

Энергетическое, металлургическое и химическое машиностроение

УДК 621.436

doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-9-18

Анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров

Ин Лю, А.Г. Кузнецов

МГТУ им. Н.Э. Баумана

An Analysis of the Working Process of a Diesel Engine under Cylinder Deactivation

Liu Ying, A.G. Kuznetsov

Bauman Moscow State Technical University

Обоснование эффективности отключения цилиндров как метода управления дизельным двигателем на частичных режимах часто проводят по характеристикам, соответствующим его работе без отключения цилиндров. При этом теоретические и практические результаты значительно различаются, так как рабочие процессы в отключенных и работающих цилиндрах протекают по-разному. Методом моделирования проведен анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров. С помощью компьютерной модели выполнены расчеты рабочих процессов в отключенных и работающих цилиндрах. Дана оценка потерь энергии, определяющих топливную экономичность двигателя. Установлено, что значительное влияние на удельный эффективный расход топлива оказывает работа системы газораспределения в отключенных цилиндрах. Рассмотрена работа двигателя на частичных по частоте вращения и крутящему моменту режимах при отключении различного числа цилиндров. Полученные результаты показывают особенности рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров и позволяют более точно оценивать эффективность такого метода управления двигателями.

Ключевые слова: дизельный двигатель, рабочий процесс, отключение цилиндров, система газораспределения, топливная экономичность, баланс энергии топлива

The effect of cylinder deactivation as a method of controlling a diesel engine working in partial load modes is usually justified based on the characteristics corresponding to the engine performance without cylinder deactivation. However, the results obtained through theoretical analysis and in practice have significant differences, since the working processes of activated and deactivated cylinders run in different ways. In this paper, a simulation method is used to analyze the working process of the diesel engine under cylinder deactivation. The working processes in activated and deactivated cylinders are calculated using a computer model, and energy losses determining engine fuel efficiency are estimated. It is shown that the valve system in deactivated cylinders has a significant effect on the specific fuel consumption. The engine performance in partial load modes at different rotational speeds and torques and with a varying number of deactivated cylinders is investigated. The results obtained demonstrate the characteristics of the engine working

process under cylinder deactivation and enable a more accurate estimation of the effect of this engine control method.

Keywords: diesel engine, working process, cylinder deactivation, valve train, fuel efficiency, fuel energy balance

Отключение цилиндров как метод управления поршневыми двигателями различного назначения успешно применяют на частичных по частоте вращения и нагрузке режимах их работы для улучшения топливной экономичности [1–7].

В информационных источниках отмечено, что отключение цилиндров может быть эффективным как для бензиновых [1–5], так и для дизельных двигателей [8–15] мощностью от десятков до тысяч киловатт. Такой метод управления используют для рядных четырехцилиндровых автомобильных двигателей [1, 2, 4, 15] и для многоцилиндровых тепловозных и судовых двигателей с V-образным расположением цилиндров.

Целесообразность отключения цилиндров обоснована тем, что при малых нагрузках снижается подача топлива, а режимы малых подач топлива находятся вне зоны наилучшей топливной экономичности двигателя. При отключении части цилиндров работающие цилиндры (РЦ) для обеспечения необходимой мощности двигателя переходят в режим повышенной подачи топлива с лучшими показателями рабочего процесса, приближаясь к зоне наилучшей топливной экономичности.

Эффективность метода отключения цилиндров также в значительной степени зависит от работы системы газораспределения (СГР) в отключенных цилиндрах (ОЦ) [2, 14, 15].

Использование стандартных характеристик двигателя со всеми РЦ при анализе его работы с ОЦ является правомерным для описания рабочего процесса в РЦ. В ОЦ его протекание во многом определяется функционированием СГР и нуждается в отдельном рассмотрении.

Цель работы — расчетное исследование особенностей рабочего процесса двигателя при отключении цилиндров.

В качестве объекта исследования выбран 16-цилиндровый дизельный двигатель типа Д49 (16ЧН26/26) производства ОАО «Коломенский завод» номинальной мощностью 2500 кВт при частоте вращения коленчатого вала (далее частота вращения) $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$. Для моделирования работы рассматриваемого двигателя в программном комплексе GT-SUITE [16] со-

ставлена компьютерная модель, в которой заложена возможность задания режимов работы впускных и выпускных клапанов в каждом цилиндре.

Адекватность компьютерной модели проверена путем сравнения расчетных и экспериментальных параметров рабочего процесса двигателя. Расчеты проведены для частичных режимов работы двигателя при частоте вращения $n = 450, 556, 630, 742 \text{ мин}^{-1}$ и крутящем моменте $M = 1000 \dots 4000 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

На рис. 1 приведены результаты сравнения расчетных значений удельного эффективного расхода топлива g_e с экспериментальными данными при работе двигателя в рассматриваемых режимах. Хорошее совпадение результатов расчета с экспериментальными данными подтвердило возможность использования разработанной компьютерной модели для проведения дальнейшего исследования.

На первом этапе моделирования исследован рабочий процесс двигателя на частичных режимах работы при отключении восьми цилиндров, что наиболее целесообразно для

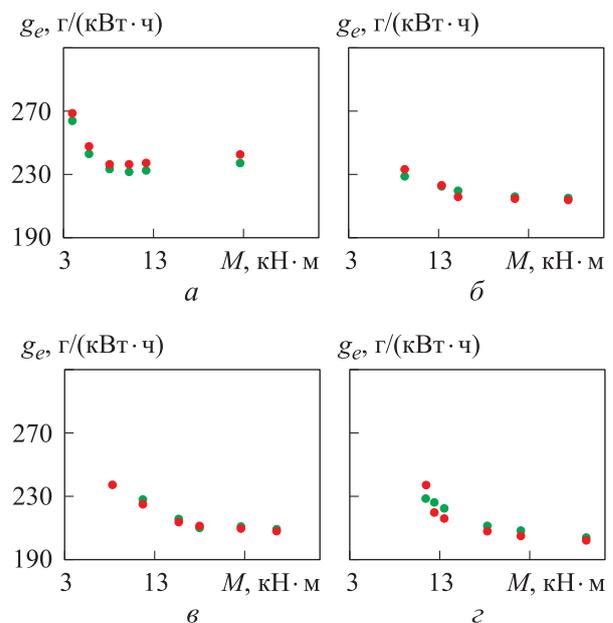


Рис. 1. Удельный эффективный расход топлива: (● — расчет; ● — эксперимент)

a — $n = 450 \text{ мин}^{-1}$; б — $n = 556 \text{ мин}^{-1}$; в — $n = 630 \text{ мин}^{-1}$; г — $n = 742 \text{ мин}^{-1}$

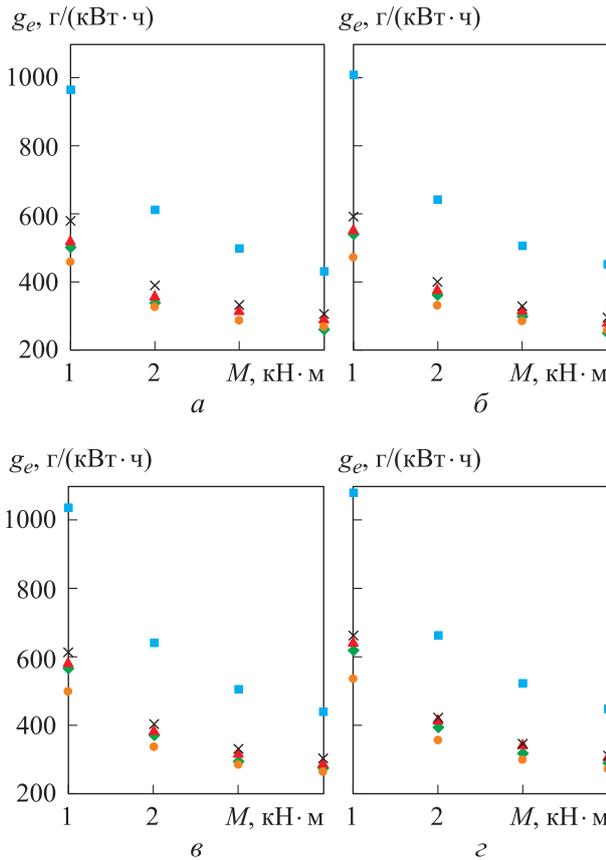


Рис. 2. Удельный эффективный расход топлива при различных вариантах отключения цилиндров: (♦ — $z = 0$; ▲ — $z = 1$; × — $z = 2$; ■ — $z = 3$; ● — $z = 4$)
 а — $n = 450 \text{ мин}^{-1}$; б — $n = 556 \text{ мин}^{-1}$;
 в — $n = 630 \text{ мин}^{-1}$; г — $n = 742 \text{ мин}^{-1}$

16-цилинд-рового V-образного двигателя Д49. Рассмотрена эксплуатация двигателя без отключения ($z = 0$) и с отключением цилиндров (с прекращением подачи в них топлива) при следующих вариантах работы в ОЦ системы газораспределения: $z = 1$ — все клапаны функционируют в штатном режиме; $z = 2$ — впускные клапаны закрыты, выпускные работают в штатном режиме; $z = 3$ — впускные функционируют в штатном режиме, выпускные клапаны закрыты; $z = 4$ — все клапаны закрыты.

Эффективность различных вариантов отключения цилиндров оценивали по значению удельного эффективного расхода топлива g_e . На рис. 2 приведены зависимости $g_e = f(M)$ при четырех значениях частоты вращения для рассмотренных вариантов работы двигателя.

Наибольшую наглядность при оценке топливной экономичности двигателя дают аналогичные зависимости, построенные для измене-

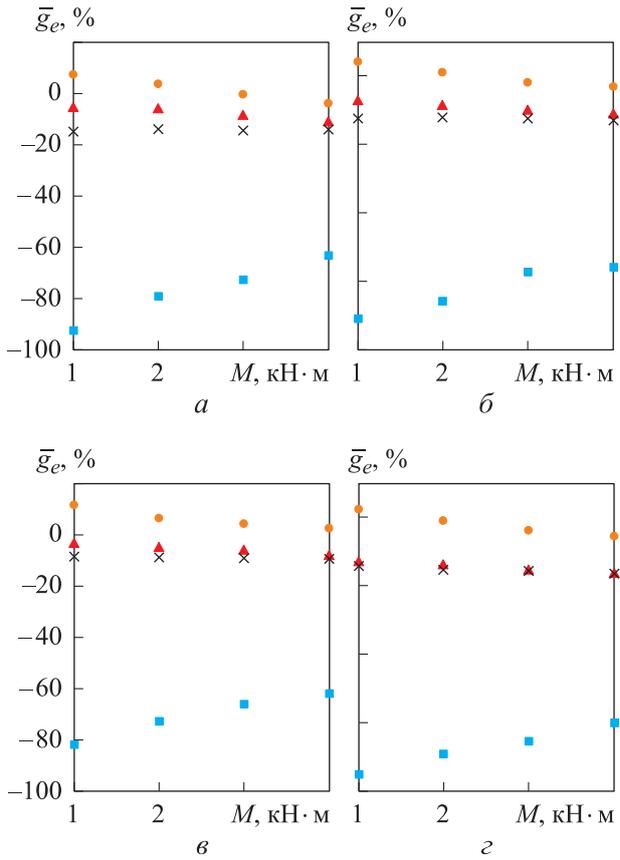


Рис. 3. Относительный удельный эффективный расход топлива при различных вариантах отключения цилиндров: (▲ — $z = 1$; × — $z = 2$; ■ — $z = 3$; ● — $z = 4$)
 а — $n = 450 \text{ мин}^{-1}$; б — $n = 556 \text{ мин}^{-1}$;
 в — $n = 630 \text{ мин}^{-1}$; г — $n = 742 \text{ мин}^{-1}$

ния относительного удельного эффективного расхода топлива (рис. 3)

$$\bar{g}_e = \frac{g_{e,z=0} - g_{e,z=i}}{g_{e,z=0}} 100\% ,$$

где $g_{e,z=0}$ и $g_{e,z=i}$ — удельный эффективный расход топлива при работе двигателя без отключения цилиндров и с отключением восьми цилиндров.

Положительные значения относительного удельного эффективного расхода топлива соответствуют улучшению топливной экономичности, отрицательные — ухудшению.

Как видно из рис. 2 и 3, наибольшее снижение расхода топлива достигнуто при закрытии впускных и выпускных клапанов в ОЦ. Отключение подачи топлива в восемь цилиндров при штатной работе клапанов практически не приводит к экономии топлива. Закрытие либо впускных, либо выпускных клапанов

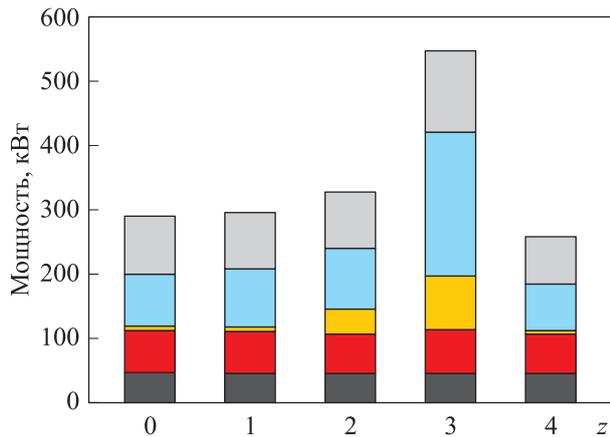


Рис. 4. Баланс энергии топлива в двигателе при различных вариантах отключения цилиндров (■ N_e ; ■ $N_{тр}$; ■ N_t ; ■ N_n ; ■ $N_{ог}$)

ухудшает топливную экономичность. Наихудший результат получен при закрытии в ОЦ выпускных клапанов, для этого варианта наблюдается значительный рост расхода топлива.

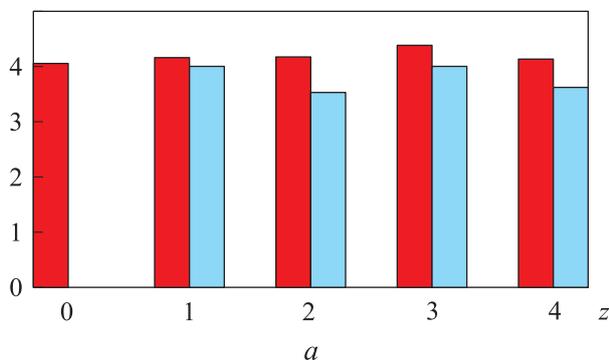
Влияние отключения цилиндров проявляется при малых значениях крутящего момента

и становится менее заметным с ростом нагрузки (см. рис. 2 и 3). В случае отключения впрыска топлива и закрытия впускных и выпускных клапанов максимальные значения снижения относительного удельного эффективного расхода топлива, достигаемые при крутящем моменте $M = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$, составляют 8,4, 12,7, 3,1 и 2,2 % при частоте вращения $n = 450, 556, 630, 742 \text{ мин}^{-1}$ соответственно.

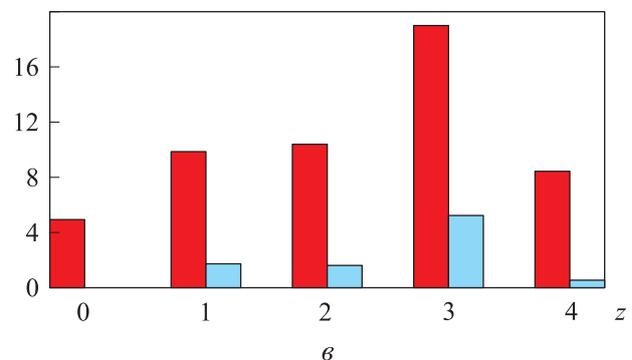
Изменение расхода топлива при различных вариантах работы двигателя связано с изменением потерь энергии. Для выявления факторов, влияющих на его топливную экономичность при отключении цилиндров, рассмотрим составляющие энергетического баланса теплоты сгоревшего топлива в единицах мощности: механических потерь на трение $N_{тр}$, насосных ходов N_n , теплоотдачи от рабочего тела в стенки цилиндров (систему охлаждения) N_t , потерь с отработавшими газами $N_{ог}$.

Для корректного сравнения вариантов отключения цилиндров эффективная мощность двигателя N_e , равная разности мощности от теплоты сгоревшего топлива и перечисленных

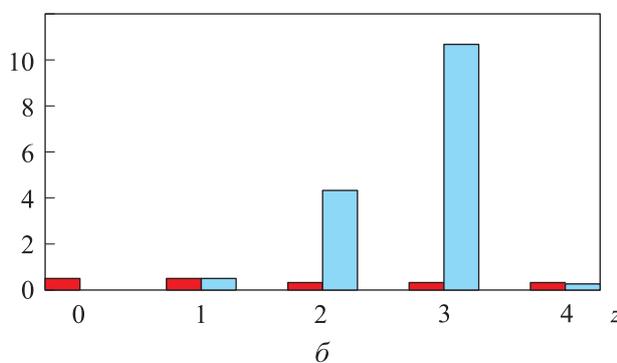
$N_{тр}$, кВт



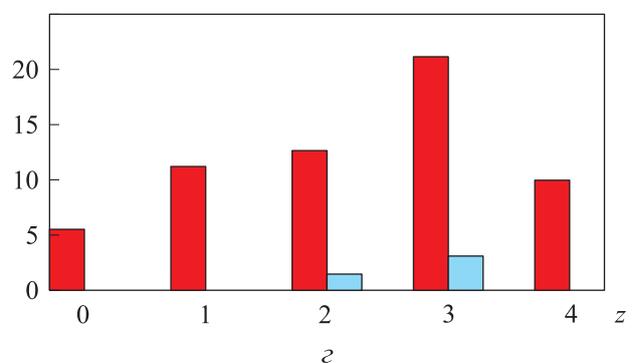
N_t , кВт



N_n , кВт



$N_{ог}$, кВт



■ — работающий цилиндр; ■ — отключенный цилиндр

Рис. 5. Изменение отдельных составляющих энергетического баланса в работающих и отключенных цилиндрах

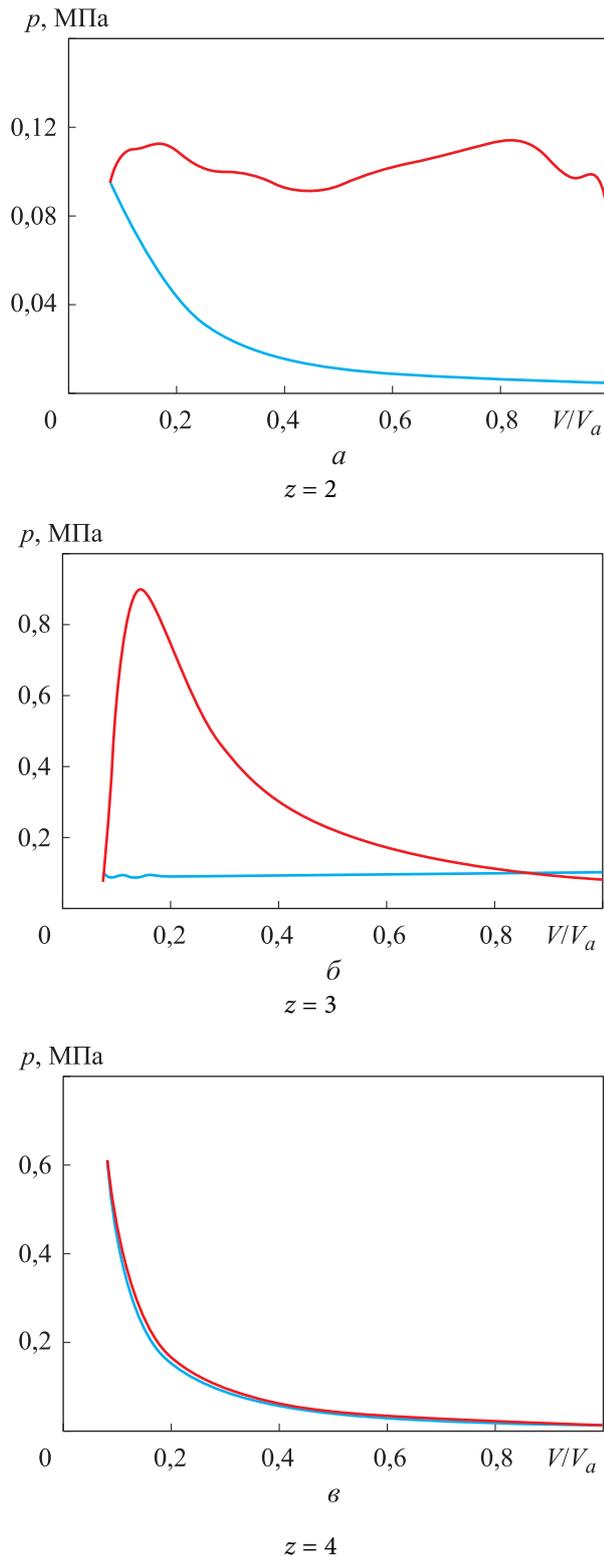


Рис. 6. Части индикаторных диаграмм при различных вариантах отключения цилиндров (— впуск; — выпуск)

составляющих энергетического баланса, должна быть одинаковой для всех вариантов работы двигателя в рассматриваемых режимах.

Сравнительная гистограмма в значениях мощности энергетического баланса для различных вариантов работы двигателя приведена на рис. 4 при работе двигателя с частотой вращения $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ и крутящим моментом $M = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$. Варианты отключения цилиндров $z = 1 \dots 4$, различающиеся функционированием СГР, сравнивались как между собой, так и с исходным вариантом работы двигателя без отключения цилиндров ($z = 0$).

Изменение отдельных составляющих энергетического баланса в РЦ и ОЦ для рассматриваемых вариантов работы двигателя характеризуют гистограммы, приведенные на рис. 5.

Из приведенных на рис. 4 и 5 гистограмм видно, как составляющие энергетического баланса зависят от варианта работы двигателя. Отключение подачи топлива в восемь цилиндров без изменения работы СГР ($z = 0$ и $z = 1$) по сравнению с другими вариантами работы СГР в меньшей степени влияет на составляющие энергетического баланса, а значит, и на топливную экономичность двигателя. Как видно из рис. 3, ухудшение показателя относительного удельного эффективного расхода топлива составляет примерно 5%.

Наиболее стабильной из составляющих энергетического баланса при всех вариантах работы двигателя остается мощность потерь на трение. Потери на трение при заданной частоте вращения зависят от давления рабочего тела. При отключении цилиндров по сравнению с исходным вариантом работы двигателя давление в работающих цилиндрах повышается, а в неработающих снижается.

С учетом того, что отключаются восемь цилиндров из шестнадцати, увеличение потерь на трение в РЦ практически компенсируется уменьшением механических потерь в ОЦ. Однако эти рассуждения справедливы лишь для относительных изменений мощности потерь на трение, в абсолютных величинах эти изменения могут оказаться ощутимыми. Например, для вариантов работы двигателя $z = 0, 1, 4$ потери на трение существенно превосходят таковые на насосные ходы.

Остальные составляющие энергетического баланса в значительной степени зависят от работы СГР при отключении цилиндров. Мощность насосных ходов зависит от давления газов в цилиндре. Изменение давления в РЦ и ОЦ происходит различным образом в зависимости от работы впускных и выпускных клапанов.

На рис. 6 приведены части индикаторных диаграмм (зависимостей давления в цилиндре p от отношения объема над поршнем к полному объему цилиндра V/V_a), соответствующие тактам впуска и выпуска в ОЦ для вариантов работы СГР $z = 2$ (рис. 6, а) и $z = 3$ (рис. 6, б), которые характеризуются, как показывают гистограммы на рис. 4 и 5, наибольшими потерями мощности на насосные ходы в ОЦ.

Приведенные индикаторные диаграммы показывают, что при закрытых впускных клапанах ($z = 2$) движение поршня к нижней мертвой точке на такте впуска в ОЦ сопровождается резким уменьшением давления ниже атмосферного, а движение к верхней мертвой точке на такте выпуска при закрытии выпускных клапанов ($z = 3$) приводит к значительному росту давления выше атмосферного.

В обоих случаях увеличивается площадь индикаторной диаграммы на тактах впуска и выпуска, характеризующая потери энергии на насосные ходы, по сравнению с работой двигателя без отключения цилиндров, когда процессы впуска и выпуска происходят при давлении, близком к атмосферному.

При закрытии всех клапанов (вариант $z = 4$) для ОЦ устанавливается индикаторная диаграмма, показанная на рис. 6, в. Части индикаторной диаграммы на тактах сжатия–расширения и выпуска–впуска совпадают и повторяются в ОЦ каждые 360° поворота коленчатого вала. Процессы изменения давления на тактах впуска и выпуска практически совпадают, и потери на насосные ходы минимальные.

Отключение цилиндров и изменение работы СГР влияют на теплоотдачу от рабочего тела в стенки цилиндра и далее в охлаждающую жидкость. Так как экономия топлива получена при прекращении подачи топлива и закрытии всех клапанов в ОЦ, анализ процесса теплоотдачи проведен для этого варианта.

На рис. 7 приведены диаграммы изменения потерь на теплоотдачу в стенки цилиндра q_t по углу поворота коленчатого вала φ для сравнения теплообмена рабочего тела со стенками цилиндра в РЦ (синяя кривая) и ОЦ (зеленая кривая) при закрытии впускных и выпускных клапанов с теплообменом в цилиндре без отключения цилиндров (красная кривая).

Для обеспечения требуемой мощности двигателя после отключения части цилиндров увеличивается подача топлива в РЦ, что приводит

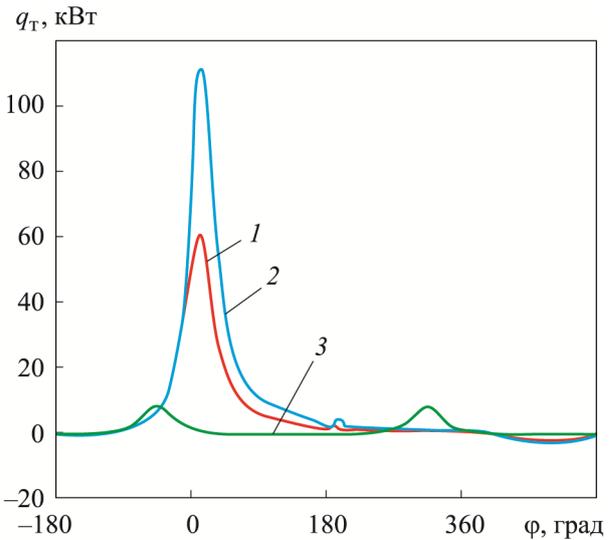


Рис. 7. Диаграмма теплообмена рабочего тела со стенками цилиндров

к повышению температуры рабочего тела и интенсификации теплообмена в РЦ. И, наоборот, в ОЦ температура снижается и теплообмен уменьшается. Но, как показали расчеты (см. рис. 7), при закрытии всех клапанов повышение теплообмена в РЦ больше, чем снижение теплообмена в ОЦ.

Возрастание потерь энергии на трение, насосные ходы и теплопередачу в систему охлаждения при требуемой эффективной мощности двигателя приводит к увеличению расхода топлива, что вызывает рост потерь энергии с отработавшими газами. Особенно заметное увеличение этих потерь (см. рис. 4 и 5), наблюдается у вариантов отключения цилиндров с закрытием впускных ($z = 2$) и выпускных ($z = 3$) клапанов.

Эффект экономии топлива при отключении цилиндров и закрытии всех клапанов ($z = 4$) объясняется снижением потерь энергии на трение и насосные ходы. Так, из рис. 4 и 5 видно, что по сравнению с вариантом работы двигателя без отключения цилиндров ($z = 0$) при отключении цилиндров по варианту с закрытием всех клапанов ($z = 4$) мощность насосных потерь уменьшается от 6,08 до 4,84 кВт, а мощность трения — от 64,7 до 59,8 кВт.

На втором этапе моделирования исследована эффективность отключения двенадцати цилиндров из шестнадцати для тех же режимов работы по частоте вращения и крутящему моменту, что и при отключении восьми цилиндров. Так как наибольшее снижение расхода топлива на

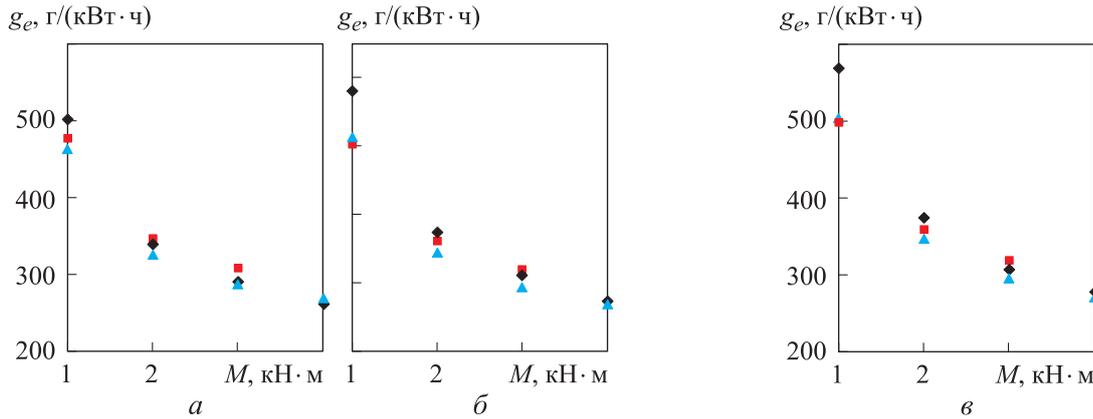


Рис. 8. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от нагрузки при различных частотах вращения: (\blacklozenge — $z = 0$; \blacktriangle — $z = 8$; \blacksquare — $z = 12$)
 а — 450 мин^{-1} ; б — 556 мин^{-1} ; в — 630 мин^{-1}

первом этапе исследования было получено при закрытии всех клапанов в ОЦ, этот же вариант применялся во всех последующих расчетах.

На рис. 8 приведены зависимости удельного эффективного расхода топлива от нагрузки при различных значениях частоты вращения для вариантов работы двигателя без отключения цилиндров ($z = 0$), с отключением восьми ($z = 8$) и двенадцати цилиндров ($z = 12$). Следует отметить, что при отключении двенадцати цилиндров максимально достижимый крутящий момент двигателя составил $2000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при $n = 450$ и 556 мин^{-1} и $3000 \text{ Н} \cdot \text{м}$ при $n = 630 \text{ мин}^{-1}$.

Как видно из рис. 8, для различных частот вращения эффект улучшения топливной экономичности зависит от числа отключаемых цилиндров. При $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ целесообразно отключать 12 цилиндров, при $n = 556 \text{ мин}^{-1}$ — 8,

а при $n = 630 \text{ мин}^{-1}$ отключение цилиндров является малоэффективным.

На рис. 9 в значениях мощности показан баланс энергии топлива в двигателе без отключения цилиндров ($z = 0$) и с отключением восьми ($z = 8$) и двенадцати ($z = 12$) цилиндров при $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ и $M = 1000 \text{ Н} \cdot \text{м}$.

По сравнению с вариантом $z = 8$ при отключении двенадцати цилиндров уменьшаются мощности насосных потерь от 4,84 до 1,93 кВт и трения от 61,8 до 60,5 кВт. Температура рабочего тела в ОЦ падает настолько, что суммарный отвод тепла в систему охлаждения при отключении двенадцати цилиндров (73,6 кВт) становится меньше, чем при отключении восьми цилиндров (82,4 кВт). Эффективность отключения двенадцати цилиндров на данном режиме следует из уменьшения потерь энергии по сравнению с отключением восьми цилиндров.

Выводы

1. При отключении цилиндров двигателя рабочий процесс в РЦ и ОЦ отличается от такового у двигателя со всеми РЦ. Поэтому использование стандартных характеристик двигателя для обоснования эффективности отключения цилиндров дает лишь предварительную информацию. Для анализа работы двигателя при отключении цилиндров необходимо провести специальное исследование рабочего процесса в РЦ и ОЦ.

2. Значительное влияние на эффективность отключения цилиндров оказывает работа СГР в ОЦ. Наибольший эффект по снижению рас-

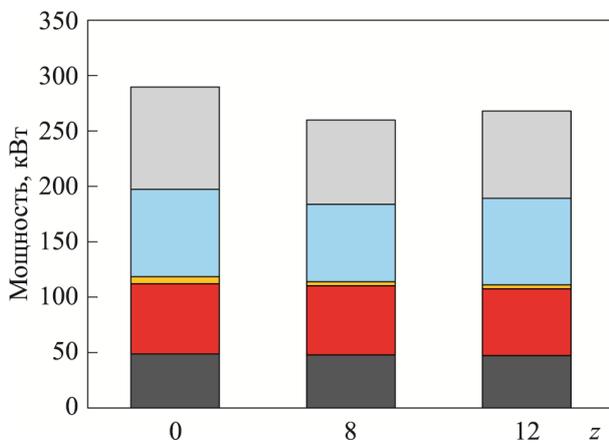


Рис. 9. Баланс энергии топлива в двигателе без отключения цилиндров и при отключении восьми и двенадцати цилиндров (\blacksquare N_e ; \blacksquare $N_{тр}$; \blacksquare $N_{нб}$; \blacksquare $N_{г}$; \blacksquare $N_{ог}$)

хода топлива получен при закрытии впускных и выпускных клапанов в ОЦ.

3. При отключении цилиндров и различных вариантах работы СГР изменяются все составляющие энергетического баланса двигателя. Существенное влияние на изменение удельного эф-

фективного расхода топлива при различных вариантах работы впускных и выпускных клапанов в ОЦ оказывают потери на насосные ходы.

4. Эффективность метода отключения цилиндров зависит от режима работы двигателя и числа отключаемых цилиндров.

Литература

- [1] Патрахальцев Н.Н., Петруня И.А., Камышников Р.О., Савастенко Э.А. Оценка возможности повышения экономичности автомобиля регулированием рабочего объема двигателя. *Автомобильная промышленность*, 2014, № 6, с. 10–12.
- [2] Kuruppu C., Pesiridis A., Rajoo S. Investigation of cylinder deactivation and variable valve actuation on gasoline engine performance. *SAE International*, 2014, vol. 1, doi: 10.4271/2014-01-1170
- [3] Bech A., Shayler P. J., McGhee M. The effects of cylinder deactivation on the thermal behaviour and performance of a three cylinder spark ignition engine. *SAE International Journal of Engines*, 2016, vol. 9, pp. 1999–2009, doi: 10.4271/2016-01-2160
- [4] Schenk C., Dekraker P. Potential fuel economy improvements from the implementation of cEGR and CDA on an Atkinson Cycle Engine. *SAE International*, 2017, vol. 2017-March, iss. March, doi: 10.4271/2017-01-1016
- [5] Yu S., Ma X., Ma Z., Liu R., Song D. Experimental and Simulated Study on the Cylinder Deactivation of Vehicle Gasoline Engine. *SAE International*, 2016, vol. 418, pp. 207–215, doi: 10.1007/978-981-10-3527-2_19
- [6] Kortwittenborg T., Walter F. Strategy to control the cylinder deactivation. *MTZ worldwide*, 2013, vol. 2, pp. 18–22, doi: 10.1007/s38313-013-0014-7
- [7] Morris N., Mohammadpour M., Rahmani R., Johns-Rahnejat P.M., Rahnejat H., Dowson D. Effect of cylinder deactivation on tribological performance of piston compression ring and connecting rod bearing. *Tribology International*, 2018, vol. 120, pp. 243–254, doi: 10.1016/j.triboint.2017.12.045
- [8] Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А., Анохина Т.С., Камышников Р.О. Повышение экономических и экологических качеств транспортного дизеля при работе на режимах малых нагрузок и холостых ходов. *АвтоГазоЗаправочный Комплекс и Альтернативное топливо*, 2014, № 12(93), с. 41–47.
- [9] Патрахальцев Н.Н., Анохина Т.С., Камышников Р.О. Снижение расхода топлива и токсичности выбросов дизеля на режимах малых нагрузок при его регулировании изменением рабочего объема. *Двигателестроение*, 2015, № 1(259), с. 26–29.
- [10] Петруня И.А. *Повышение эксплуатационной топливной экономичности транспортных дизелей регулированием их рабочих объемов*. Дис. ... канд. техн. наук, Москва, 2014. 133 с.
- [11] Pillai S., LoRusso J., Van Benschoten M. Analytical and experimental evaluation of cylinder deactivation on a diesel engine. *SAE International*, 2015, doi: 10.4271/2015-01-2809
- [12] Ding C., Roberts L., Fain D.J., Ramesh A.K., Shaver G.M., McCarthy J., Ruth M., Koeberlein E., Holloway E.A., Nielsen D. Fuel efficient exhaust thermal management for compression ignition engines during idle via cylinder deactivation and flexible valve actuation. *International Journal of Engine Research*, 2016, vol. 17, pp. 619–630, doi: 10.1177/1468087415597413
- [13] Zammit J.P., McGhee M.J., Shayler P.J., Pegg I. The influence of cylinder deactivation on the emissions and fuel economy of a four-cylinder direct-injection diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2014, vol. 228, pp. 206–217, doi: 10.1177/0954407013506182
- [14] Muhamad Said M.F., Abdul Aziz A.B., Abdul Latiff Z., Mahmoudzadeh Andwari A., Mohamed Soid S.N. Investigation of Cylinder Deactivation (CDA) Strategies on Part Load Conditions. *SAE International*, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2549

- [15] Ramesh A.K., Shaver G.M., Allen C.M., Nayyar S., Gosala D.B., Caicedo Parra D., Koeberlein E., McCarthy J., Nielsen D. Utilizing low airflow strategies, including cylinder deactivation, to improve fuel efficiency and aftertreatment thermal management. *International Journal of Engine Research*, 2017, vol. 18, pp. 1005–1016, doi: 10.1177/1468087417695897
- [16] *GT SUITE, Version 7.3*. Gamma Technologies Inc., Westmont, Illinois, 1996-2012.

References

- [1] Patrakhal'tsev N.N., Petrunya I.A., Opportunities to rise an economy of vehicle by variable displacement engine. *Avtomobil'naya promyshlennost'*, 2014, no. 6, pp. 10–12 (in Russ.).
- [2] Kuruppu C., Pesiridis A., Rajoo S. Investigation of cylinder deactivation and variable valve actuation on gasoline engine performance. *SAE International*, 2014, vol. 1, doi: 10.4271/2014-01-1170
- [3] Bech A., Shayler P. J., McGhee M. The effects of cylinder deactivation on the thermal behaviour and performance of a three cylinder spark ignition engine. *SAE International Journal of Engines*, 2016, vol. 9, pp. 1999–2009, doi: 10.4271/2016-01-2160
- [4] Schenk C., Dekraker P. Potential fuel economy improvements from the implementation of cEGR and CDA on an Atkinson Cycle Engine. *SAE International*, 2017, vol. 2017-March, iss. March, doi: 10.4271/2017-01-1016
- [5] Yu S., Ma X., Ma Z., Liu R., Song D. Experimental and Simulated Study on the Cylinder Deactivation of Vehicle Gasoline Engine. *SAE International*, 2016, vol. 418, pp. 207–215, doi: 10.1007/978-981-10-3527-2_19
- [6] Kortwittenborg T., Walter F. Strategy to control the cylinder deactivation. *MTZ worldwide*, 2013, vol. 2, pp. 18–22, doi: 10.1007/s38313-013-0014-7
- [7] Morris N., Mohammadpour M., Rahmani R., Johns-Rahnejat P.M., Rahnejat H., Dowson D. Effect of cylinder deactivation on tribological performance of piston compression ring and connecting rod bearing. *Tribology International*, 2018, vol. 120, pp. 243–254, doi: 10.1016/j.triboint.2017.12.045
- [8] Patrakhal'tsev N.N., Savastenko A.A., Anokhina T.S., Kamyshnikov R.O. Raising of qualities of economy and ecology of transport's diesel during light loads regimes. *AvtoGazoZapravochnyy Kompleks i Alternativnoye toplivo*, 2014, no. 12(93), pp. 41–47 (in Russ.).
- [9] Patrakhal'tsev N.N., Anokhina T.S., Kamyshnikov R.O. Improvement in Engine Fuel Efficiency and Emission Performance at Low Loads by means of Displacement Control. *Dvigatellestroyeniye*, 2015, no. 1(259), pp. 26–29 (in Russ.).
- [10] Petrunya I.A. *Povysheniye ekspluatatsionnoy toplivnoy ekonomichnosti transportnykh dizeley regulirovaniyem ikh rabochikh ob'yemov*. Kand. Diss. [Increase of operational fuel efficiency of transport diesel engines by regulation of their working volumes. Cand. Diss.]. Moscow, 2014. 133 p.
- [11] Pillai S., LoRusso J., Van Benschoten M. Analytical and experimental evaluation of cylinder deactivation on a diesel engine. *SAE International*, 2015, doi: 10.4271/2015-01-2809
- [12] Ding C., Roberts L., Fain D.J., Ramesh A.K., Shaver G.M., McCarthy J., Ruth M., Koeberlein E., Holloway E.A., Nielsen D. Fuel efficient exhaust thermal management for compression ignition engines during idle via cylinder deactivation and flexible valve actuation. *International Journal of Engine Research*, 2016, vol. 17, pp. 619–630, doi: 10.1177/1468087415597413
- [13] Zammit J.P., McGhee M.J., Shayler P.J., Pegg I. The influence of cylinder deactivation on the emissions and fuel economy of a four-cylinder direct-injection diesel engine. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2014, vol. 228, pp. 206–217, doi: 10.1177/0954407013506182
- [14] Muhamad Said M.F., Abdul Aziz A.B., Abdul Latiff Z., Mahmoudzadeh Andwari A., Mohamed Soid S.N. Investigation of Cylinder Deactivation (CDA) Strategies on Part Load Conditions. *SAE International*, 2014, doi: 10.4271/2014-01-2549

- [15] Ramesh A.K., Shaver G.M., Allen C.M., Nayyar S., Gosala D.B., Caicedo Parra D., Koeberlein E., McCarthy J., Nielsen D. Utilizing low airflow strategies, including cylinder deactivation, to improve fuel efficiency and aftertreatment thermal management. *International Journal of Engine Research*, 2017, vol. 18, pp. 1005–1016, doi: 10.1177/1468087417695897
- [16] *GT SUITE, Version 7.3*. Gamma Technologies Inc., Westmont, Illinois, 1996–2012.

Статья поступила в редакцию 15.05.2019

Информация об авторах

ЛЮ Ин — аспирант кафедры «Поршневые двигатели». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, e-mail: 1548364742@qq.com).

КУЗНЕЦОВ Александр Гаврилович — доктор технических наук, профессор кафедры «Теплофизика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская федерация, 2-я Бауманская ул., д.5, стр. 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

Information about the authors

LIU Ying — Postgraduate, Piston Engines Department. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: 1548364742@qq.com).

KUZNETSOV Aleksandr Gavriilovich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Thermophysics Department. Bauman Moscow State Technical University (BMSTU, 105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: kuzag441@mail.ru).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Лю Ин, Кузнецов А.Г. Анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2019, № 11, с. 9–18, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-9-18

Please cite this article in English as:

Liu Ying, Kuznetsov A.G. An Analysis of the Working Process of a Diesel Engine under Cylinder Deactivation. *Proceedings of Higher Educational Institutions. Machine Building*, 2019, no. 11, pp. 9–18, doi: 10.18698/0536-1044-2019-11-9-18



В Издательстве МГТУ им. Н.Э. Баумана
вышла в свет монография
А.А. Смердова

«Оптимизация композитных структур в ракетно-космической технике. Краткий курс в тринадцати лекциях»

В курсе лекций 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.

Курс лекций предназначен для студентов старших курсов, обучающихся по специальности 24.05.01 «Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов». Материал отдельных лекций может быть также использован при изучении смежных дисциплин, таких как «Проектные расчеты композитных конструкций ракетно-космической техники», «Строительная механика ракет» и «Строительная механика космических аппаратов».

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@bmstu.ru; www.baumanpress.ru