетные исследования рабочего процесса этого дизеля. Показана целесообразность его перевода на двухтактный цикл на режимах с низкими частотами вращения.

**Ключевые слова:** бензиновый двигатель, дизельный двигатель, четырехтактный цикл, двухтактный цикл, внешняя скоростная характеристика, динамические качества двигателя

Improving the dynamic qualities of internal combustion engines and the throttle response of vehicles equipped with them is an urgent problem in engine building. To solve it, we

suggest switching a four-stroke engine to a two-stroke cycle at low-speed modes. Within the study, we found that the worst indicators of fuel efficiency of two-stroke engines are partially compensated by the best indicators of their power density. We took a close look at the switching of the 2/4 SIGHT gasoline engine of the British company Ricardo from a four-stroke cycle to a two-stroke cycle. To implement the switching, we used a two-stage intercooled supercharging and a gas distribution valve switching system. The method proved to be applicable to diesel engines as well. Hence, we studied a diesel engine D-245 (4 CHN 11.0/12.5) mounted on a tracked vehicle. At a speed of 1600...2400 min<sup>-1</sup>, such a diesel engine operates in a four-stroke cycle, at lower speeds it operates in a two-stroke cycle. Finally, we did computational studies of the working process of this diesel engine. The study showed the expediency of switching the engine to a two-stroke cycle at low-speed modes.

**Keywords:** gasoline engine, diesel engine, four-stroke cycle, two-stroke cycle, external speed characteristic, dynamic engine qualities

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) остаются основным типом тепловых агрегатов, устанавливаемых на транспортные средства различного назначения, легковые и грузовые автомобили, автобусы, дорожные и строительные машины, тепловозы, объекты авиации и судовой техники [1–3]. Их также используют в энергетических установках другого типа.

В связи со сложными условиями эксплуатации ДВС к ним предъявляются достаточно жесткие требования, основными из которых являются:

- высокий технический уровень — достаточные мощность и запас крутящего момента, возможность дальнейшего форсирования ДВС, требуемые динамические качества при малых габаритных размерах и массе, хорошая и стабильная эксплуатационная топливная экономичность в широком диапазоне эксплуатационных режимов, малый расход моторного масла на угар и замену, хорошие пусковые качества, минимальное время для приведения ДВС в рабочее состояние;

- уровни токсичности отработавших газов (ОГ), дымности, шума и вибрации, установленные соответствующими стандартами;

- минимальное экологическое влияние на внешнюю среду на протяжении полного жизненного цикла, в том числе за счет минимизации выбросов парникового углекислого газа CO<sub>2</sub>;

- высокая технологичность изготовления, удовлетворяющая условиям крупносерийного и массового производства, максимальная унификация как в своем семействе моделей и модификаций, так и с близкими по характеристикам моделями из других семейств ДВС;

- возможность развития конструкции семейства ДВС в течение 10–15 лет без коренной

перестройки автоматизированного и специального оборудования;

- высокие надежность и безотказность в тяжелых условиях эксплуатации при достаточном моторесурсе, минимальные затраты на техническое обслуживание и ремонт, возможность использования недефицитных и альтернативных горюче-смазочных материалов и охлаждающих жидкостей, а также обеспечение многотопливности.

Вследствие применения ДВС в мобильных и стационарных энергетических установках различного назначения, эксплуатируемых в разных условиях, по конструкции и особенностям работы эти двигатели очень разнообразны [1, 4]. На современном этапе развития двигателестроения преимущественное распространение получили четырехтактные бензиновые (БД) и дизельные (далее дизели) двигатели. В энергетических установках сравнительно небольшой мощности (до 50...100 кВт) используют преимущественно БД, в установках большей мощности — дизели.

Высокооборотные четырехтактные БД, имеющие приемлемые удельные показатели, нашли широкое применение в наземном транспорте. Так, на мотоциклы устанавливают БД без наддува с удельной массой 0,5 кг/кВт, обеспечивающие мощность 130...140 кВт/л при частоте вращения коленчатого вала (далее ЧВ) 12 000...15 000 мин<sup>-1</sup>. Это обусловлено тем, что по сравнению с дизелями БД такого класса имеют более высокие тяговые, скоростные, топливно-экономические и другие эксплуатационные показатели, а также меньшие удельную массу и дымность ОГ.

К наиболее важным относятся следующие отличительные особенности БД:

- так как эффективная мощность  $N_e$  ДВС пропорциональна угловой скорости вращения коленчатого вала  $\omega_{дв}$  (в соответствии с формулой  $N_e = M_e \omega_{дв}$ , где  $M_e$  — крутящий момент), а номинальная ЧВ БД этого класса ( $n_{ном} = 12\,000 \dots 15\,000 \text{ мин}^{-1}$ ) существенно выше, чем у дизелей ( $n_{ном} = 4000 \dots 6000 \text{ мин}^{-1}$ ), при неизменном рабочем объеме у БД появляется возможность достижения существенно большей мощности, чем у дизелей;

- преимуществами реализации в БД этого класса четырехтактного цикла перед двухтактным являются низкие потери свежего заряда (т. е. возможность уменьшения расхода топлива) и приемлемая экологичность (низкие выбросы токсичных веществ и дымность ОГ);

- по сравнению с двухтактными моделями четырехтактные БД в большей степени приспособлены к работе в условиях с часто изменяющимися скоростным и нагрузочным режимами, что характерно для эксплуатации транспортных средств при городском движении.

В связи с указанными отличительными особенностями четырехтактные БД практически полностью вытеснили двухтактные. Области использования двухтактных БД остаются мелкая техника (бензопилы, газонокосилки, мотоблоки и т. д.) и очень крупная (морские суда). Это объясняется указанными требованиями, предъявляемыми к эксплуатационно-техническим показателям современных ДВС.

Несмотря на достоинства, четырехтактные БД имеют существенный недостаток, заключающийся в значительном снижении крутящего момента с уменьшением ЧВ на режимах внешней скоростной характеристики (ВСХ), определяющей максимальные мощностные показатели БД.

Одним из показателей протекания (формы) ВСХ БД является коэффициент приспособляемости по крутящему моменту  $k_{пр}$ , равный отношению максимального крутящего момента  $M_{eM_{max}}$  (рис. 1, точка б) к моменту двигателя на режиме максимальной мощности  $M_{eN_{max}}$  (точка а) при номинальной ЧВ:

$$k_{пр} = M_{eM_{max}} / M_{eN_{max}}.$$

Этот коэффициент позволяет оценить приспособляемость ДВС к изменению внешней нагрузки и характеризует способность такого двигателя преодолевать кратковременные перегрузки без перехода на режимы с пони-

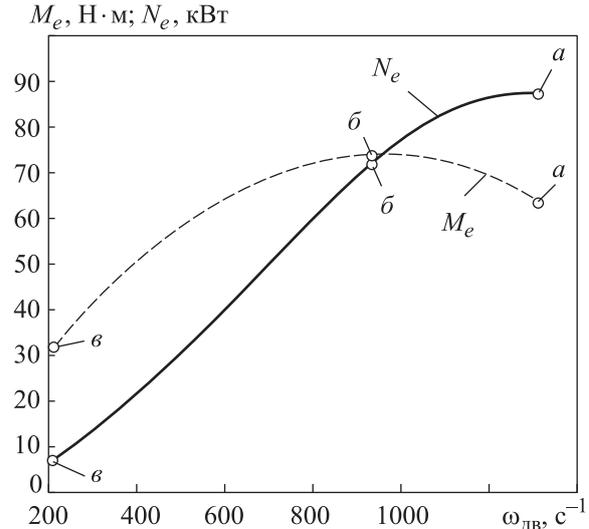


Рис. 1. Пример ВСХ высокооборотного БД с режимами максимальной мощности (а), максимального крутящего момента (б) и минимально устойчивой ЧВ (в)

женной ЧВ. Для БД коэффициент приспособляемости по крутящему моменту обычно равен  $1,20 \dots 1,35$ .

В связи с особенностями скоростных характеристик систем топливоподачи у дизелей кривая крутящего момента протекает более полого, чем у БД, а коэффициент  $k_{пр} = 1,05 \dots 1,20$ . При этом корректирование топливоподачи в дизелях позволяет повысить этот коэффициент.

Изложенное относится к диапазону скоростных режимов от максимальной мощности (см. рис. 1, точки а) до максимального крутящего момента (точка б). При меньших ЧВ значения крутящего момента  $M_e$  снижаются и в точке минимально устойчивой ЧВ (в точке в) достигают минимума.

Такое резкое падение крутящего момента  $M_e$  при уменьшении ЧВ  $n$  приводит к резкому снижению тяги автомобиля или мотоцикла. В связи с этим разработка методов и средств улучшения динамических качеств БД (повышения его приемистости) на режимах с низкой ЧВ является актуальной проблемой современного двигателестроения.

Следует отметить, что многие показатели БД можно улучшить путем корректирования формы ВСХ, особенно в диапазоне высоких ЧВ: от ЧВ при максимальной мощности  $n_{N_{e_{max}}}$  (или  $n_{ном}$ ) до ЧВ при максимальном крутящем моменте  $n_{M_{e_{max}}}$  (см. рис. 1, точки а и б соответственно).

В то же время актуальна задача повышения крутящего момента БД при средних и низких ЧВ в диапазоне  $n_{M_{e\max}} \dots n_{\min}$ . Такое повышение крутящего момента  $M_e$  позволяет улучшить динамические качества БД при трогании транспортного средства с места, повысить интенсивность его разгона до средних ЧВ (до  $n_{M_{e\max}}$ ), решить ряд других проблем, возникающих при работе ДВС на режимах с низкими и средними ЧВ.

Проведенный анализ показал, что корректирование ВСХ позволяет улучшить динамические качества БД и повысить его приемистость в области низких ЧВ. В свою очередь форму ВСХ можно корректировать различными способами. Обычно это достигается формированием соответствующих характеристик топливоподачи [5–8], но возможны и другие подходы. В частности, ВСХ можно скорректировать путем перевода БД с четырехтактного цикла на двухтактный в области низких скоростных режимов.

Цель работы — оценка возможностей корректирования ВСХ форсированием четырехтактного БД путем его перевода на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ.

**Влияние формы ВСХ на динамические качества БД и транспортного средства.** Форма ВСХ оказывает определяющее влияние на динамические качества БД и приемистость транспортного средства [9–11]. Рассмотрим некоторые аспекты такого влияния. Как известно, в переходных процессах БД интенсивность  $d\omega_{\text{дв}}/dt$  нарастания или снижения угловой скорости  $\omega_{\text{дв}}$  его вала зависит от разности крутящего момента двигателя  $M_e$  и момента сопротивления потребителя  $M_c$  в соответствии с условием динамического равновесия ДВС [5, 12, 13]:

$$J_d = \frac{d\omega_{\text{дв}}}{dt} M_e / M_c, \tag{1}$$

где  $J_d$  — приведенный к ЧВ момент инерции подвижных деталей БД и потребителя.

Крутящий момент БД  $M_e$  определяется в первую очередь количеством подаваемого в цилиндры топлива. Момент сопротивления потребителя в первом приближении вычисляется по формуле [14]

$$M_c = k_N \omega_{\text{дв}}^2,$$

где  $k_N$  — коэффициент настройки потребителя.

В установившемся (равновесном) режиме минимально устойчивой ЧВ при частичной по-

даче топлива (рис. 2, точка  $z$ ) соблюдается условие статического равновесия БД

$$M_e = M_c. \tag{2}$$

Для разгона БД от этого режима до режима максимальной мощности, т. е. из точки  $z$  с частичной подачей топлива в точку  $a$  (см. рис. 2) с полной подачей топлива ее необходимо увеличить до значения, соответствующего точке  $b$  ВСХ. После перемещения дозирующего органа системы топливоподачи до этого значения крутящий момент  $M_e$  становится больше момента сопротивления  $M_c$ , соответствующего точке  $z$ .

В результате согласно условию динамического равновесия (1) БД начинает разгоняться до ЧВ режима максимальной мощности, называемого также номинальным режимом работы ДВС при ЧВ  $n_{\text{ном}}$  и крутящем моменте  $M_{e\text{ном}}$  (см. рис. 2, точка  $a$ ). После окончания этого переходного процесса вновь достигается условие статического равновесия БД (2), но уже при полной подаче топлива.

При этом в соответствии с формулой (1), чем выше расположен участок  $b$ – $b$  ВСХ, тем больше разница между моментами  $M_e$  и  $M_c$ , и тем быстрее разгоняется БД. То есть для улучшения динамических качеств БД и приемистости транспортного средства желательно на

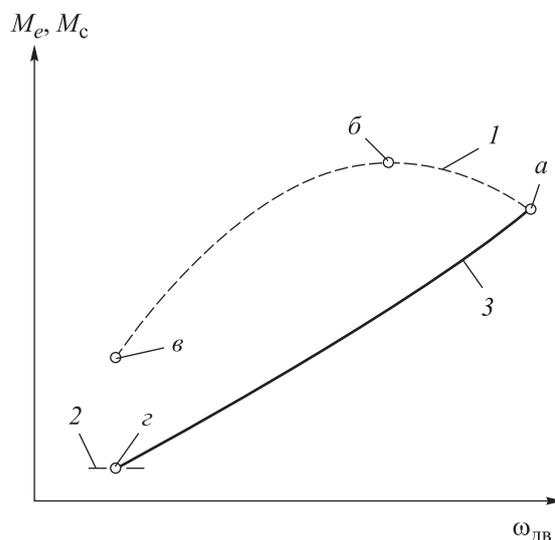


Рис. 2. Характеристики крутящего момента БД  $M_e$  на режимах ВСХ (1), режимах скоростной характеристики с постоянным положением дозирующего органа, соответствующем частичной подаче топлива (2), и характеристика момента сопротивления потребителя  $M_c$  (3):  
 $a$  — режим максимальной мощности;  
 $b$  — режим максимального крутящего момента;  
 $v$  и  $z$  — режим минимально устойчивой ЧВ при частичной и частичной подаче топлива соответственно

участке  $v$ – $b$  ВСХ иметь большее значение крутящего момента.

На рис. 3 показаны ВСХ БД при реализации мероприятий, повышающих крутящий момент  $M_e$  на режимах ВСХ. Следует отметить что в области низких ЧВ ( $n < 0,3 n_{\text{ном}}$ ) БД работает неустойчиво. Эта область соответствует неустановившимся режимам (НУР) разгона БД. Режим с ЧВ  $n \approx 0,3 n_{\text{ном}}$  является режимом минимально устойчивой ЧВ БД. Диапазон ЧВ от  $n \approx 0,3 n_{\text{ном}}$  до  $n_{\text{ном}}$  соответствует эксплуатационному диапазону установившихся режимов (УР) работы БД. В этом диапазоне ЧВ необходимо выделить режим максимального крутящего момента при  $n \approx 0,6 n_{\text{ном}}$ .

С точки зрения динамики разгона БД и транспортного средства очень значимым является диапазон ЧВ от  $n \approx 0,3 n_{\text{ном}}$  до  $n \approx 0,6 n_{\text{ном}}$  (см. рис. 3). Для улучшения приемистости транспортного средства необходимо повысить крутящий момент БД  $M_e$  на режимах ВСХ в указанном диапазоне ЧВ. Обычно это достигается путем корректирования (увеличения) подачи топлива, поэтому этот участок часто называют участком отрицательной коррекции ВСХ [5, 6]. Скорректированная с использованием этого метода ВСХ 1, 2, 3' показана на рис. 3.

Однако возможности такого метода увеличения крутящего момента БД  $M_e$  ограничены из-за необходимости соответствующего повышения подачи воздуха. Еще большего увеличе-

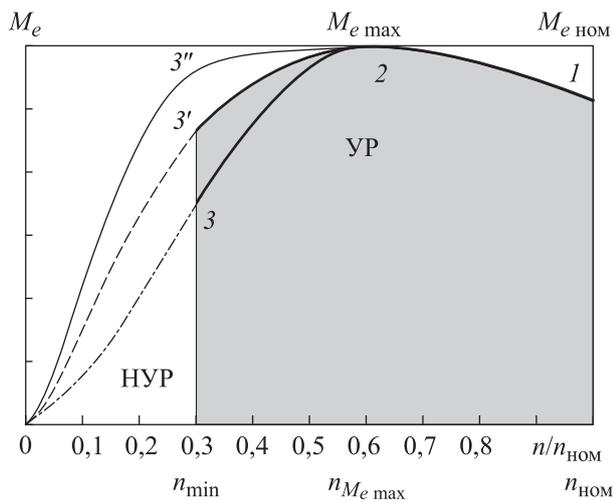


Рис. 3. Внешние характеристики БД при реализации различных мероприятий, повышающих крутящий момент двигателя  $M_e$  на режимах ВСХ: 1, 2, 3 — исходная ВСХ; 1, 2, 3' — ВСХ при корректировании участка отрицательной коррекции путем изменения подачи топлива; 1, 2, 3'' — ВСХ при переводе БД с четырехтактного цикла на двухтактный цикл при ЧВ от  $n \approx 0,3 n_{\text{ном}}$  до  $n \approx 0,6 n_{\text{ном}}$

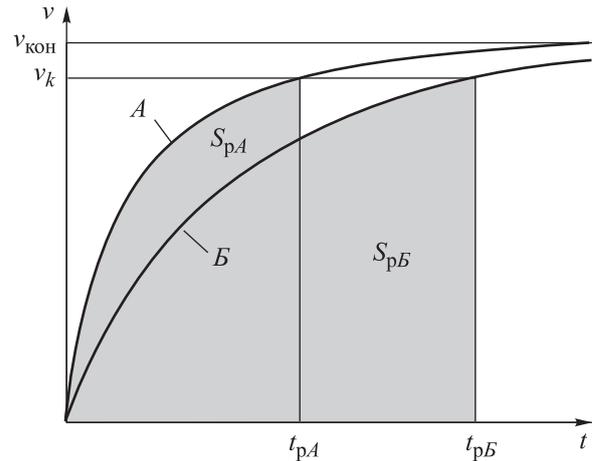


Рис. 4. Зависимости скоростей движения двух автомобилей от времени  $t$

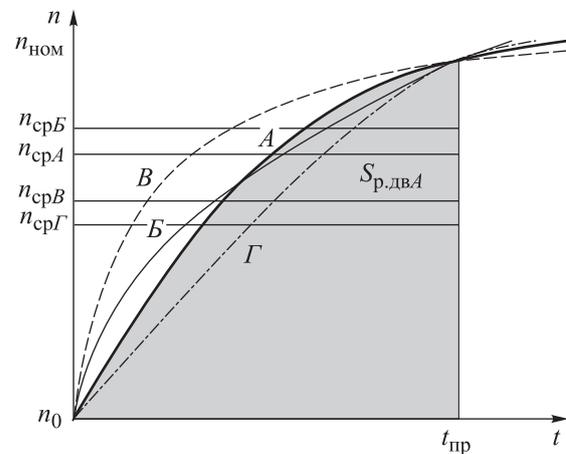


Рис. 5. Динамические характеристики четырех БД при различных формах ВСХ: А, Б, Г — повышенное время разгона БД при наилучшей комфортности движения автомобиля; В — наилучшие динамические качества в начале разгона БД и высокая средняя скорость движения автомобиля (ЧВ  $n_{\text{спB}}$ )

ния  $M_e$  на режимах ВСХ с ЧВ от  $n \approx 0,3 n_{\text{ном}}$  до  $n \approx 0,6 n_{\text{ном}}$  можно достигнуть путем перевода БД с четырехтактного цикла на двухтактный (см. рис. 3, ВСХ 1, 2, 3'').

Характеристики переходного процесса разгона автомобилей (или мотоциклов) описывают их динамические качества. Эти характеристики в виде зависимостей скоростей движения двух автомобилей от времени приведены на рис. 4. Введены следующие обозначения:  $v_{\text{кон}}$  — конечная скорость движения автомобиля;  $v_k$  — скорость движения автомобиля, характеризующая зону допустимой нестабильности параметра на УР (переходный процесс считается закончившимся, если ЧВ достигнет  $n_k = 0,95 n_{\text{ном}}$ );  $S_{pA}$  и  $S_{pB}$  — площади (пройденные пути) под характе-

ристикой разгонов автомобилей *A* и *B*;  $t_{рА}$  и  $t_{рБ}$  — продолжительность разгона (приемистость) автомобиля *A* и *B* соответственно.

Как видно, из рис. 4, автомобиль *A* разгоняется быстрее, чем автомобиль *B*, затрачивая при этом меньшие путь и время.

Динамические характеристики БД — характеристики разгона четырех БД от режима с ЧВ  $n_0$  до режима с конечной номинальной ЧВ  $n_{ном}$  — при различных формах ВСХ приведены на рис. 5. Здесь  $S_{р,двА}$  — площадь под характеристикой разгона автомобиля *A*, т. е. путь, пройденный им;  $n_{срА}$ ,  $n_{срБ}$ ,  $n_{срВ}$ ,  $n_{срГ}$  — средние значения ЧВ автомобилей *A*, *B*, *B*, *Г* соответственно.

Как видно из рис. 5, характеристика *A* обеспечивает компромисс между динамическими качествами БД и комфортностью движения. Приемистость  $t_{пр}$  всех четырех двигателей одинакова.

**Перевод четырехтактного БД на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ.** Это направление улучшения мощностных и динамических показателей БД предполагает его работу по четырехтактному циклу на режимах со средними и высокими ЧВ — от  $n \approx 0,6n_{ном}$  до  $n_{ном}$  (см. рис. 3) — и его перевод на двухтактный цикл при низких ЧВ (от  $n \approx 0,3n_{ном}$  до  $n \approx 0,6n_{ном}$ ).

Работа БД в четырехтактном цикле ничем не отличается от классической организации его функционирования. Работа же по двухтактному циклу имеет свои особенности. Роль продувочных окон выполняют клапаны, а точнее — увеличенный период их перекрытия. Геометрия вертикального впускного канала и направляющих втулок клапанов в камере сгорания должна обеспечивать закрутку смеси при впуске/продувке (рис. 6, *a*).

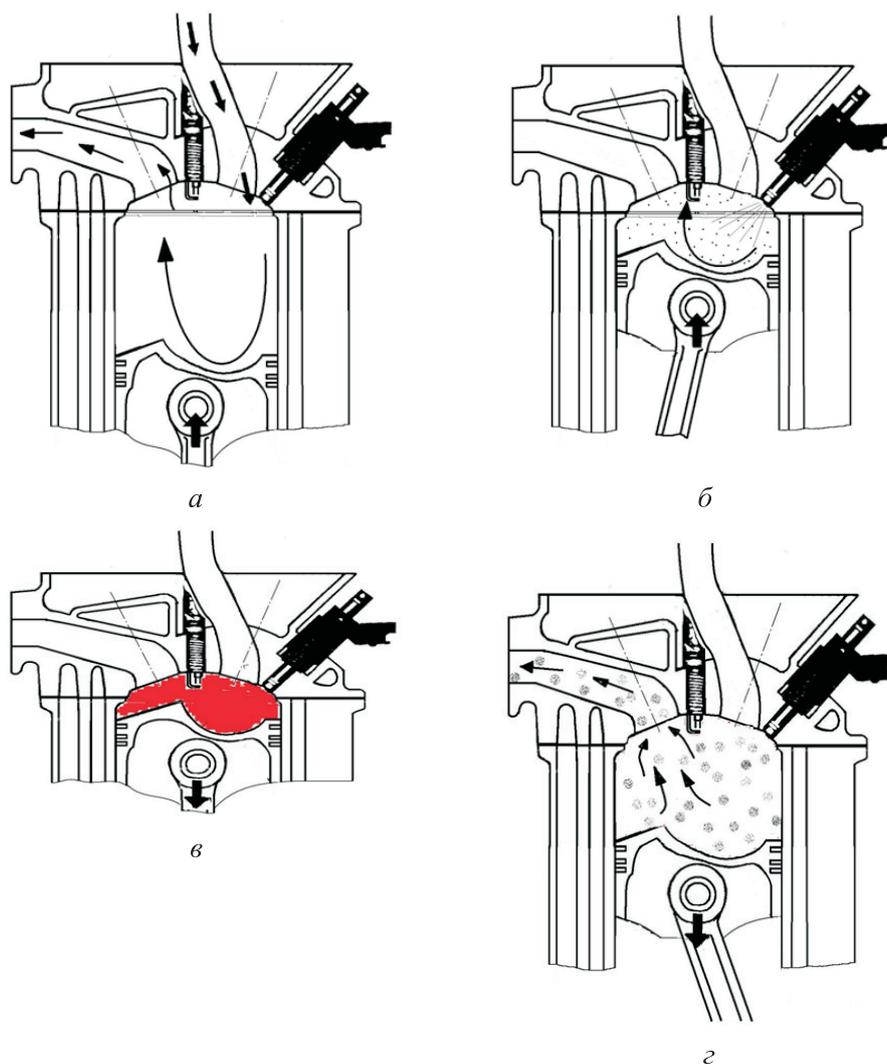


Рис. 6. Этапы работы БД в двухтактном режиме: *a* — продувка; *б* — сжатие; *в* — рабочий ход; *г* — выпуск

При продувке такая конфигурация потока особенно эффективна. Существенное значение при такой организации рабочего процесса имеет углубление в поршне, которое позволяет направлять поток к выпускному клапану. Период продувки начинается приблизительно за  $100^\circ$  поворота коленчатого вала (ПКВ) до нижней мертвой точки (НМТ) и заканчивается при положении коленчатого вала  $\sim 90^\circ$  после НМТ (длительность продувки около  $180^\circ$  ПКВ)

После продувки осуществляется сжатие рабочего заряда (рис. 6, б). Так как на исследуемом БД установлена система непосредственного впрыска топлива (бензина), необходимо обеспечить интенсивное движение рабочего заряда для лучшего смешивания воздуха с топливом и подвода этой смеси к свече. Такое движение обеспечивает углубление в поршне.

После сжатия происходит сгорание топлива — реализуется рабочий ход (рис. 6, в). Воспламенение рабочей смеси происходит от свечи накаливания, подача искры на которую осуществляется в момент  $40^\circ$  ПКВ до верхней мертвой точки (ВМТ) примерно так же, как и при работе по четырехтактному циклу.

В момент окончания рабочего хода открывается выпускной клапан (при положении коленчатого вала за  $100^\circ$  ПКВ до НМТ), и начинается выпуск (рис. 6, г). После выпуска вновь осуществляется продувка.

$N_e$ , кВт;  $M_e$ , Н·м

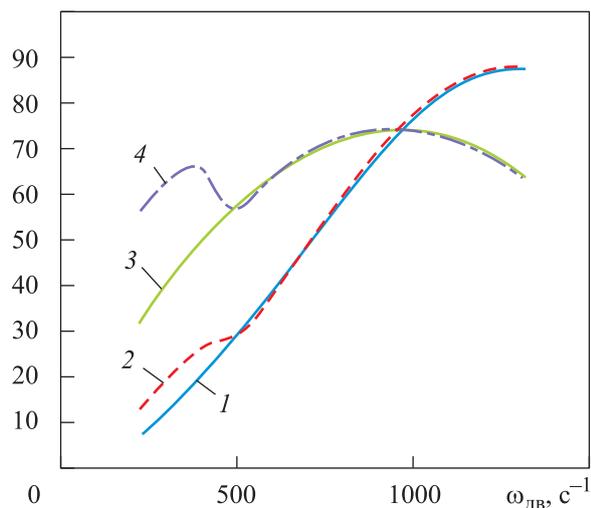


Рис. 7. Зависимости эффективной мощности  $N_e$  (1, 2) и крутящего момента  $M_e$  (3, 4) от угловой скорости  $\omega_{дв}$  традиционного четырехтактного БД (сплошные линии) и четырехтактного БД с его переводом на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ (штриховые линии)

В описанном методе улучшения мощностных и динамических показателей БД его переводят на работу в двухтактном цикле на режимах с небольшими ЧВ. При этом крутящий момент, развиваемый БД в двухтактном цикле, превышает примерно в 2 раза таковой для четырехтактного БД. Таким образом, БД, в котором реализуется переход от четырехтактного цикла на двухтактный, имеет ВСХ с повышенным крутящим моментом на режимах с ЧВ в пределах от  $n \approx 0,3n_{ном}$  до  $n \approx 0,6n_{ном}$  (рис. 7).

Следует отметить, что приведенные на рис. 7 графики эффективной мощности и крутящего момента традиционного четырехтактного БД и четырехтактного БД с его переводом на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ являются приблизительными. Чтобы более точно построить графики ВСХ для рассматриваемого БД, необходимо знать некоторые параметры двухтактного ДВС, которые будут отличаться от таковых для традиционного четырехтактного БД.

Четырехтактный БД 2/4 Sight с возможностью перевода на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ разработан и сконструирован компанией Ricardo (Великобритания) [15]. Основу двигателя составил один ряд цилиндров базового двигателя V6 с рабочим объемом 2,1 л, который в шестицилиндровой конфигурации обеспечил показатели, характерные для БД V8 с рабочим объемом 3...4 л.

Как видно из рис. 8, на режиме ВСХ с ЧВ  $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$  базовый четырехтактный БД имел крутящий момент, равный 290 Н·м, этот же БД с корректированием ВСХ (путем увеличения подачи топлива) — 320 Н·м, а БД 2/4 Sight — 470 Н·м. Его перевод на работу по двухтактному циклу осуществляется при ЧВ  $n = 4500 \text{ мин}^{-1}$ .

При разработке БД 2/4 Sight не требовалось значительных изменений конструкции прототипа; необходимо было лишь изменять фазы газообмена при переходе на двухтактный цикл. Для решения этой задачи разработана специальная система газораспределения с электрогидравлическими клапанами управления открытием и закрытием впускных и выпускных клапанов. Система управления также регулирует подачу топлива и воздуха в соответствии с тактностью БД.

В связи с этим разработана специальная система двухступенчатого наддува с промежуточным охлаждением воздуха. Эта система включает в себя один приводной нагнетатель и два

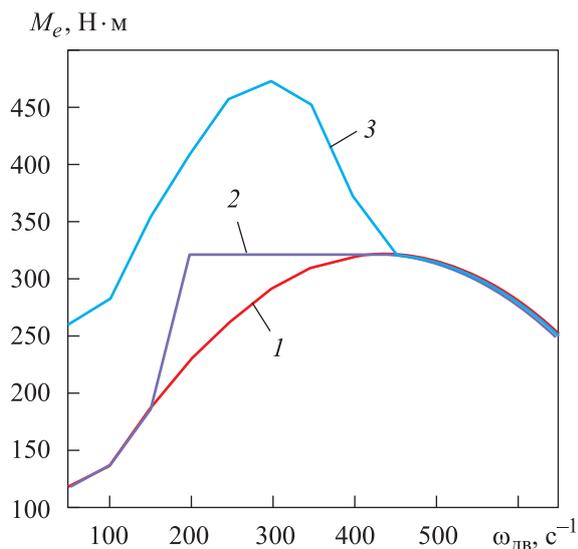


Рис. 8. Зависимости крутящего момента  $M_e$  от угловой скорости  $\omega_{дв}$  на режимах ВСХ базового БД (1), базового БД с корректированием подачи топлива (2) и БД 2/4 Sight (3)

турбокомпрессора с фиксированной геометрией и регуляторами давления (перепускными клапанами). В системе наддува использованы три воздушных охладителя нагнетаемого воздуха. Система обеспечивает необходимую подачу воздуха на режимах с низкими ЧВ в двухтактном цикле.

Рассмотренный перевод БД на двухтактный цикл при низких ЧВ позволяет повысить его динамические качества и приемистость транспортного средства, оснащенного этим двигателем. Анализ результатов исследований показал, что при увеличении скорости транспортного средства с 80 до 120 км/ч время разгона легкового автомобиля премиум-класса массой

1815 кг, оснащенного БД 2/4 Sight с возможностью его перевода на двухтактный цикл, сократилось с 8,1 до 6,7 с (по сравнению со временем разгона автомобиля штатной комплектации), т. е. более чем на 17 % [15].

**Расчетные исследования рабочего процесса дизеля при его работе в двухтактном цикле.** Рассмотренный метод улучшения мощностных и динамических качеств ДВС применим и к дизелям. В дизеле Д-245 (4 ЧН 11,0/12,5), установленном на гусеничную машину, его перевод на двухтактную работу осуществлялся при ЧВ  $n = 1600 \text{ мин}^{-1}$  (режим максимальной мощности соответствует ЧВ  $n = 2400 \text{ мин}^{-1}$ ). Для определения значений крутящего момента такого модернизированного дизеля проведены предварительные расчеты по методике, изложенной в работе [16].

При расчете рабочего процесса двухтактного дизеля, в основе конструкции которого лежит модель Д-245, использована цикловая подача топлива, полученная по экспериментальным данным [17, 18]. Такой подход при расчете позволяет проектировать дизель, у которого не надо изменять топливную аппаратуру.

Параметры ВСХ базового четырехтактного дизеля Д-245 приведены в табл. 1, где введены следующие обозначения:  $g_e$  — удельный эффективный расход топлива;  $G_t$  и  $G_b$  — часовой расход топлива и воздуха;  $p_k$  — давление наддувочного воздуха;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  $K_X$  — дымность ОГ;  $g_{ц}$  — цикловая подача топлива.

Работа двухтактного дизеля на режимах с малыми нагрузками или при малых ЧВ невоз-

Таблица 1

Параметры ВСХ базового четырехтактного дизеля Д-245

$n, \text{ мин}^{-1}$	$M_e, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$N_e, \text{ кВт}$	$g_e, \text{ г}/(\text{кВт}\cdot\text{ч})$	$G_t, \text{ кг}/\text{ч}$	$G_b, \text{ кг}/\text{ч}$	$p_k, \text{ бар}$	$\alpha$	$K_X, \text{ Hartridge}$	$g_{ц}, \text{ мг}$
1084	327	37,1	229,4	8,50	184	121	1,49	38,0	65,344
1201	355	44,7	229,9	10,27	215	130	1,44	30,0	71,260
1402	359	52,8	225,6	11,90	270	142	1,57	30,0	70,732
1506	366	57,7	222,9	12,85	302	152	1,62	22,0	71,104
1601	368	61,6	222,6	13,72	329	157	1,66	20	71,414
1805	356	67,2	224,6	15,10	384	170	1,75	10,5	69,714
2001	349	73,1	228,7	16,71	463	188	1,91	10	69,590
2200	341	78,5	235,3	18,47	533	204	1,99	10,5	69,962
2406	317	79,8	246,8	19,70	598	215	2,09	14,5	68,232

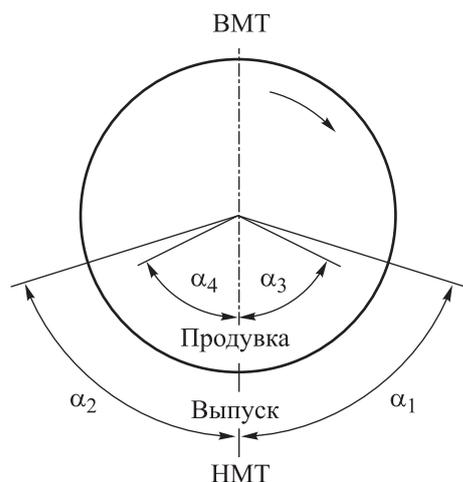


Рис. 9. Схема определения фаз газораспределения дизеля, работающего по двухтактному циклу

можно без наддува от приводного компрессора (для осуществления продувки цилиндра от ОГ свежим зарядом). Вблизи режима номинальной мощности наддув может осуществляться турбокомпрессором без помощи приводного компрессора.

При оптимизации рабочего процесса дизеля необходимо выбрать оптимальное давление

наддува для каждого режима, что возможно только с одновременным выбором фаз газораспределения, включающих в себя (рис. 9) начало  $\alpha_1$  и конец  $\alpha_2$  выпуска, начало  $\alpha_3$  и конец  $\alpha_4$  впуска/продувки.

Таким образом, для каждого из режимов необходимо выбрать четыре фазы газораспределения и давление наддува, т. е. одновременно надо выбрать пять параметров. Выбор всех параметров на каждом режиме осуществлялся с помощью программного комплекса ДИЗЕЛЬ-РК, разработанного профессором А.С. Кулешовым в МГТУ им. Н.Э. Баумана [19, 20].

В табл. 2 приведены результаты исследования фаз газораспределения при различных значениях давления наддува на режиме ВСХ при различных значениях ЧВ:  $n = 1084, 1601$  и  $2406 \text{ мин}^{-1}$ . Тип наддува — приводной компрессор. Введены следующие обозначения:  $N_{e \text{ сум}}$  — суммарная мощность дизеля с учетом приводного компрессора;  $N_k$  — мощность компрессора;  $N_{e \text{ п}}$  — эффективная мощность поршневой части комбинированного ДВС;  $\eta_v$  — коэффициент наполнения;  $\varphi$  — коэффициент продувки;  $\alpha$  — коэффициент избытка воздуха;  $p_z$  — максимальное давление цикла;  $\pi_k$  — степень повышения давления наддува.

Таблица 2

Параметры дизеля Д-245 на режиме ВСХ при различных значениях ЧВ

Вариант	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$N_{e \text{ сум}}$	$N_k$	$N_{e \text{ п}}$	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$\eta_v$	$\varphi$	$\alpha$	$p_z$ , бар	$\pi_k$
	град ПКВ				кВт								
<b><math>n = 1084 \text{ мин}^{-1}</math></b>													
1	89	57	61	61	59,0	-2,7	61,8	275,2	0,510	1,630	0,890	72,0	1,7
2	90	70	50	80	58,6	-11,8	70,4	290,0	0,585	1,850	1,370	120,0	1,7
3	<b>90</b>	<b>60</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>61,9</b>	<b>-7,2</b>	<b>69,1</b>	<b>246,0</b>	<b>0,555</b>	<b>1,770</b>	<b>1,160</b>	<b>112,0</b>	<b>1,5</b>
4	90	50	50	60	61,7	-6,6	58,3	249,0	0,594	1,530	1,240	116,0	1,5
5	90	40	50	60	60,8	-5,5	66,3	257,0	0,535	1,400	1,110	112,0	1,5
6	90	50	50	50	60,7	-5,9	66,6	255,0	0,510	1,590	1,060	108,0	1,5
<b><math>n = 1601 \text{ мин}^{-1}</math></b>													
1	90	50	45	65	106,5	-11,2	117,7	233,0	0,541	1,290	1,160	101,4	1,7
2	90	50	40	65	94,6	-10,0	104,6	262,0	0,478	1,300	1,020	94,7	1,7
3	90	50	50	65	109,8	-12,1	121,9	225,1	0,572	1,310	1,230	104,3	1,7
4	<b>90</b>	<b>50</b>	<b>60</b>	<b>65</b>	<b>112,0</b>	<b>-13,3</b>	<b>125,3</b>	<b>219,0</b>	<b>0,600</b>	<b>1,360</b>	<b>1,280</b>	<b>106,6</b>	<b>1,7</b>
5	90	50	70	65	107,5	-13,3	120,8	227,0	0,543	1,450	1,160	87,7	1,7
6	90	50	65	65	111,3	-13,5	124,8	220,0	0,586	1,390	1,250	104,2	1,7

Окончание таблицы 2

Вариант	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\alpha_3$	$\alpha_4$	$N_{e\text{ сум}}$	$N_k$	$N_{e\text{ п}}$	$g_{e_s}$ г/(кВт·ч)	$\eta_v$	$\varphi$	$\alpha$	$p_z$ , бар	$\pi_k$
	град ПКВ				кВт								
<b><math>n = 2406 \text{ мин}^{-1}</math></b>													
1	90	50	50	40	83,4	0,80	82,6	0,457	0,215	1,160	0,632	–	–
2	80	50	50	40	72,9	0,49	72,4	0,521	0,190	1,150	0,557	–	–
3	70	50	50	40	61,6	0,20	61,4	0,614	0,167	1,103	0,487	–	–
4	60	50	50	40	49,2	0,01	49,1	0,767	0,140	1,027	0,411	–	–
5	90	60	50	40	83,5	0,67	82,8	0,455	0,213	1,193	0,626	–	–
6	80	60	50	40	73,9	0,19	73,7	0,512	0,188	1,225	0,552	–	–
7	70	60	50	40	62,2	–0,08	62,3	0,605	0,165	1,195	0,485	–	–
8	60	60	50	40	50,1	–0,18	50,3	0,750	0,141	1,130	0,414	–	–
9	90	70	50	40	82,8	0,65	82,2	0,459	0,211	1,202	0,622	–	–
10	80	70	50	40	74,2	0,31	73,9	0,513	0,188	1,229	0,552	–	–
11	70	70	50	40	61,5	–0,18	61,7	0,611	0,163	1,227	0,478	–	–
12	60	70	50	40	51,5	–0,24	51,7	0,729	0,141	1,193	0,416	–	–
13	90	70	50	60	127,1	0,33	126,7	0,298	0,293	1,329	0,859	84,7	–
14	80	70	50	60	111,6	–0,25	111,8	0,337	0,258	1,333	0,759	77,0	–
15	70	70	50	60	90,9	–0,85	91,7	0,411	0,224	1,320	0,649	73,1	–
16	60	70	50	60	75,6	–0,73	76,4	0,494	0,188	1,276	0,554	–	–
17	90	70	60	60	131,5	–0,19	131,7	0,286	0,302	1,372	0,889	85,4	–
18	80	70	60	60	108,5	–1,04	109,5	0,344	0,253	1,356	0,740	75,5	–
19	70	70	60	60	83,8	–1,60	85,4	0,442	0,205	1,339	0,603	67,8	–
20	60	70	60	60	64,7	–1,54	66,2	0,571	0,170	1,297	0,499	65,3	–
21	110	70	70	70	151,3	–5,52	156,8	0,240	0,471	1,278	1,383	138,3	–
22	100	70	70	70	155,7	–2,89	158,6	0,238	0,408	1,310	1,202	103,0	–
23	90	70	70	70	137,4	–1,01	138,4	0,273	0,320	1,384	0,935	92,6	–
24	80	70	70	70	105,1	–1,84	106,9	0,353	0,252	1,379	0,740	81,0	–
25	70	70	70	70	48,8	–3,70	52,5	0,718	0,146	1,287	0,428	66,5	–
26	110	70	70	80	151,1	–5,69	156,8	0,241	0,472	1,284	1,392	140,2	–
27	100	70	70	80	156,6	–3,45	160,0	0,236	0,425	1,303	1,253	105,4	–
28	90	70	70	80	144,6	–0,87	145,6	0,259	0,333	1,380	0,980	97,9	–
29	120	70	80	80	140,7	–6,55	147,2	0,256	0,498	1,340	1,470	141,1	–
30	110	70	80	80	152,3	–5,35	157,7	0,239	0,461	1,325	1,358	129,7	–
31	100	70	80	80	150,0	–2,21	152,3	0,248	0,378	1,374	1,110	101,9	–
32	110	70	80	80	152,4	–5,35	157,7	0,239	0,461	1,325	1,358	129,7	–
33	100	70	80	80	150,0	–2,21	152,3	0,248	0,378	1,374	1,112	101,9	–
34	90	70	80	80	123,6	–1,35	124,9	0,302	0,298	1,429	0,876	93,0	–
35	110	70	50	80	150,7	–1,42	152,1	0,248	0,420	1,223	1,240	104,6	–
36	100	70	50	80	156,8	–2,10	158,9	0,237	0,414	1,243	1,220	105,3	–
<b>37</b>	<b>90</b>	<b>70</b>	<b>50</b>	<b>80</b>	<b>158,6</b>	<b>–1,39</b>	<b>160,0</b>	<b>0,236</b>	<b>0,382</b>	<b>1,261</b>	<b>1,127</b>	<b>101,4</b>	–
38	80	70	50	80	144,8	–0,18	145,0	0,260	0,323	1,297	0,949	94,9	–
39	70	70	50	80	103,9	–0,24	104,2	0,362	0,259	1,244	0,778	85,0	–
40	60	70	50	80	72,4	–2,27	74,7	0,505	0,183	1,221	0,537	72,0	–

Таблица 3

## Оптимизированные параметры двухтактного дизеля Д-245 для пяти режимов ВСХ

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$N_e$ , кВт	$M_e$ , Н·м	$g_e$ , г/(кВт·ч)	$\alpha$	$p_z$ , бар	$\pi_k$	Тип наддува
1084	61,7	543,5	249,0	1,24	116,0	1,5	К
1201	78,8	626,5	229,8	1,30	106,8	1,5	К
1402	90,7	617,8	234,0	1,24	99,0	1,7	К
1601	112,0	668,0	219,0	1,28	106,6	1,7	К
2406	158,6	629,5	235,7	1,13	101,4	2,2	ТК

Таблица 4

Параметры ВСХ дизеля Д-245 с его переводом на двухтактный цикл при ЧВ  $n \leq 1601$  мин<sup>-1</sup>

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$M_e$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$M_e$ , Н·м	$n$ , мин <sup>-1</sup>	$M_e$ , Н·м
1084	543	1506	650	2001	349
1201	580	1601	668	2200	341
1402	630	1805	356	2406	317

Оптимальные варианты, выбранные по минимальному удельному расходу топлива, выделены в табл. 2 жирным шрифтом. Так, при ЧВ  $n = 1084$  мин<sup>-1</sup> коэффициент продувки  $\phi$  должен быть больше 1,3, а коэффициент избытка воздуха  $\alpha > 1,1$ . Исходя из этого для режима  $n = 1084$  мин<sup>-1</sup> оптимальным вариантом признан вариант № 3.

Результаты оптимизации рабочего процесса двухтактного дизеля Д-245 для пяти режимов ВСХ приведены в табл. 3, где ТК — турбоком-

Таблица 5

## Мощностные характеристики дизеля Д-245 с возможностью его перевода на двухтактный цикл на режимах с пониженной ЧВ

$n$ , мин <sup>-1</sup>	$N_{e \max}$ , кВт	$N_{св}$ , кВт	$M_{e \max}$ , Н·м	$M_{св}$ , Н·м
1100	63,2	61,6	548,5	534,4
1200	72,9	70,8	580,0	563,2
1300	82,6	79,9	606,4	586,8
1400	92,2	88,9	623,2	606,5
1500	102,0	97,9	649,3	623,2
1600	111,9	106,9	667,7	638,0
1700	64,8	58,8	364,0	330,5
1800	67,2	60,1	356,3	318,7
1900	70,0	61,7	351,8	310,0
2000	73,1	63,4	349,0	302,7
2100	76,1	64,8	346,0	294,9
2200	78,6	65,6	341,0	284,9
2300	80,0	65,3	332,2	270,9
2400	79,9	63,2	318,1	251,3

прессор. По результатам проведенной оптимизации рабочего процесса двухтактного дизеля типа Д-245 на режимах ВСХ при ЧВ  $n \leq 1601$  мин<sup>-1</sup> получены значения крутящего момента дизеля при скоростных режимах  $n = 1084 \dots 1601$  мин<sup>-1</sup>. На режимах ВСХ с ЧВ  $n > 1601$  мин<sup>-1</sup> двухтактный цикл становится менее эффективным по сравнению с четырехтактным. Поэтому на этих режимах целесообразна работа по четырехтактному циклу. При реализации указанной работы дизеля Д-245 на режимах ВСХ по двухтактному циклу при  $n \leq 1601$  мин<sup>-1</sup> и по четырехтактному циклу при  $n > 1601$  мин<sup>-1</sup> формируется ВСХ с параметрами, приведенными в табл. 4.

После аппроксимации этой ВСХ двумя полиномами третьей степени получено следующее аналитическое выражение для максимального крутящего момента:

$$M_{e \max} = \begin{cases} -426 + 3954 \frac{n}{n_{\text{ном}}} - 5126 \frac{n^2}{n_{\text{ном}}^2} + 2484 \left( \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3 & \text{при } n \leq 1600 \text{ мин}^{-1}; \\ -272 - 846 \frac{n}{n_{\text{ном}}} + 1013 \frac{n^2}{n_{\text{ном}}^2} - 407 \left( \frac{n}{n_{\text{ном}}} \right)^3 & \text{при } n > 1600 \text{ мин}^{-1}. \end{cases}$$

Мощностные характеристики дизеля Д-245 с возможностью его перевода на двухтактный цикл на режимах с пониженной ЧВ приведены в табл. 5, где  $N_{e \max}$  и  $N_{св}$  — максимальная и свободная мощность;  $M_{св}$  — свободный крутящий момент.

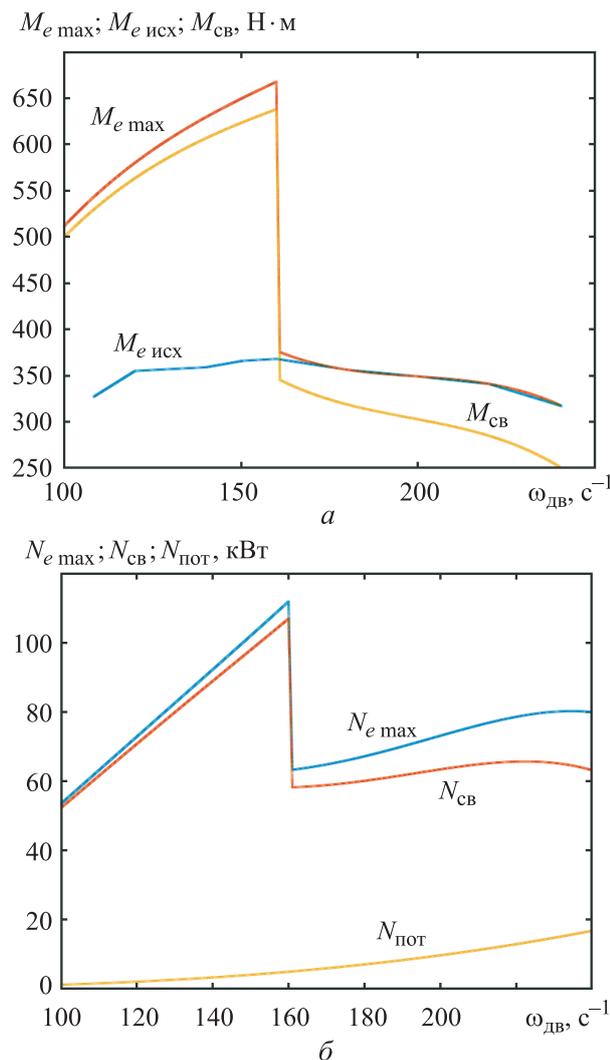


Рис. 10. Зависимости максимального  $M_{e\ max}$  и свободного  $M_{св}$  крутящих моментов (а), мощности потерь  $N_{пот}$ , максимальной  $N_{e\ max}$  и свободной  $N_{св}$  мощностей от угловой скорости  $\omega_{дв}$  на режимах ВСХ дизеля Д-245 с возможностью его перевода на двухтактный цикл на режимах с пониженной ЧВ

Зависимости максимального  $M_{e\ max}$  и свободного  $M_{св}$  крутящих моментов, мощности потерь  $N_{пот}$ , максимальной  $N_{e\ max}$  и свободной  $N_{св}$  мощностей от ЧВ  $n$  на режимах ВСХ дизеля Д-245 с возможностью его перевода на двухтактный цикл на режимах с пониженной ЧВ приведены на рис. 10. Там же показана зависимость исходного крутящего момента  $M_{e\ isx}$  (т. е. крутящего момента двигателя, работающего во всем диапазоне ЧВ, включая режимы с низкими ЧВ, по четырехтактному циклу) от ЧВ.

## Выводы

1. Показано, что для повышения динамических качеств ДВС и транспортного средства необходимо увеличивать мощностные характеристики (эффективную мощность, крутящий момент) двигателя на режимах ВСХ.

2. В качестве эффективного улучшения мощностных и динамических показателей рассмотрен перевод четырехтактного ДВС на работу по двухтактному циклу на режимах с низкими ЧВ. Этот метод улучшения мощностных и динамических показателей может быть реализован как в БД, так и в дизелях.

3. Приведены особенности перевода БД 2/4 Sight компании Ricardo с четырехтактного цикла на двухтактный. Для реализации двухтактной работы применены двухступенчатый наддув с промежуточным охлаждением воздуха и система переключения клапанов газораспределения.

4. Проведены расчетные исследования рабочего процесса дизеля при его работе в двухтактном цикле. Получена ВСХ дизеля при реализации его перевода на двухтактный цикл на режимах с низкими ЧВ.

## Литература

- [1] Александров А.А., Иващенко Н.А., ред. *Двигатели внутреннего сгорания*. Т. IV-14. Москва, Машиностроение, 2013. 784 с.
- [2] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. *Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 1990. 288 с.
- [3] Луканин В.Н., Шатров М.Г., ред. *Двигатели внутреннего сгорания*. Кн. 1. Теория рабочих процессов. Москва, Высшая школа, 2005. 460 с.
- [4] Чайнов Н.Д., ред. *Конструирование двигателей внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 2008. 496 с.
- [5] Грехов Л.В., Иващенко Н.А., Марков В.А. *Топливная аппаратура и системы управления дизелей*. Москва, Легион-Автодата, 2005. 344 с.
- [6] Марков В.А., Кислов В.Г., Хватов В.А. *Характеристики топливоподачи транспортных дизелей*. Москва, изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1997. 160 с.

- [7] *Bosch. Системы управления дизельными двигателями*. Москва, За рулем, 2004. 480 с.
- [8] *Bosch. Системы управления бензиновыми двигателями*. Москва, За рулем, 2005. 432 с.
- [9] Папонов В.С., Минеев А.М., ред. *Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков*. Москва, НИЦ Инженер, 2000. 332 с.
- [10] Шатров В.И., Кузнецов А.Г., Марков В.А. Проблемы создания и совершенствования систем управления дизелей. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 1999, № 5–6, с. 76–87.
- [11] Хрящев Ю.Е., Слабов Е.П., Матросов Л.П. Об управлении внешней скоростной характеристикой дизеля. *Автомобильная промышленность*, 1999, № 11, с. 7–10.
- [12] Крутов В.И. *Автоматическое регулирование и управление двигателями внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 1989. 416 с.
- [13] Патрахальцев Н.Н. *Неустановившиеся режимы работы двигателей внутреннего сгорания*. Москва, РУДН, 2009. 380 с.
- [14] Крутов В.И. *Двигатель внутреннего сгорания как регулируемый объект*. Москва, Машиностроение, 1978. 472 с.
- [15] Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Марков В.А. и др. Четырехтактные двигатели с возможностью перевода на двухтактный цикл. *Грузовик*, 2021, № 8, с. 16–26.
- [16] Орлин А.С., Круглов М.Г., ред. *Двигатели внутреннего сгорания*. Москва, Машиностроение, 1983. 372 с.
- [17] Марков В.А., ред. *Моторные топлива, производимые из растительных масел*. Рига, Lambert Academic Publ., 2019. 420 с.
- [18] Полухин Е.Е. *Улучшение эксплуатационно-технических показателей транспортного дизеля путем совершенствования системы регулирования угла опережения впрыскивания топлива*. Дисс. ... канд. тех. наук. Москва, МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 152 с.
- [19] Kuleshov A.S. Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range. *SAE Tech. Paper*, 2005, no. 2005-01-2119, doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-2119>
- [20] Kuleshov A.S. Multi-zone DI diesel spray combustion model and its application for matching the injector design with piston bowl shape. *SAE Tech. Paper*, 2007, no. 2007-01-1908, doi: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1908>

## References

- [1] Aleksandrov A.A., Ivashchenko N.A., eds. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Т. IV-14 [Combustion engines. Vol. IV-14]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2013. 784 p. (In Russ.).
- [2] Orlin A.S., Kruglov M.G., ed. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 288 p. (In Russ.).
- [3] Lukanin V.N., Shatrov M.G., eds. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya*. Кн. 1. Teoriya rabochikh protsessov [Combustion engines. Vol. 1. Theory of working processes]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2005. 460 p. (In Russ.).
- [4] Chaynov N.D., ed. *Konstruirovaniye dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Design of combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2008. 496 p. (In Russ.).
- [5] Grekhov L.V., Ivashchenko N.A., Markov V.A. *Toplivnaya apparatura i sistemy upravleniya dizeley* [Fuel injection equipment and control systems for diesel engines]. Moscow, Legion-Avtodata Publ., 2005. 344 p. (In Russ.).
- [6] Markov V.A., Kislov V.G., Khvatov V.A. *Kharakteristiki toplivopodachi transportnykh dizeley* [Characteristics of fuel supply in transport diesels]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 1997. 160 p. (In Russ.).
- [7] *Bosch. Sistemy upravleniya dizel'nyimi dvigatelyami* [Bosch. Control systems of diesel engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2004. 480 p. (In Russ.).
- [8] *Bosch. Sistemy upravleniya benzinovymi dvigatelyami* [Bosch. Control systems of petrol engines]. Moscow, Za rulem Publ., 2005. 432 p. (In Russ.).
- [9] Paponov V.S., Mineev A.M., eds. *Sovremennye podkhody k sozdaniyu dizeley dlya legkovykh avtomobiley i malotonnazhnykh gruzovikov* [Modern ways of designing diesel for light and long combination vehicles]. Moscow, NIT's Inzhener Publ., 2000. 332 p. (In Russ.).

- [10] Shatrov V.I., Kuznetsov A.G., Markov V.A. Problems of designing and improvement of diesel control systems. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Mashinostroenie* [BMSTU Journal of Mechanical Engineering], 1999, no. 5–6, pp. 76–87. (In Russ.).
- [11] Khryashchev Yu.E., Slabov E.P., Matrosov L.P. On controlling full-load curve of a diesel. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 1999, no. 11, pp. 7–10. (In Russ.).
- [12] Krutov V.I. *Avtomaticheskoe regulirovanie i upravlenie dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Automated regulation and control on combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1989. 416 p. (In Russ.).
- [13] Patrakhaltsev N.N. *Neustanovivshiesya rezhimy raboty dvigateley vnutrennego sgoraniya* [Transient working regimes of combustion engines]. Moscow, RUDN Publ., 2009. 380 p. (In Russ.).
- [14] Krutov V.I. *Dvigatel' vnutrennego sgoraniya kak reguliruemyy ob'ekt* [Combustion engine as a regulated object]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1978. 472 p. (In Russ.).
- [15] Savastenko E.A., Savastenko A.A., Markov V.A., et al. Four-stroke engines with translation capability on a two-stroke cycle. *Gruzovik*, 2021, no. 8, pp. 16–26. (In Russ.).
- [16] Orlin A.S., Kruglov M.G., ed. *Dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Combustion engines]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1983. 372 p. (In Russ.).
- [17] Markov V.A., ed. *Motornye topliva, proizvodimye iz rastitel'nykh masel* [Motor fuels from vegetable oils]. Riga, Lambert Academic Publ., 2019. 420 p. (In Russ.).
- [18] Polukhin E.E. *Uluchshenie ekspluatatsionno-tekhnicheskikh pokazateley transportnogo dizelya putem sovershenstvovaniya sistemy regulirovaniya ugla operezheniya vpryskivaniya topliva. Diss. kand. tekh. nauk* [Improvement of technical performance characteristics of a transport diesel by means of enhancement of regulation system for fuel injection advance angle. Kand. tech. sci. diss.]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2008. 152 p. (In Russ.).
- [19] Kuleshov A.S. Model for predicting air-fuel mixing, combustion and emissions in DI diesel engines over whole operating range. *SAE Tech. Paper*, 2005, no. 2005-01-2119, doi: <https://doi.org/10.4271/2005-01-2119>
- [20] Kuleshov A.S. Multi-zone DI diesel spray combustion model and its application for matching the injector design with piston bowl shape. *SAE Tech. Paper*, 2007, no. 2007-01-1908, doi: <https://doi.org/10.4271/2007-01-1908>

Статья поступила в редакцию 25.10.2021

## Информация об авторах

**МАРКОВ Владимир Анатольевич** — доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [vladimir.markov58@yandex.ru](mailto:vladimir.markov58@yandex.ru)).

**БАРЧЕНКО Филипп Борисович** — кандидат технических наук, доцент кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: [barchenko@bmstu.ru](mailto:barchenko@bmstu.ru)).

**САВАСТЕНКО Эдуард Андреевич** — кандидат технических наук, старший преподаватель. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский проспект, д. 64, e-mail: [e.d.u.a.r.d@inbox.ru](mailto:e.d.u.a.r.d@inbox.ru)).

## Information about the authors

**MARKOV Vladimir Anatolievich** — Doctor of Science (Eng.), Professor, Head of the Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [vladimir.markov58@yandex.ru](mailto:vladimir.markov58@yandex.ru)).

**BARChENKO Filipp Borisovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: [barchenko@bmstu.ru](mailto:barchenko@bmstu.ru)).

**SAVASTENKO Eduard Andreevich** — Candidate of Science (Eng.), Assistant Professor. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradsky prospect, Bldg. 64, e-mail: [e.d.u.a.r.d@inbox.ru](mailto:e.d.u.a.r.d@inbox.ru)).

**САВАСТЕНКО Андрей Александрович** — кандидат технических наук, доцент. Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (125319, Москва, Российская Федерация, Ленинградский проспект, д. 64, e-mail: dozentrud@mail.ru).

**SAVASTENKO Andrey Aleksandrovich** — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor. Moscow Automobile and Road Construction State Technical University (125319, Moscow, Russian Federation, Leningradsky prospect, Bldg. 64, e-mail: dozentrud@mail.ru).

**ЛОТФУЛЛИН Шамиль Рафилевич** — кандидат технических наук, заместитель директора. ООО «ПариТЭК-Технологии» (423822, Набережные Челны, Российская Федерация, БСИ (Сармановский тракт), e-mail: lshr@mail.ru).

**LOTFULLIN Shamil Rafilevich** — Candidate of Science (Eng.), Deputy Director. ООО RariTEK (423822, Naberezhnye Chelny, Republic of Tatarstan, Russian Federation, Starosarmanovskaya St (BSI district), e-mail: lshr@mail.ru).

**НЕВЕРОВ Всеволод Анатольевич** — аспирант кафедры «Комбинированные двигатели и альтернативные энергоустановки». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: sevasxp@mail.ru).

**NEVEROV Vsevolod Anatolievich** — Postgraduate, Department of Piston Engines. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2<sup>nd</sup> Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: sevasxp@mail.ru).

**Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:**

Марков В.А., Барченко Ф.Б., Савастенко Э.А., Савастенко А.А., Лотфуллин Ш.Р., Неверов В.А. Форсирование четырехтактного двигателя путем перевода на работу по двухтактному циклу в режимах с низкими частотами вращения. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 2, с. 38–52, doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-38-52

**Please cite this article in English as:**

Markov V.A., Barchenko F.B., Savastenko E.A., Savastenko A.A., Lotfullin Sh.R., Neverov V.A. Forcing a Four-Stroke Engine by Switching it to a Two-Stroke Cycle at Low-Speed Modes. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 2, pp. 38–52, doi: 10.18698/0536-1044-2022-2-38-52



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана  
предлагает читателям монографию**

**«Строительная механика композитных  
конструкций ракетно-космической техники.  
Курс лекций»**

**Авторы: Ан.А. Смердов, Ал.А. Смердов**

Приведены основные положения теории оптимального проектирования конструкций, рассмотрены методы проектных расчетов композитных материалов и простейших элементов конструкций, а также несущих композитных оболочек различных конструктивных схем и размеростабильных композитных космических конструкций. Представлены алгоритмы расчета типовых композитных элементов конструкций, которые могут быть самостоятельно использованы студентами при выполнении курсовых и дипломных проектов.

Для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракетно-космических комплексов».

**По вопросам приобретения обращайтесь:**

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.  
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;  
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>