

На правах рукописи

Лю Ин

УЛУЧШЕНИЕ ТОПЛИВНОЙ ЭКОНОМИЧНОСТИ СРЕДНЕОБОРОТНЫХ  
ДИЗЕЛЕЙ  
НА ЧАСТИЧНЫХ РЕЖИМАХ  
МЕТОДОМ ОТКЛЮЧЕНИЯ ЦИЛИНДРОВ

Специальность 05.04.02 – «Тепловые двигатели»

Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва - 2021



## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** На режимах низких частот вращения и малых нагрузок для управления двигателями используется отключение части цилиндров, когда оставшиеся активными цилиндры вырабатывают необходимую для потребителя мощность. Для получения требуемой мощности увеличивается подача топлива в работающие цилиндры, что улучшает в них качество рабочего процесса. При анализе целесообразности отключения цилиндров нередко используются характеристики двигателя со всеми работающими цилиндрами. Такой подход даёт только предварительные представления, так как работа двигателя с отключёнными цилиндрами имеет свои особенности и отличается от обычной работы двигателя. Этим объясняется часто встречающееся различие в результатах теоретических исследований и практического применения метода отключения цилиндров. Функционирование отключённых цилиндров происходит в условиях, которые не соответствуют режимам стандартных характеристик двигателя, поэтому нуждается в специальном описании. Для выяснения особенностей работы двигателей при отключении цилиндров необходимо более глубокое исследование рабочего процесса в работающих и отключённых цилиндрах и всего двигателя в целом.

Для среднеоборотных дизелей тепловозного назначения характерна работа на частичных режимах, так, на режимы холостого хода приходится около 16 % общего времени их работы, расход топлива двигателя при низких частотах и малых нагрузках составляет 38 % всего израсходованного топлива. Таким образом, отключение цилиндров является для тепловозных дизелей перспективным методом энергосбережения. Однако, практический опыт использования отключения цилиндров для дизелей даёт противоречивые результаты – не во всех случаях отключение цилиндров обеспечивает улучшение топливной экономичности двигателя. В связи с этим, актуальной задачей является углубленное исследование особенностей рабочего процесса среднеоборотных тепловозных дизелей при отключении цилиндров на режимах малых частот вращения и нагрузок.

**Цель работы:** исследование рабочего процесса и обоснование применения метода отключения цилиндров для улучшения топливной экономичности среднеоборотных дизелей при работе на частичных режимах.

Для достижения цели работы необходимо решить следующие **задачи:**

- получены показатели экономичности и токсичности отработавших газов среднеоборотных дизелей для различных вариантов работы системы газораспределения при отключении цилиндров;
- получены индикаторные диаграммы в работающих и отключённых цилиндрах при различных вариантах работы системы газораспределения, включая индикаторный процесс в отключённых цилиндрах при закрытых клапанах с учётом перетекания газов между полостями цилиндра и картера двигателя;
- проведён анализ потерь энергии в дизелях при отключении цилиндров, который позволяет оценить эффективность отключения цилиндров для экономии топлива;

– получены переходные процессы изменения параметров дизелей при различных способах отключения цилиндров.

**Методы исследования.** Для решения поставленных в работе задач использованы методы расчётного и экспериментального исследования. Для проведения расчётного исследования использовались математические модели и компьютерные программы, реализованные в программных комплексах GT-POWER и FIRE ESE DIESEL. Результаты расчётного исследования сравнивались с экспериментальными данными, полученными при испытаниях рассматриваемых дизелей.

**Научная новизна** результатов исследования заключается в следующем:

- получены показатели экономичности и токсичности отработавших газов среднеоборотных дизелей для различных вариантов работы системы газораспределения при отключении цилиндров;
- получены индикаторные диаграммы в работающих и отключённых цилиндрах при различных вариантах работы системы газораспределения, включая индикаторный процесс в отключённых цилиндрах при закрытых клапанах с учётом протекания газов между полостями цилиндра и картера двигателя;
- проведён анализ потерь энергии в дизелях при отключении цилиндров, который позволяет оценить эффективность отключения цилиндров для экономии топлива;
- получены переходные процессы изменения параметров дизелей при различных способах отключения цилиндров.

**Достоверность и обоснованность** научных положений определяется следующим:

- расчётное исследование и моделирование проведены с использованием теории рабочих процессов тепловых двигателей и программных комплексов GT-POWER и FIRE ESE DIESEL, подтвердивших свою эффективность при расчёте рабочего процесса двигателей;
- результаты расчёта по разработанным моделям и компьютерным программам с высокой точностью совпадают с данными экспериментальных исследований дизелей.

**Практическая ценность** работы состоит в следующем:

- разработанные модели и компьютерные программы предназначены для исследования рабочего процесса и эффективности применения метода отключения цилиндров для улучшения топливной экономичности дизелей;
- на основе полученных индикаторных диаграмм и анализа потерь энергии в работающих и отключённых цилиндрах дано обоснование наиболее эффективного способа отключения цилиндров, сочетающего прекращение в них подачи топлива с закрытием всех клапанов;
- показано, что последовательное отключение цилиндров по частям улучшает показатели возникающих переходных процессов.

**Реализация работы.** Результаты диссертации внедрены в ОАО «Дизель автоматика» при проведении работ по реализации отключения цилиндров на тепловозных дизелях.

### **Личный вклад автора:**

- проведён анализ информационных источников по методу отключения цилиндров двигателей, на основе которого выбрана цель и поставлены задачи исследования;
- составлены математические модели и компьютерные программы для расчётного исследования дизелей при отключении цилиндров;
- получены показатели экономичности и токсичности отработавших газов дизелей для различных вариантов работы системы газораспределения при отключении цилиндров;
- проведён анализ экспериментальных данных и их сопоставление с результатами расчёта расхода топлива дизеля при отключении цилиндров;
- получены индикаторные диаграммы и проведён анализ потерь энергии в работающих и отключённых цилиндрах;
- получены переходные процессы изменения параметров дизеля при отключении цилиндров.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

- показатели экономичности и токсичности отработавших газов среднеоборотных дизелей для различных вариантов работы системы газораспределения при отключении цилиндров;
- результаты анализа индикаторных диаграмм и потерь на насосные ходы для различных вариантов работы системы газораспределения при отключении цилиндров;
- результаты анализа составляющих потерь энергии дизелей при отключении цилиндров;
- результаты анализа переходных процессов и неустойчивости частоты вращения при отключении цилиндров.

**Апробация работы.** Основные положения диссертационной работы доложены на научно технических конференциях по автоматическому управлению теплоэнергетическими установками в МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2017 – 2020 г., на 6-й международной конференции «Луканинские чтения» в МАДИ в 2019 г., на Международной конференции «International Multi-conference on Engineering and Modern Technologies» FarEastCon в 2020г.

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 5 статей, из них 3 в изданиях из перечня ВАК РФ, из них 2 в изданиях из перечня Scopus. Общий объём опубликованных работ – 2,15 п.л.

**Объём работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы. Содержит 148 страниц текста, в том числе 80 рисунков, 6 таблиц.

## **СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность метода отключения цилиндров для улучшения топливной экономичности дизелей, дана общая характеристика диссертационной работы.

**В первой главе** дан анализ информационных источников по практическому применению и теоретическим исследованиям метода отключения цилиндров, который показал, что при отключении цилиндров меняются параметры рабочего процесса в работающих и отключённых цилиндрах, что определяет изменение характеристик экономичности, токсичности отработавших газов, вибрацию двигателя. Эффективность метода отключения цилиндров в значительной степени зависит от работы системы газораспределения в отключённых цилиндрах. Современные системы газораспределения для отключения цилиндров используют конструкции, в которых для привода клапанов применяются гидравлические исполнительные устройства и электромагнитные элементы.

Исследованием метода отключения цилиндров занимались отечественные и зарубежные учёные: Н.Н. Патрахальцев, В.Н. Кожанов, В.Н. Балабин, и М.Ф. Muhamad Said, S. Pillai, С.М. Allen, S. Lee. Большая часть исследований проведена для автомобильных бензиновых двигателей. Технологии отключения цилиндров в бензиновых и дизельных двигателях имеют много общего, но существуют различия в причинах получения экономии топлива. Особенности отключения цилиндров для среднеоборотных дизелей изучены не полностью, что определило цель и задачи данной работы. В качестве объектов исследования выбраны среднеоборотные дизели Д49 и Д50 тепловозного назначения, которые значительное время работают на частичных режимах.

**Во второй главе** приведены математические модели и компьютерные программы, составленные для расчётного исследования установившихся и неустановившихся режимов работы дизелей при отключении цилиндров. В математической модели процессов газодинамики во впускной и выпускной системах используется одномерная модель нестационарного течения, которая описывается дискретными дифференциальными уравнениями в частных производных. Для моделирования процесса распыливания и сгорания топлива в программном комплексе GT-POWER используется многозонная модель. Более подробное исследование рабочего процесса проведено с помощью программного комплекса FIRE ESE Diesel. Расчёт теплообмена внутри цилиндра осуществляется по модели Woschni. Расчёт трения в цилиндро-поршневой группе и кривошипно-шатунном механизме выполняется с использованием программы GT-POWER, другие составляющие механических потерь – в газораспределительном механизме и вспомогательном оборудовании – рассчитываются по полуэмпирическим формулам.

Компьютерные модели дизелей Д49 и Д50, составленные в программном комплексе GT-POWER (GT-SUITE), содержат поршневую часть двигателя (цилиндро-поршневую группу, кривошипно-шатунный механизм), впускную и выпускную системы, систему газораспределительного механизма с возможностью отдельного управления работой впускных и выпускных клапанов, топливную систему (форсунки), турбокомпрессор.

Компьютерная модель отключённого цилиндра (Рисунок 1) учитывает перетекание газов между полостями цилиндра и картера. При закрытии всех клапанов в отключённых цилиндрах устанавливается индикаторная диаграмма, в которой процессы изменения давления на тактах впуска – выпуска и сжатия –

расширения совпадают. Время установления диаграммы определяется геометрическими размерами канала (длиной  $L$  и площадью поперечного сечения  $S$ ), образованного зазорами в поршневых кольцах и связывающего внутренний объём цилиндра с картерной полостью.

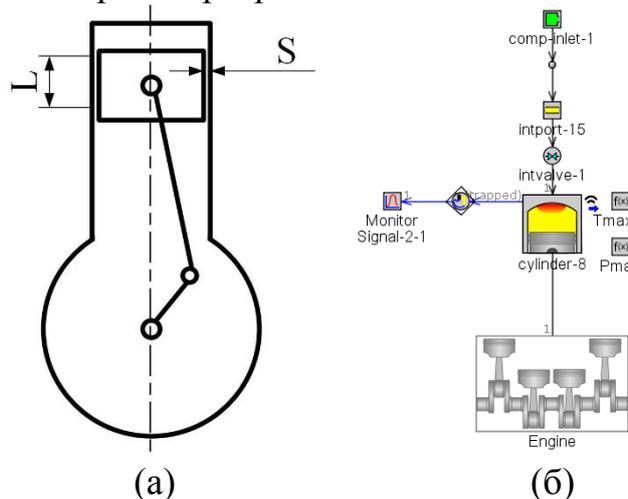


Рисунок 1. Схема отключённого цилиндра (а) и его компьютерная модель (б)

Для описания изменения состояния газа в отключённых цилиндрах дизеля Д49 при закрытых клапанах было проведено отдельное исследование на режиме  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 1000 \text{ Н м}$ . На время установления стабильной индикаторной диаграммы в отключённых цилиндрах влияют момент закрытия клапанов и геометрические размеры канала перетекания газа. Если клапаны закрываются после такта выпуска,

максимальное начальное давление газов в отключённом цилиндре  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$ , если закрытие клапанов происходит после такта впуска, то в процессе последующего сжатия воздуха без сгорания максимальное давление в отключённом цилиндре составляет  $p_1 = 3,3 \text{ МПа}$ . Как показали расчёты, длина канала в зазорах поршневых колец не оказывает существенного влияния на время установления диаграммы. Влияние момента закрытия клапанов (начального давления в отключённом цилиндре) и площади поперечного сечения канала поршневых колец показано на Рисунке 2 при начальном давлении  $p_1 = 0,1 \text{ МПа}$  (Рисунок 2, а) и  $p_1 = 3,3 \text{ МПа}$  (Рисунок 2, б) для площади поперечного сечения канала  $S = 8,64 \text{ мм}^2$  при минимальном износе колец (---) и  $S = 15,09 \text{ мм}^2$  при максимальном износе колец (—) в виде времени установления максимального давления  $p_{\text{max}}$  индикаторной диаграммы.

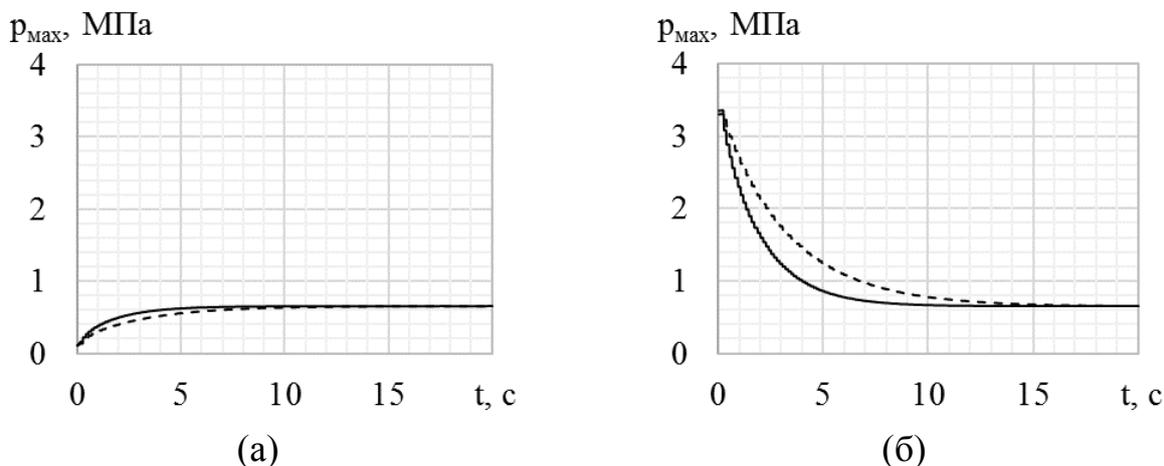


Рисунок 2. Время установления индикаторной диаграммы в отключённом цилиндре

После установления стабильной индикаторной диаграммы (Рисунок 3) максимальное давление в отключённых цилиндрах составляет 0,65 МПа, когда поршень находится в верхней мёртвой точке, минимальное давление равно 0,02 МПа в начале сжатия. Наименьшее время установления индикаторной диаграммы – 1 с при закрытии клапанов после выпуска и максимальном износе поршневых колец, при закрытии клапанов после впуска и минимальном износе колец установление индикаторной диаграммы происходит за 8 с.

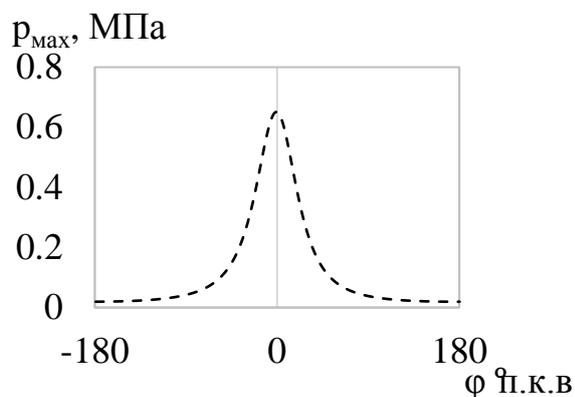


Рисунок 3. Индикаторная диаграмма в отключённом цилиндре при закрытых клапанах

При исследовании переходных процессов модель дизеля функционирует в составе системы управления, в которую входит также регулятор частоты вращения, компьютерная модель которого содержит электронный блок, с пропорционально-интегрально-дифференциальным (ПИД) законом регулирования. Коэффициенты ПИД закона регулирования подобраны из условия обеспечения высокого качества переходных процессов.

Хорошее совпадение результатов расчёта с экспериментальными данными при верификации моделей дизелей подтвердило возможность использования разработанных компьютерных моделей для расчётного исследования.

**В третьей главе** проведено исследование влияния формы характеристики впрыска топлива на показатели рабочего процесса при отключении цилиндров. В последующих расчётах используется характеристика впрыска с большим давлением как обеспечивающая лучшие процессы испарения и сгорания топлива.

Для дизеля Д49 проведён расчёт экономичности при отключении 8-и цилиндров из 16-и прекращением подачи топлива на частичных режимах. Полученные результаты свидетельствуют о том, что при отключении цилиндров только прекращением подачи в них топлива эффективный КПД дизеля в целом с учётом КПД в работающих и отключённых цилиндрах снижается. Отключение цилиндров прекращением подачи топлива не улучшает, а ухудшает топливную экономичность рассмотренных дизелей – на всех исследованных режимах расход топлива увеличивается. В связи с этим, на следующем этапе работы проведено исследование влияния работы системы газораспределения в отключённых цилиндрах на показатели рабочего процесса дизелей. На Рисунке 4 приведены зависимости удельного эффективного расхода топлива от нагрузки для различных частот вращения. Рассмотрены следующие варианты функционирования системы газораспределения в отключённых цилиндрах: 1 – все клапаны функционируют в штатном режиме; 2 – впускные клапаны закрыты, выпускные работают в штатном режиме; 3 – впускные работают в штатном режиме, выпускные клапаны закрыты; 4 – все клапаны закрыты (0 – работа двигателя со всеми цилиндрами). Эффект по снижению расхода топлива получен только при закрытии впускных и выпускных клапанов в отключённых цилиндрах.

Аналогичные результаты получены при расчёте характеристик экономичности при отключении 3-х цилиндров из 6-и для дизеля Д50. Для проверки выводов расчётного исследования проведён анализ данных экспериментального исследования дизеля Д50 на холостом ходу и частичных режимах. В отключённых цилиндрах все клапаны были закрыты. Результаты испытаний подтвердили выводы расчётного исследования – экономия топлива зафиксирована при закрытии всех клапанов в отключённых цилиндрах.

На Рисунке 5 даны значения часового расхода топлива при работе дизеля Д50 на холостом ходу (частота вращения  $240 \text{ мин}^{-1}$  и  $300 \text{ мин}^{-1}$ ) при обычной работе двигателя (вариант 0) и при отключении цилиндров и закрытии всех клапанов (вариант 4). Приведены результаты расчётов (р) и экспериментов (э). Как видно из Рисунка 5, при отключении цилиндров и закрытии в них всех клапанов часовой расход топлива по сравнению со штатной работой всех цилиндров снижается на холостом ходу на 20,4% и 23,7% при частоте вращения соответственно  $240 \text{ мин}^{-1}$  и  $300 \text{ мин}^{-1}$ .

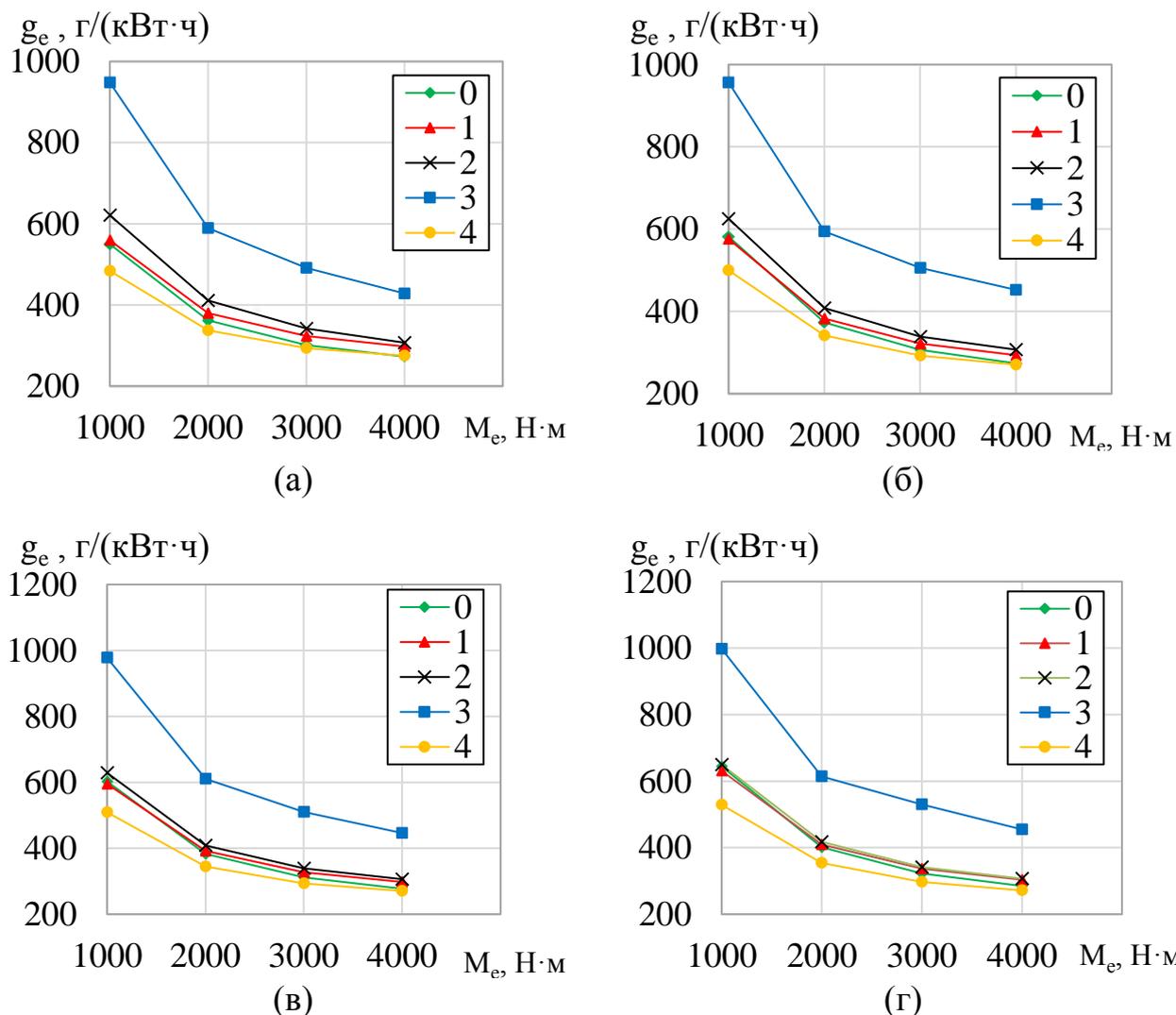


Рисунок 4. Удельный эффективный расход топлива дизеля Д49 для различных вариантов отключения цилиндров на частоте вращения: а –  $450 \text{ мин}^{-1}$ ; б –  $556 \text{ мин}^{-1}$ ; в –  $630 \text{ мин}^{-1}$ ; г –  $742 \text{ мин}^{-1}$

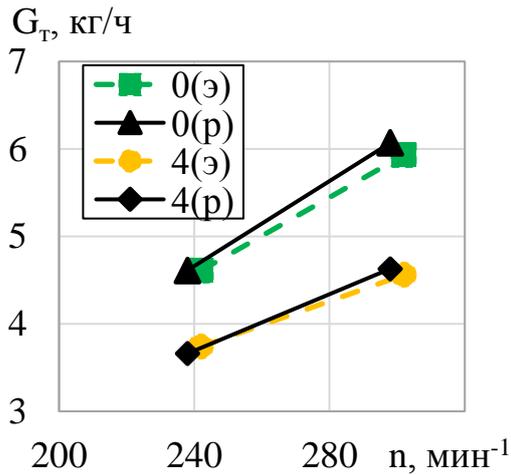


Рисунок 5. Расход топлива дизеля Д50 на холостом ходу

остальных режимах испытаний получен обратный эффект: при частоте вращения  $300 \text{ мин}^{-1}$  и эффективной мощности двигателя  $108 \text{ кВт}$  удельный расход топлива при отключении цилиндров увеличивается на  $2,9\%$ ; при частоте вращения  $470 \text{ мин}^{-1}$  и эффективной мощности двигателя  $214 \text{ кВт}$  – на  $0,5\%$ .

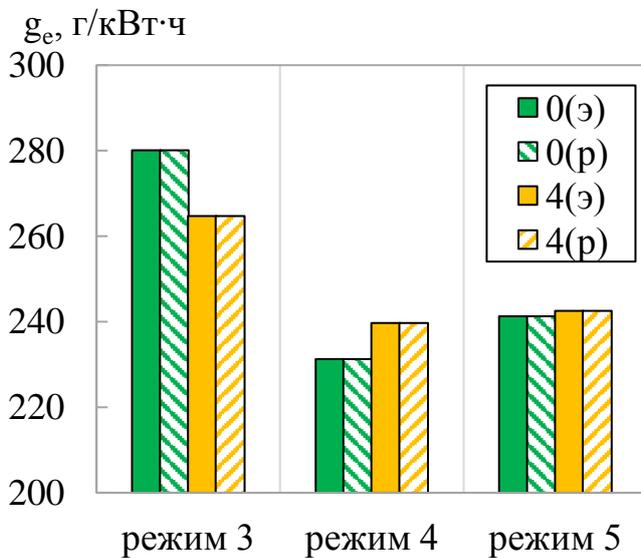


Рисунок 6. Удельный эффективный расход топлива при работе дизеля Д50 на частичных режимах: 3 –  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N_e = 50 \text{ кВт}$ ; 4 –  $n = 300 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N_e = 106 \text{ кВт}$ ; 5 –  $n = 470 \text{ мин}^{-1}$ ,  $N_e = 214 \text{ кВт}$

чѐнного цилиндра при разных вариантах функционирования системы газораспределения в отключѐнных цилиндрах.

На Рисунке 6 показано сравнение удельного эффективного расхода топлива дизеля Д50 при штатной работе (вариант 0) и отключении цилиндров (вариант 4 – все клапаны закрыты) на режимах испытаний с частичной нагрузкой. При частоте вращения  $300 \text{ мин}^{-1}$  и эффективной мощности двигателя  $50 \text{ кВт}$  зафиксирован положительный эффект отключения цилиндров: удельный расход топлива при отключении цилиндров снижается на  $7\%$  по сравнению со штатной работой двигателя. На

Эксперименты подтвердили вывод расчѐтного исследования о том, что по мере увеличения частоты вращения и нагрузки эффективность метода отключения цилиндров по экономии топлива ослабевает и даже даёт отрицательный результат.

Для объяснения полученных результатов был проведѐн анализ влияния отключения цилиндров на индикаторный процесс дизелей и потери энергии. Отключение части цилиндров изменяет индикаторный процесс и потери энергии в работающих и отключѐнных цилиндрах, что в итоге влияет на эффективный КПД двигателя в целом. На Рисунках 7 – 10 приведены индикаторные диаграммы отклю-

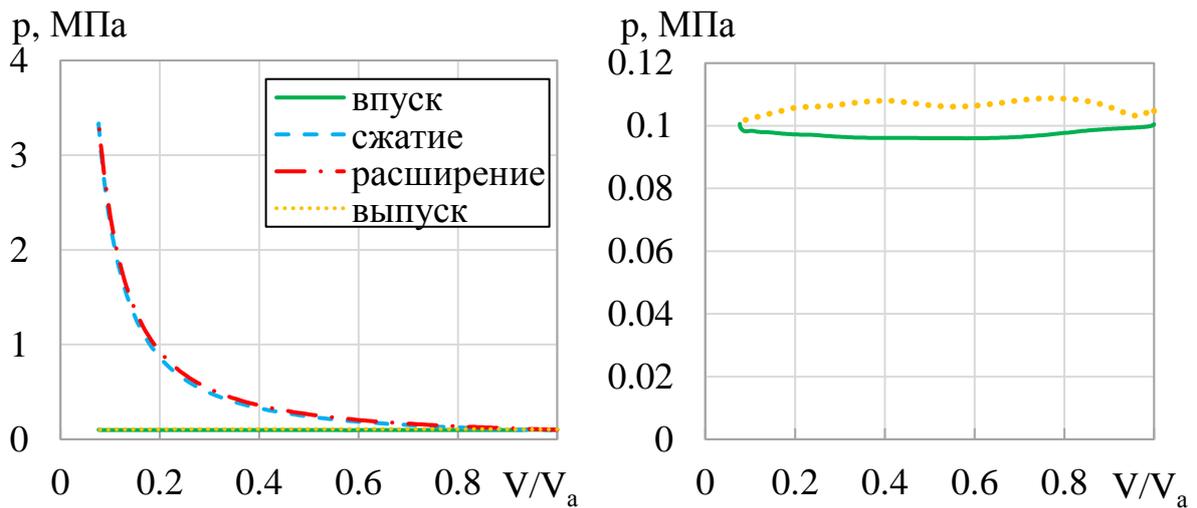


Рисунок 7. Индикаторная диаграмма отключённого цилиндра при штатной работе клапанов

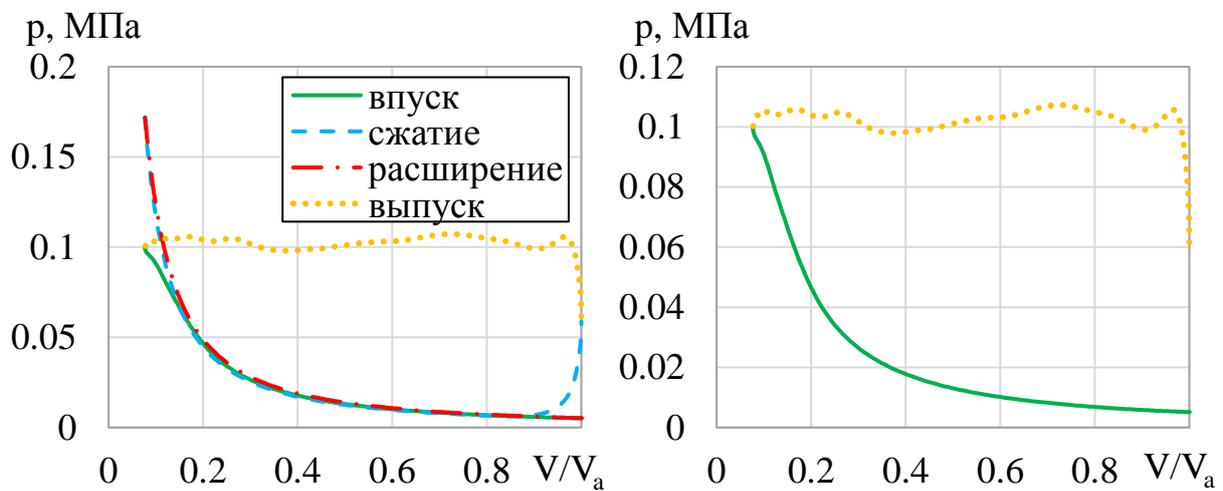


Рисунок 8. Индикаторная диаграмма отключённого цилиндра при отключении цилиндров и закрытых впускных клапанах

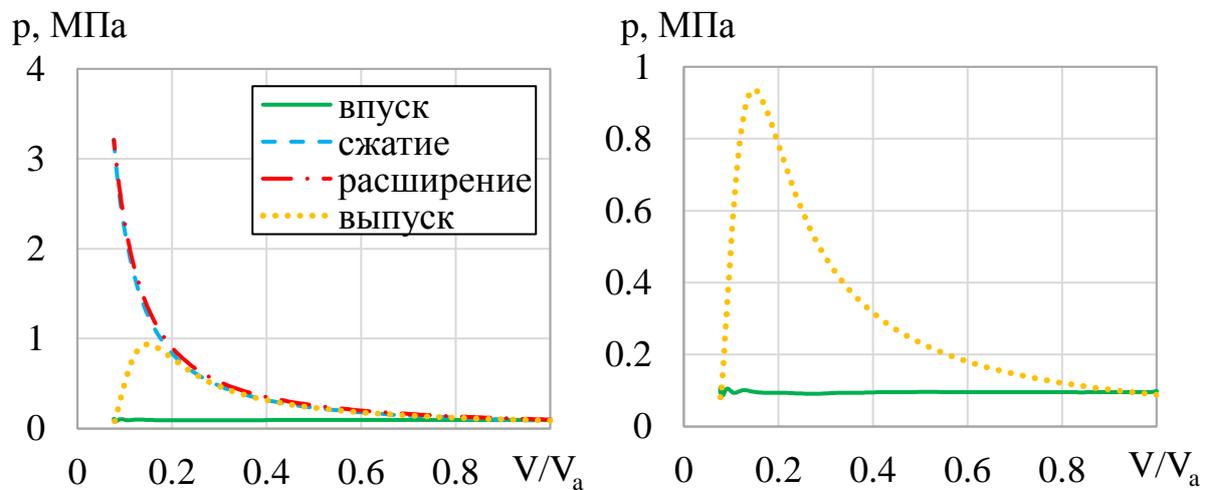


Рисунок 9. Индикаторная диаграмма отключённого цилиндра при отключении цилиндров и закрытых выпускных клапанах

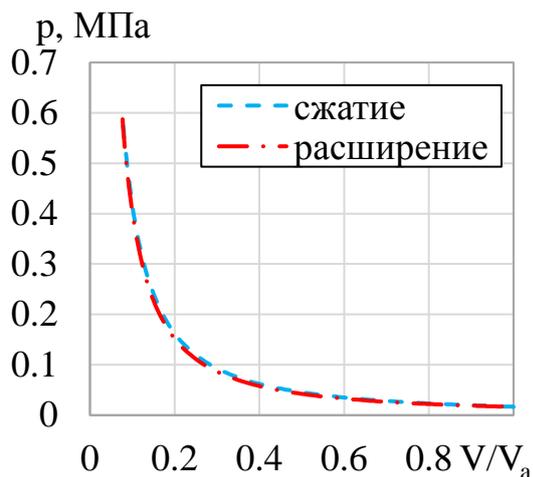


Рисунок 10. Индикаторная диаграмма отключённого цилиндра при закрытии всех клапанов

получена при закрытии в отключённых цилиндрах всех клапанов.

На диаграмме на Рисунке 11 показаны зависимости индикаторных показателей в работающих и неработающих цилиндрах в виде среднего давления от варианта функционирования системы газораспределения в отключённых цилиндрах (варианты 1 – 4) по сравнению со штатной работой дизеля Д49 со всеми работающими цилиндрами (вариант 0) на режиме  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 1000 \text{ Н м}$ . Красным цветом показано среднее индикаторное давление в работающем цилиндре  $p_{i, \text{раб.}}$ , черным цветом – среднее давление насосных потерь в работающем цилиндре  $p_{n, \text{раб.}}$ , жёлтым цветом – среднее индикаторное давление в отключённом цилиндре  $p_{i, \text{отк.}}$ , зелёным цветом – среднее давление насосных потерь в отключённом цилиндре  $p_{n, \text{отк.}}$ . Положительное значение среднего давления характеризует совершаемую газом полезную работу, отрицательное значение – потери.

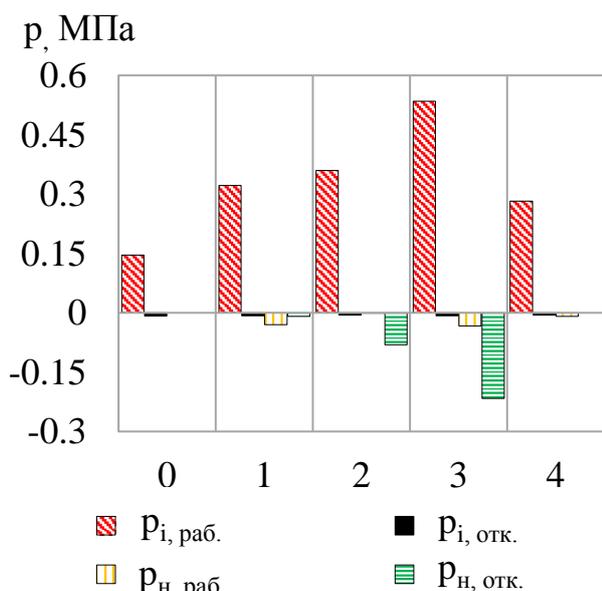


Рисунок 11. Индикаторные показатели в виде среднего давления

Полученные в результате моделирования индикаторные диаграммы предоставляют возможность оценить, прежде всего, влияние варианта работы системы газораспределения в отключённых цилиндрах на потери на насосные ходы и отрицательную работу, затрачиваемую поршнем в процессах сжатия и расширения. При штатной работе клапанов, а также при закрытии либо впускных, либо выпускных клапанов работа на тактах насосных ходов возрастает по сравнению с работой двигателя без отключения цилиндров. Наименьшая работа на тактах, соответствующих впуску и вы-

пуску, получена при закрытии в отключённых цилиндрах всех клапанов. Анализ токсичности и дымности отработавших газов при отключении цилиндров проведён для дизеля Д49 на частоте вращения  $450 \text{ мин}^{-1}$  при нагрузках  $1000 \text{ Н м}$  и  $4000 \text{ Н м}$ . На Рисунках 12 и 13 приведены удельные выбросы оксида углерода  $\text{CO}$ , оксидов азота  $\text{NO}_x$  и сажи при отключении цилиндров со штатной работой клапанов (1) и закрытием всех клапанов (4) по сравнению с работой двигателя со всеми цилиндрами (0). Расчёт показал, что при отключении цилиндров снижаются удельные выбросы оксида углерода и сажи, но возрастают выбросы оксидов азота.

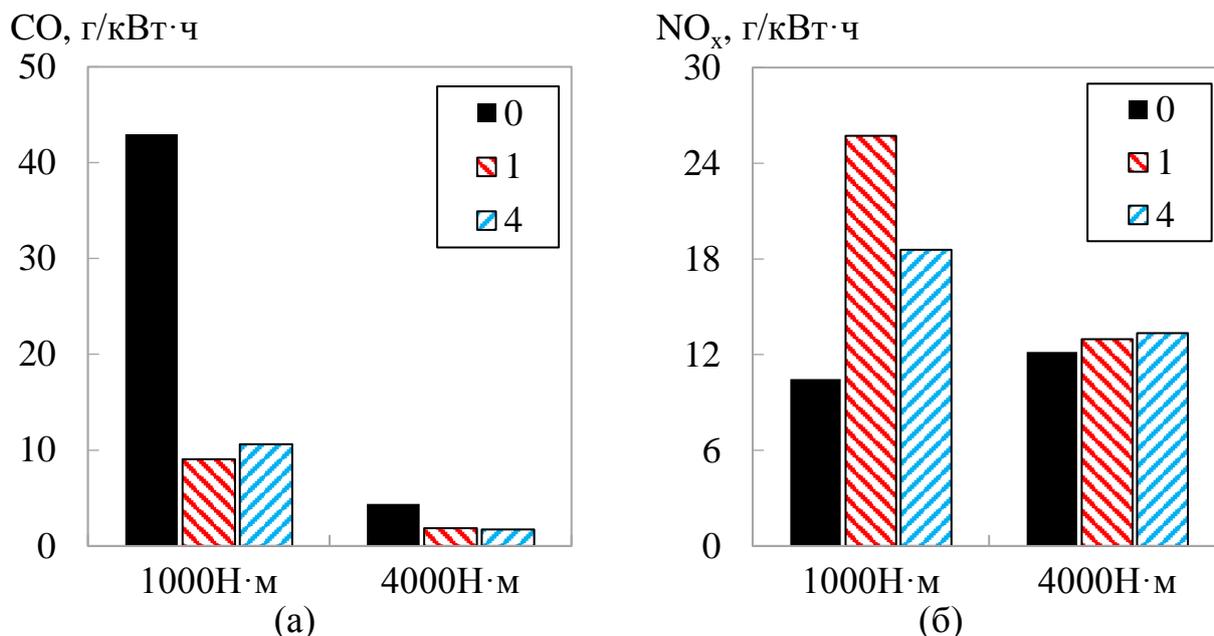


Рисунок 12. Удельные выбросы в отработавших газах: а – оксида углерода CO; б – оксидов азота NO<sub>x</sub>

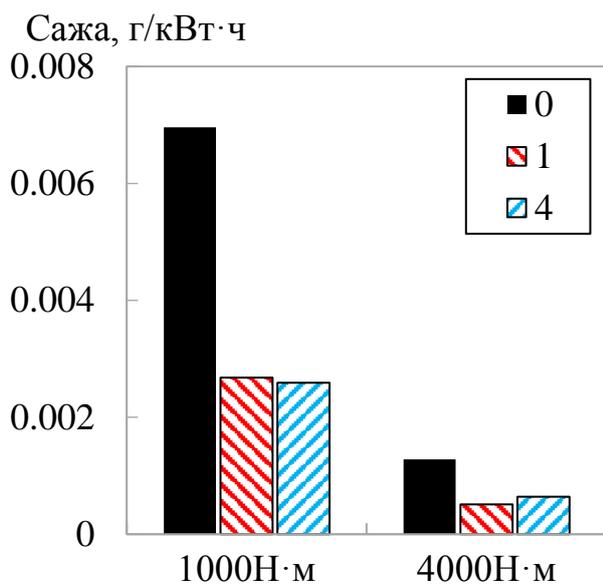


Рисунок 13. Удельные выбросы сажи

Отключение и обратное включение цилиндров сопровождается переходными процессами. Степень изменения параметров рабочего процесса зависит от стратегии отключения или включения цилиндров. Одновременный вывод из работы большого количества отключаемых цилиндров, для дизеля Д49 – это 8 цилиндров, (или обратный ввод в работу отключённых цилиндров) может привести к значительным изменениям параметров рабочего процесса дизеля. Если отключать и включать цилиндры частями, можно избежать резкого отклонения параметров рабочего

процесса от установившихся значений. Для дизеля Д49 рассмотрены две стратегии отключения и последующей активации цилиндров на режиме  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 1000 \text{ Н м}$ . Первая стратегия соответствует отключению и обратному включению всех 8-и цилиндров одновременно. Вторая стратегия предусматривает отключение цилиндров частями: сначала отключаются 4-е цилиндра, через 2-е секунды – ещё 4-е, обратное включение производится также по 4-е цилиндра. Из Рисунка 14 видно, что изменения в переходных процессах таких параметров дизеля, как частота вращения  $n$ , цикловая подачи топлива  $g_{ц}$  и температура отработавших газов  $t_r$  уменьшаются при отключении (активации) цилиндров по частям. Нестабильность частоты вращения при отключении цилиндров возрастает.

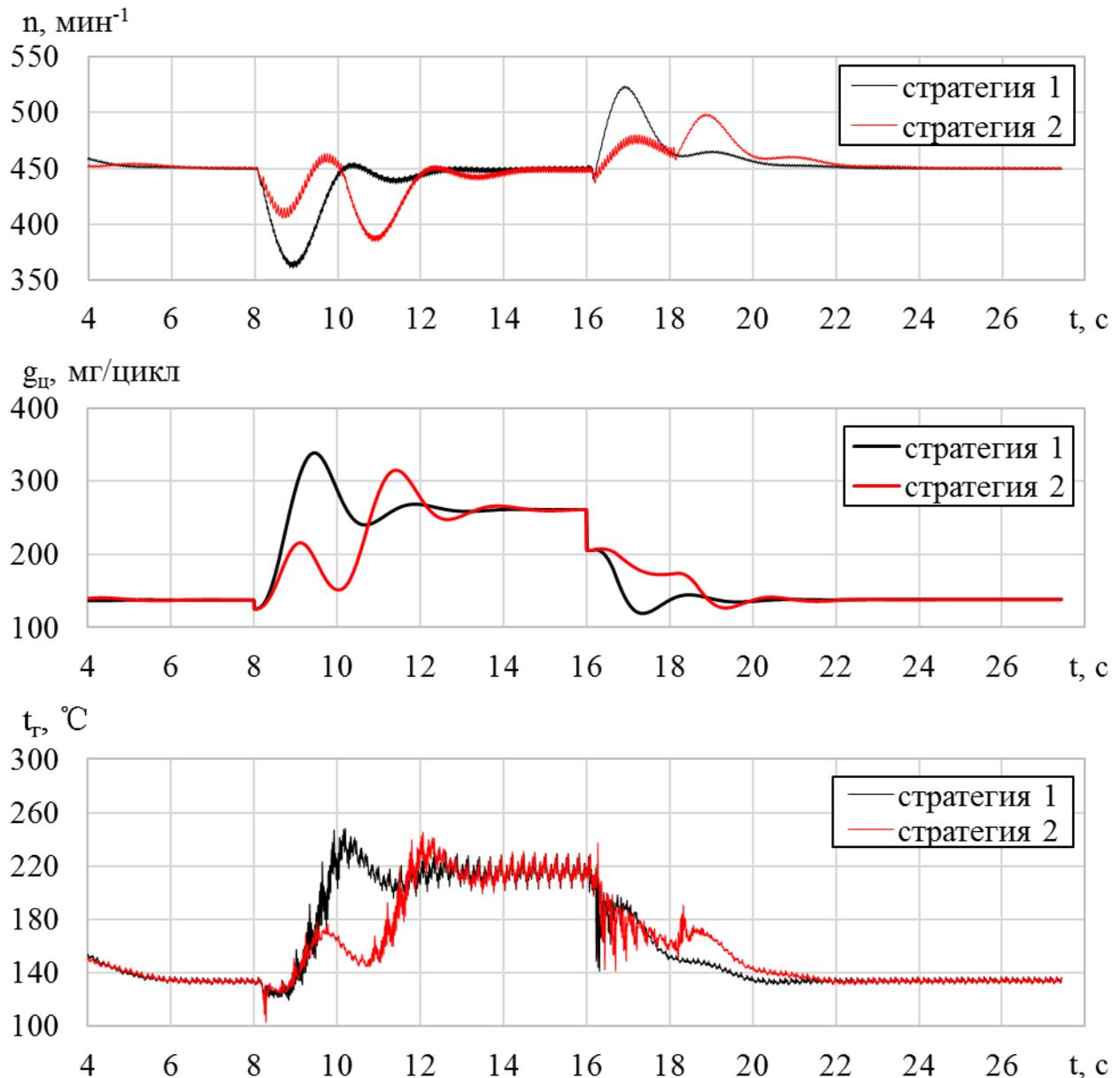


Рисунок 14. Переходные процессы

В четвёртой главе дан анализ потерь энергии в дизеле Д49 на режиме  $n = 450 \text{ мин}^{-1}$ ,  $M_e = 1000 \text{ Н м}$ . При отключении цилиндров и различных вариантах работы системы газораспределения изменяются все составляющие энергетического баланса двигателя.

Как следует из диаграммы на Рисунке 15, где приведена мощность потерь на насосные ходы, эта составляющая энергетического баланса двигателя оказывает значительное влияние на изменение удельного эффективного расхода топлива при различных вариантах работы впускных и выпускных клапанов в отключённых цилиндрах.

На Рисунке 16 приведена мощность механических потерь дизеля при различных вариантах работы системы газораспределения. Показано, что механические потери незначительно изменяются при отключении цилиндров вследствие того, что увеличение потерь на трение в работающих цилиндрах практически компенсируется уменьшением механических потерь в отключённых цилиндрах.

Дан подробный анализ механических потерь дизеля при отключении цилиндров в виде следующих составляющих: потерь на трение в поршневой группе, трение в подшипниках коленчатого вала, потерь на привод газораспределительного механизма, потерь на газообмен и потерь на привод вспомогательных агрегатов (Рисунок 17).

Потери на теплоотдачу в стенке цилиндра в значительной степени зависят от работы системы газораспределения (Рисунок 18). При закрытии всех клапанов в отключённых цилиндрах повышение теплообмена в работающих цилиндрах меньше, чем снижение теплообмена в отключённых цилиндрах, поэтому потери на теплоотдачу в двигателе в целом снижаются.

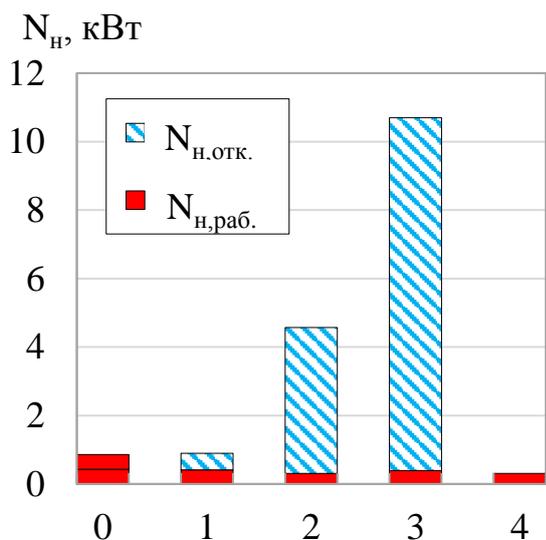


Рисунок 15. Мощность насосных потерь:  $N_{n,отк.}$  – в отключённом цилиндре;  $N_{n,раб.}$  – в работающем цилиндре

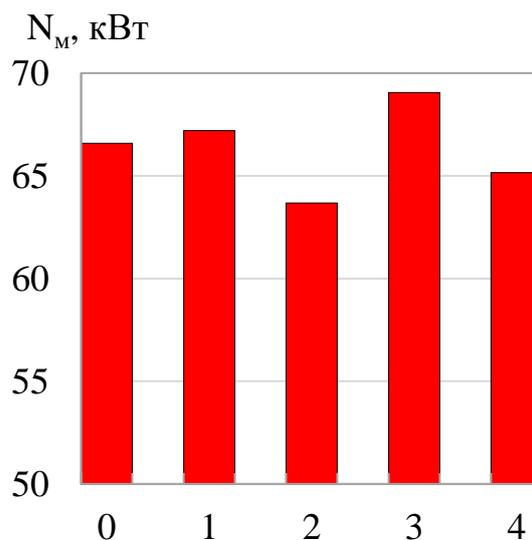


Рисунок 16. Мощность механических потерь

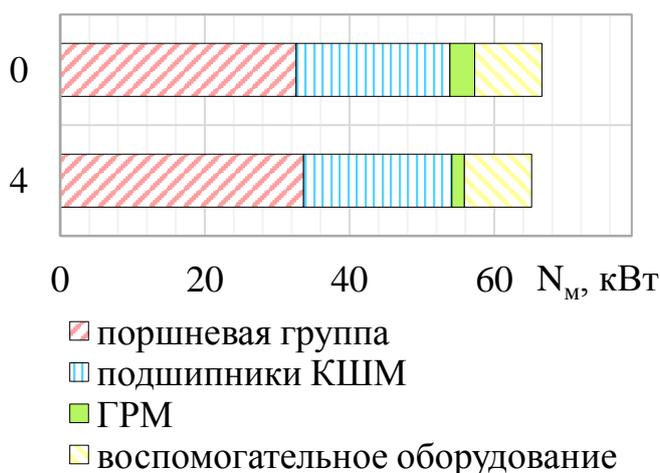


Рисунок 17. Составляющие механических потерь двигателя: а – работа со всеми цилиндрами; б – отключение цилиндров и закрытие в них клапанов

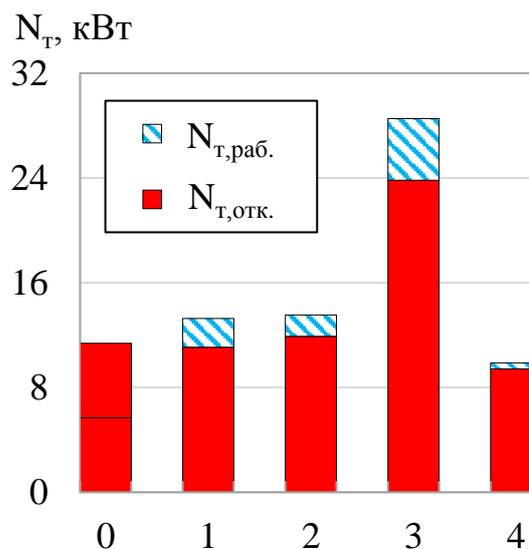


Рисунок 18. Мощность потерь на теплоотдачу в стенке цилиндра:  $N_{t,отк.}$  – в отключённом цилиндре;  $N_{t,раб.}$  – в работающем цилиндре

Сравнительная диаграмма энергетического баланса в значениях мощности для различных вариантов отключения цилиндров дизеля Д49 на рассматриваемом частичном режиме дана на Рисунке 19. Высота полного столбца представляет собой мощность, выделяемую при сгорании топлива. Отключение подачи топлива в восемь цилиндров без изменения работы системы газораспределения (сравнение вариантов 0 и 1) по сравнению с другими вариантами работы системы газораспределения в меньшей степени влияет на составляющие энергетического баланса, а значит, и на топливную экономичность двигателя. Закрытие только впускных клапанов (вариант 2) или только выпускных клапанов (вариант 3) приводит к увеличению насосных потерь из-за огромной разницы давлений газов между процессами впуска и выпуска. Закрытие впускных и выпускных клапанов снижает потребление энергии топлива, при этом варианте механические потери, потери на теплоотдачу, потери с отработавшими газами и насосные потери уменьшаются по сравнению с исходным вариантом.

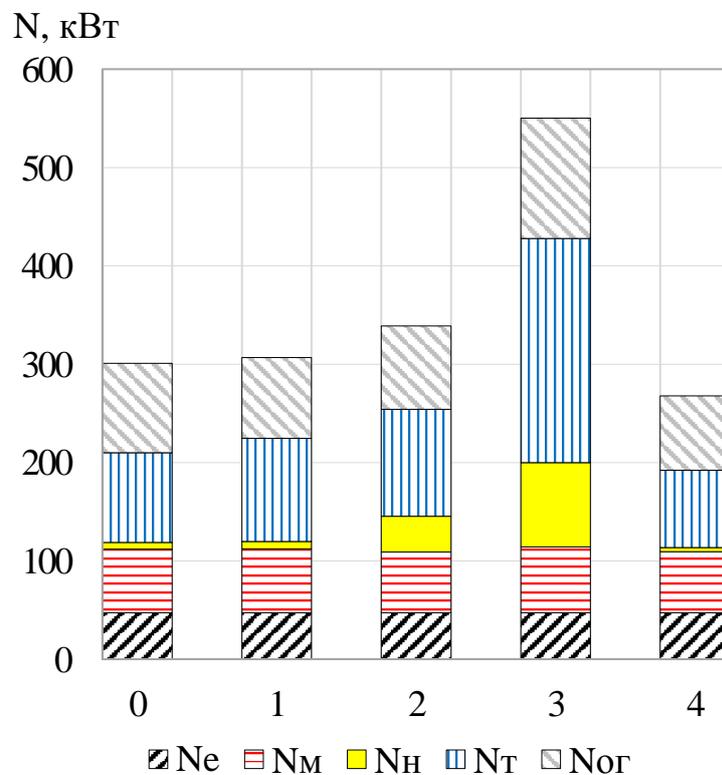


Рисунок 19. Энергетический баланс (в единицах мощности) дизеля Д49 при различных вариантах отключения цилиндров

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЕ

1. Расчётное исследование показало, что эффективность метода отключения цилиндров зависит от способа реализации этого метода. Прекращение подачи топлива в часть цилиндров не даёт в рассматриваемых дизелях снижение расхода топлива. Значительное влияние на результативность отключения цилиндров оказывает работа системы газораспределения в отключённых цилиндрах. Эффект по снижению расхода топлива получен при закрытии впускных и выпускных клапанов в отключённых цилиндрах. Результаты расчётного исследования подтверждаются данными испытаний.

2. Индикаторные диаграммы в отключённых цилиндрах значительно отличаются при различных вариантах работы в них системы газораспределения. При закрытии всех клапанов в отключённых цилиндрах устанавливается индикаторная диаграмма, в которой процессы изменения давления на тактах впуска – выпуска и сжатия – расширения совпадают. Вид диаграммы определяется перетеканием газов между внутренним объёмом цилиндра и картерной полостью по каналу, образованному зазорами в поршневых кольцах.

3. В зависимости от работы впускных и выпускных клапанов в отключённых цилиндрах в значительной степени изменяется работа насосных ходов. Наименьшая работа на тактах, соответствующих впуску и выпуску, получена при закрытии в отключённых цилиндрах всех клапанов.

4. При отключении цилиндров изменяются показатели токсичности отработавших газов: снижаются удельные выбросы оксида углерода и сажи, выбросы оксидов азота возрастают.

5. Отключение и последующая активация цилиндров сопровождается переходными процессами, изменения параметров рабочего процесса в которых зависят от стратегии изменения количества работающих цилиндров – отклонения параметров уменьшаются при отключении (активации) цилиндров по частям. Нестабильность частоты вращения при отключении цилиндров возрастает из-за более значительного изменения крутящего момента в работающих цилиндрах с меньшей периодичностью.

6. Отключение цилиндров приводит к изменению энергетического баланса двигателей – изменяются все составляющие потерь энергии сгоревшего топлива, которые влияют на топливную экономичность. Наиболее значительно изменяются потери на насосные ходы и теплоотдачу, наиболее стабильными являются механические потери.

7. Отключение цилиндров даёт экономию топлива при работе среднеоборотных дизелей на холостом ходу и частичных режимах при закрытии всех клапанов в отключённых цилиндрах.

#### **Основные положения диссертации изложены в следующих работах:**

1. Кузнецов А. Г., Харитонов С. В., Лю Ин. Исследование методов интенсификации переходных процессов дизель-генератора // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2018. № 6. С. 50-58 (0,6 п.л./0,3 п.л.).
2. Лю Ин, Кузнецов А. Г., Харитонов С. В. Анализ индикаторных диаграмм дизельного двигателя при отключении цилиндров // Двигателестроение. 2019. № 2. С. 9-16 (0,6 п.л./0,3 п.л.).
3. Лю Ин, Кузнецов А. Г. Анализ рабочего процесса дизельного двигателя при отключении цилиндров // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2019. № 11. С. 9-18 (0,8 п.л./0,5 п.л.).
4. Liu Ying, Kuznetsov A.G. The Effect of Cylinder Deactivation on Engine Performance // 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). Vladivostok. 2020. № 20256414. P. 1-5 (0,5 п.л./0,3 п.л.).

5. Liu Ying, Kuznetsov A.G., Sa Bowen. Simulation and Analysis of the Impact of Cylinder Deactivation on Fuel Saving and Emissions of a Medium-Speed High-Power Diesel Engine // Applied Sciences. 2021. № 11. Art. № 7603. P. 1-21(1,2п.л./0,75 п.л.).