

**Б.Е. Поликер, Л.Л. Михальский, В.А. Марков
В.К. Васильев, Д.И. Буханец**

**Проблемы конвертирования транспортных
дизельных двигателей для электроагрегатов
и теплоэлектростанций**

**Под редакцией Чл.-корр. Международной инженерной
Академии Б.Е. Поликера**

Москва
Легион Автодата
2006

УДК 621.435

ББК 31.365

П266?

ISBN 588850187-5

Поликер Б.Е., Михальский Л.Л., Марков В.А., Васильев В.К., Буханец Д.И. Проблемы конвертирования транспортных дизельных двигателей для электроагрегатов и теплоэлектростанций / Под ред. Б.Е. Поликера. – М.: Легион-Автодата, 2006. - 320 с., ил.

Рецензент докт. техн. наук, профессор, засл. деятель науки РФ, зав. каф. МГТУ им. Н.Э. Баумана Н.А. Иващенко и канд. техн. наук, ст. науч. сотрудник В.И. Шатров

В книге изложены основные понятия и методы конвертирования транспортных дизельных двигателей для применения в качестве первичных силовых двигателей в стационарных и передвижных электроагрегатах, электростанциях и теплоэлектростанциях. Рассмотрены проблемы аккумуляции их энергии и утилизации тепла, отводимого от дизельных двигателей. Приведены основные положения теории таких двигателей и примеры их расчета.

Книга предназначена для инженерно-технических работников предприятий, научно-исследовательских и конструкторских организаций, связанных с производством, разработкой, испытаниями и эксплуатацией дизельных электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций, а также для студентов ВУЗов механических и энергетических специальностей. Книга может быть полезна автолюбителям и автотранспортным организациям, эксплуатирующим автомобильные дизельные двигатели.

© ЗАО "Легион-Автодата" 2006

тел. (095) 679-96-07, 517-05-40

факс (095) 679-97-36

E-mail: Legion@autodata.ru

<http://www.autodata.ru>

ISBN 588850187-5

Лицензия ИД №00419 от 10.11.99.

Подписано в печать 12.02.06.

Формат 60×90 1/8. Печ. л. 40.

Бумага офсетная. Печать офсетная.

© Поликер Б.Е., Михальский Л.Л., Марков В.А.,
Васильев В.К., Буханец Д.И., 2006

© Издательство "Легион-Автодата" 2006

Оглавление

Введение	8
Глава 1. Определения, структура системы условных обозначений электроагрегатов и передвижных электростанций мощностью 30-200 кВт.....	10
1.1. Классификация электроагрегатов и электростанций.....	13
1.2. Основные параметры и размеры электроагрегатов и электростанций.....	14
1.3. Номинальная частота вращения валов первичного двигателя и генератора электроагрегата и электростанции	14
1.4. Степень автоматизации электроагрегатов и электростанций.....	14
1.5. Факторы внешней среды.....	16
1.6. Климатическое исполнение электроагрегатов и электростанций.....	16
1.7. Базовые электроагрегаты, серийно выпускаемые в России	17
Глава 2. Технические характеристики дизельных двигателей электроагрегатов с традиционными и бинарными рабочими процессами	20
2.1. Общие положения	20
2.2. Дизельные двигатели электроагрегатов с традиционным рабочим процессом.....	22
2.3. Дизельные двигатели электроагрегатов с бинарными рабочими процессами.....	26
2.4. Технические характеристики серийных дизельных двигателей с традиционными и бинарными рабочими процессами	27
Глава 3. Технические характеристики силовых генераторов переменного тока электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций	35
3.1. Основы работы силовых генераторов	34
3.2. Генераторы переменного тока	34
3.3. Бесконтактные синхронные и асинхронные генераторы переменного тока	36
3.4. Конвертированный асинхронный бесщеточный мотор – генератор переменного тока.....	41
3.5. Генераторы постоянного тока.....	41
3.6. Технические характеристики силовых генераторов	41
Глава 4. Горючесмазочные материалы, охлаждающие жидкости, рабочие тела для переноса тепла, моющие средства	50
4.1. Горючесмазочные материалы, применяемые для питания дизельных двигателей	50
4.2. Консистентные смазочные материалы.....	62
4.3. Моющие средства.....	64
4.4. Охлаждающие жидкости	66
4.5. Рабочие тела, теплоносители	66
Глава 5. Анализ эксплуатационных нагрузочных характеристик дизельных двигателей.....	76
5.1. Анализ нагрузочных характеристик дизельных двигателей.....	76
5.2 Мощностные характеристики дизельных двигателей электроагрегатов.....	82
Глава 6. Анализ характеристик отработавших газов дизельных двигателей	93
6.1. Расчет расходных характеристик отработавших газов.....	93
6.2. Характеристики токсичности отработавших газов	94
Глава 7. Анализ эксплуатационных характеристик теплового состояния дизельных двигателей	103
7.1. Тепловой баланс электроагрегата	103
7.2. Теплота, теряемая в электроагрегате при работе на режиме холостого хода.....	106
7.3. Тепловой баланс электроагрегата с учетом утилизации теплоты, теряемой в дизельном двигателе	106
7.4. Определение эффективного термодинамического КПД дизельной теплоэлектростанции с бинарным циклом	109

Глава 8. Эксплуатационная топливная экономичность дизельных двигателей	114
8.1. Топливная экономичность дизельных агрегатов	114
8.2. Топливная экономичность транспортных дизелей	119
Глава 9. Исследование эксплуатационных характеристик расхода воздуха и коэффициента избытка воздуха дизельных двигателей	120
9.1. Оптимизации рабочих процессов дизельных двигателей на режимах частичных нагрузок и холостого хода	120
9.2. Разработка системы автоматического дросселирования воздушного заряда дизельного двигателя	131
Глава 10. Исследования схем внешней утилизации отходящей теплоты дизельных двигателей	140
10.1. Анализ базовых направлений создания ТЭС с утилизацией отводимого тепла	140
10.2. Методы исследования теплового баланса электроагрегатов и электростанций	142
Глава 11. Теоретические основы расчета узлов и систем транспортных дизельных двигателей электроагрегатов	156
11.1. Топливная аппаратура дизельных двигателей промышленных модификаций	156
11.2. Конструкция и расчет систем охлаждения и смазки дизельных двигателей электроагрегатов	167
11.3. Системы очистки воздуха дизельных двигателей электроагрегатов	172
11.4. Шумовые характеристики дизельных двигателей электроагрегатов	182
Глава 12. Системы пуска и прогрева дизельных двигателей электроагрегатов	186
12.1. Сопrotивление прокручиванию дизельных двигателей при пуске	186
12.2. Пусковые качества дизельных двигателей	186
12.3. Средства и системы пуска и прогрева дизельных двигателей	188
12.4. Средства облегчения воспламенения и сгорания топлива при пуске дизельного двигателя	188
12.5. Системы предпускового прогрева дизельных двигателей	190
12.6. Отопительно-вентиляционные и воздушно-отопительные системы	192
12.7. Каталитические системы прогрева систем охлаждения дизельных двигателей	192
12.8. Системы пуска дизельных двигателей	192
12.9. Электростартерная система пуска дизельных двигателей	193
12.10. Система пуска дизельных двигателей сжатым воздухом	197
12.11. Схемы пуска дизельных двигателей сжатым воздухом	200
12.12. Системы пуска инерционными стартерами дизельных двигателей, встраиваемых в электроагрегаты или электростанции	201
12.13. Системы пуска дизельных двигателей бензиновыми пусковыми двигателями	202
12.14. Системы заряда и низковольтного энергоснабжения электроагрегата или электростанции	204
Глава 13. Конструкция и расчет основного оборудования для утилизации тепла, отводимого от стационарных и мобильных дизельных теплоэлектростанций	212
13.1. Общие положения применения отопления и вентиляции	213
13.2. Метрологические условия	214
13.3. Технические параметры отопления и вентиляции	215
13.4. Воздушные завесы	216
13.5. Требования к подбору ТЭС	216
13.6. Теплообменные аппараты. Теплообменники	217
13.7. Разработка дымогарного теплообменника для дизельного двигателя Д65А-П электростанции мощностью 30 кВт	221
13.8. Технические требования к жидкостно-дымогарному теплообменнику для дизельного двигателя Д65А-П	223

Глава 14. Аккумуляирование энергии	232
14.1. Обзор существующих процессов накопления энергии. Общие положения и определения.	232
14.2. Классификация систем аккумуляирования для энергетических установок	234
14.3. Баланс аккумуляирования тепловой энергии	235
14.4. Типы систем энергоснабжения, используемые в ТЭС	238
14.5. Емкость аккумулятора тепловой энергии	242
14.6. Виды сосудов, аккумуляирующих тепло.....	243
14.7. Способы энергосбережения и аккумуляирования тепловой энергии ТЭС	246
14.8. Оценка эффективности и технологичности аккумуляирования энергии.....	252
Глава 15. Параллельная работа электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций с дизельными двигателями, их синхронизация	275
15.1. Параллельная работа дизельных двигателей.....	275
15.2. Параллельная работа электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций	277
15.3. Самосинхронизация	280
15.4. Распределение нагрузки между параллельно работающими электроагрегатами.....	280
Глава 16. Системы автоматизации дизельных электроагрегатов и электростанций	282
16.1. Требования и состав системы комплексной автоматизации дизельных электроагрегатов	282
16.2. Алгоритмы работы систем автоматического регулирования дизельных электроагрегатов и электростанций.....	285
16.3. Структура САР и теоретические основы ее расчета.....	289
16.4. Система автоматического регулирования частоты вращения коленчатого вала дизельного двигателя электроагрегатов и электростанций	293
16.5. Система автоматического регулирования температуры охлаждающей жидкости дизельного двигателя электроагрегатов и электростанций	296
16.6. Системы автоматического регулирования и оптимизация работы дизельного двигателя электроагрегатов и электростанций	299
16.7. Система автоматического регулирования напряжения на зажимах силового генератора электроагрегата	302
16.8. Система автоматического регулирования при параллельной работе дизельных электроагрегатов	303
Глава 17. Транспортные средства для передвижных электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций	305
17.1. Установка передвижных электроагрегатов	305
17.2. Расчет устойчивости транспортного средства передвижного электроагрегата	306
17.3. Определение усилия, развиваемого автомобилем, и необходимой мощности двигателя.....	308
Глава 18. Надежность дизельных электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций	312
18.1. Методы определения надежности электроагрегатов.....	312
18.2. Критерии надежности электроагрегатов	313
18.3. Испытания электроагрегатов на надежность.....	314
18.4. Рабочие характеристики блоков зарядки батарей аккумуляторов	317
Заключение	318
Список литературы	319

Таблица 4.11. Основные физико-химические свойства водорода и аммиака.

Параметр	Значение
Водород	
Температура:	
воспламенения, К	858
кипения, К	20,24
застывания, К	13,8
Критическая температура, К	32,9
Критическое давление, МПа	1,27
Плотность:	
при нормальных условиях, кг/м ³	0,08987
температуре кипения, кг/м ³	0,07097·10 ³
температуре застывания, кг/м ³	0,0896·10 ³
Теплота плавления, кДж/моль	0,0965
Концентрационный диапазон воспламеняемости с воздухом, % по объему	4-75
Коэффициент вязкости при температуре, МПа·с:	
Застывания	240·10
Кипения	131·10
Аммиак	
Температура:	
кипения, К	39,6
застывания, К	195
критическая, К	405
воспламенения, К	924
Плотность при 239,6 К, кг/м ³	680
Критическое давление, МПа	10,92
Удельная теплота сгорания с учетом диссоциации, МДж/кг	17,13

Пусковые жидкости

Предназначены для облегчения холодного пуска дизельного и бензиновых двигателей. К этим жидкостям предъявляется ряд эксплуатационных требований. Пусковые жидкости должны иметь: хорошую испаряемость при низкой температуре; быструю воспламеняемость от ис-

кры или самовоспламеняемость от сжатия; высокие антикоррозионные и противоизносные свойства; низкую температуру застывания; стабильность при длительном хранении. Ассортимент и эксплуатационные свойства жидкостей приведены в табл. 4.12.

Моторные масла

Моторные масла применяемые для смазки дизельных двигателей электроагрегатов, электростанций и теплоэлектростанций имеют широкий ассортимент типов и марок. Это вызвано тем, что эти двигатели имеют широкий диапазон мощностей, частот вращения коленчатого вала, среднего эффективного давления, используют топлива с широким диапазоном физико-химических свойств и т.д.

Минеральные масла с различными присадками, используемые для смазки двигателей внутреннего сгорания, называются моторными. По способу изготовления они могут быть дистиллятными (получаемыми очисткой отдельных фракций нефти), остаточными (получаемыми очисткой остатков, образующихся при перегонке мазута), компаундированными (состоящими из смеси дистиллятных и остаточных масел) и загущенными (содержащими полимерные присадки). В процессе разгонки нефти в масляных дистиллятах сохраняются нежелательные компоненты и соединения: нафтеновые кислоты, асфальтосмолистые вещества, азотистые и сернистые соединения, ряд других веществ. Поэтому для удаления этих компонентов и улучшения качества масел производят их очистку. В настоящее время применяют очистку масел при помощи растворителей (селективная очистка), при которой удаляются нежелательные углеводороды, смолы и часть сернистых соединений. Для снижения температуры застывания масел применяют их депарафинизацию.

Таблица 4.12. Пусковые жидкости.

№ п/п	Показатель	Жидкость для ДВС			
		Бензиновых «Арктика»	Дизельных		
			Диэтиловый эфир	Жидкость НАМИ	«Холод Д-40»
1	Цвет	Прозрачный или светло-желтый	Прозрачный или светло-голубой	-	-
2	Состав (по массе),%: диэтиловый спирт (эфир)	45-60	100	65	58-62
3	Газовый бензин (петролейный эфир)	38-43	-	20	13-17
4	Турбинное масло	1,5-2,5	-	-	9-11
5	Изолиропилнитрат (или перекиси, альдегиды)	2-4 (до 10)	-	(3)	13-17
6	Противоизносная и противозадирная присадки	до 2	-	-	-
7	Антиокислительная присадка	до 0,5	-	0,2	-
8	Минимальная температура надежного пуска без подогрева, °С	-30...-35	-30...-35	-	-

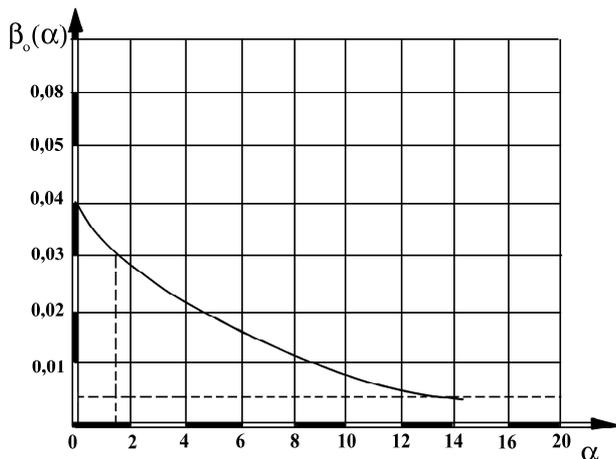
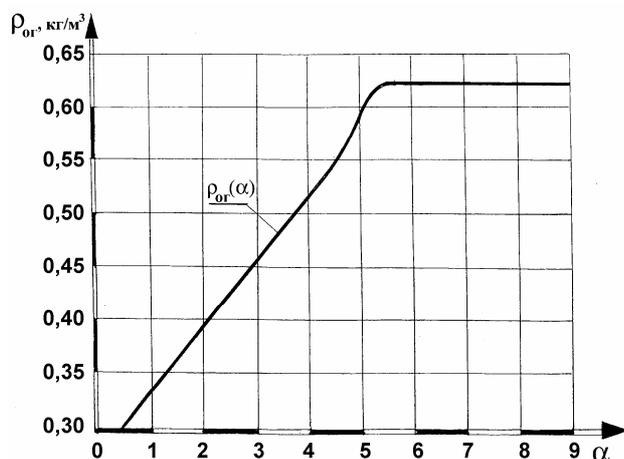
Примечание:

1. Жидкости «Арктика» и НАМИ впрыскиваются во впускной трубопровод с помощью приспособления 5ПП-40 или ДПП-40.
2. Диэтиловый эфир подается в виде 5-8- капель в воздушную трубу при снятом воздухоочистителе в момент проворачивания вала двигателя.
3. «Холод Д-40» впрыскивается в камеру сгорания с помощью специального приспособления.

Таблица 6.1. Расчет плотности $\rho_{ог}$ ОГ.

№ п/п	α	$P_{ог}$, МПа	$T_{ог}$, К (°С)	$R_{ог}$, Дж/(кг·К)	$M_1 = \alpha L_0 = 0,5\alpha$, кмоль/кг	$M_2 = M_1 + H_2/4 + O/32$, кмоль/кг	$B_o(\alpha) = M_2/M_1$	$\rho_{ог} = 10^6 \cdot \frac{P_{ог}}{R_{ог} \cdot T_{ог}}$, кг/м ³
1	1,7	0,120	973 К (700°С)	333,3	085	0,8753	1,03	0,37
2	4,4	0,115	718 К (445°С)	291,0	2,2	2,2253	1,0115	0,55
3	5,42	0,110	607 К (334°С)	290,0	2,71	2,753	1,016	0,625
4	8,97	0,108	600 К (327°С)	288,0	4,485	4,51	1,0055	0,625

пересчет массового расхода ОГ в объемный. По результатам проведенных расчетов построен график зависимости $\rho_{ог}$ от α , представленный на рис. 6.2.

Рис. 6.1. Зависимость коэффициента молекулярного изменения рабочей смеси β_0 от коэффициента избытка воздуха α .Рис. 6.2. Зависимость плотности отработавших газов $\rho_{ог}$ от коэффициента избытка воздуха α .

В табл. 6.2, 6.3 и 6.4 представлены расходные характеристики ОГ дизельных двигателей, используемых в электроагрегатах, электростанциях и мини-ТЭС. По этим данным можно судить о наиболее эффективном использовании тепла, отводимого с ОГ и утилизируемого в дизельных двигателях. При этом из рис. 6.2 видно, что на режимах, соответствующих $\alpha > 4,4$ происходит стабилизация температуры ОГ и соответственно $\rho_{ог}$ на уровне $\rho_{ог} = 0,625$ кг/м³.

6.2. Характеристики токсичности отработавших газов

Расходные характеристики ОГ необходимы и для определения другого важнейшего показателя работы двигателей – их токсичности. Двигатели внутреннего сгорания играют значительную роль в загрязнении окружающей среды. В крупных городах они являются одним из главных источников токсичных веществ, выбрасываемых в атмосферу. Доля автомобильного транспорта в выбросе вредных веществ составляет в США – 60,6%, в Англии – 33,5%, во Франции – 32%. Поэтому, наряду с улучшением экономических показателей двигателей, снижение токсичности их ОГ становится серьезной проблемой.

ОГ дизельных двигателей являются многокомпонентной смесью продуктов полного сгорания топлива (диоксид углерода CO_2 и вода H_2O) и неполного сгорания (монооксид углерода CO , газообразные углеводороды CH_x , альдегиды $RCHO$, сажа C). В ОГ присутствуют неиспользованный при сгорании топлива кислород O_2 , содержащийся в воздухе азот N_2 и продукты его окисления – оксиды азота NO_x , газообразные продукты окисления серы, имеющейся в топливе (в основном диоксид SO_2). Кроме газообразных компонентов, в ОГ присутствуют так называемые "твердые частицы", основным компонентом которых является сажа C . Всего ОГ дизельных двигателей сгорания содержат около 250 компонентов, часть из которых нетоксичны. Токсичность ОГ определяется 0,1 – 1% объема ОГ. При этом 80 – 95% от общей массы токсичных компонентов приходится на долю пяти из них: NO_x , CO , CH_x , альдегидов $RCHO$, диоксида серы SO_2 (табл. 6.5). Нормируемыми компонентами являются оксиды азота NO_x , монооксид углерода CO , углеводороды CH_x и сажа или твердые частицы.

Основной токсичный компонент ОГ дизельных двигателей – оксиды азота NO_x : их доля в суммарных токсичных выбросах составляет 30 – 80% по массе и 60 – 95% по эквивалентной токсичности. Из них 95 – 98% приходится на монооксид NO и 2 – 5% – на диоксид NO_2 . Токсичность NO_2 в 7 раз выше токсичности NO . Монооксид азота нестабилен. При нормальных условиях NO окисляется до NO_2 в течение от 0,5 – 1 до 100 часов (в зависимости от концентрации в воздухе).

8.2. Топливная экономичность транспортных дизелей

Общепринятыми показателями топливной экономичности транспортных дизельных двигателей являются удельный эффективный расход топлива на режимах внешней скоростной характеристики - на режимах номинальной мощности и максимального крутящего момента. При этом в лучших зарубежных дизельных двигателях достигнутый минимум расхода топлива составляет $g_e = 190 - 192$ г/(кВт·ч), а в отечественных - $g_e = 210 - 230$ г/(кВт·ч) (рис. 8.2).

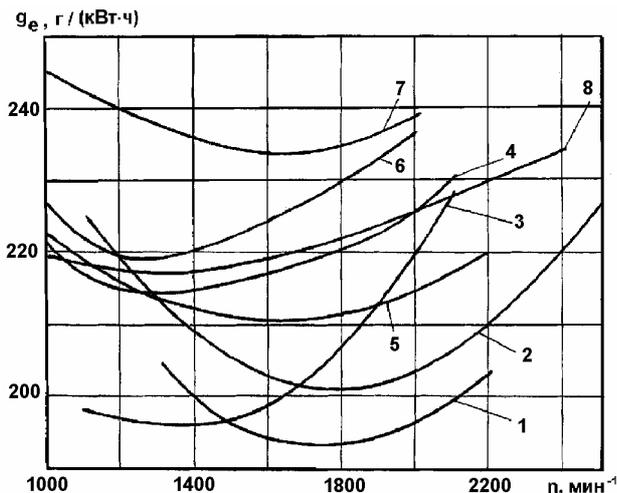


Рис. 8.2. Зависимости удельного эффективного расхода топлива от частоты вращения коленчатого вала на режимах внешней скоростной характеристики некоторых зарубежных и отечественных дизельных двигателей транспортного и автотракторного назначения: 1 - 6076 Н (6СН11,6/12,1) фирмы John Deere (США); 2 - 6 ВТА (6СН10,2/12) фирмы Cummins (США); 3 - N 14 - 460 Е (6СН14/15,2) фирмы Cummins (США); 4 - TL 11 (6СН12,7/14,6) фирмы Leyland (Великобритания); 5 - КамАЗ - 7406 (8СН12/12); 6 - СМД - 31 (6СН12/14); 7 - Д - 120 (2СН10,5/12); 8 - Д - 245 (4СН11/12,5).

Но транспортные дизельные двигатели работают в широком диапазоне режимов. На режимах с низкой частотой вращения и неполной нагрузкой показатели экономичности дизельных двигателей обычно ухудшаются (рис. 8.3). Поэтому обеспечение их высокой топливной экономичности на режимах внешней скоростной характеристики еще не гарантирует минимального расхода топлива в условиях эксплуатации.

Поскольку оценка топливной экономичности дизельного двигателя по удельным эффективным расходам топлива на режимах номинальной мощности и максимального крутящего момента не является исчерпывающей, такую оценку целесообразно проводить по условному среднему расходу топлива, который может быть определен с использованием выражения:

$$g_{e\text{cp}} = \frac{\sum_{i=1}^k (G_{Ti} \cdot K_i)}{\sum_{i=1}^k (N_{ei} \cdot K_i)} \quad (8.13),$$

где G_{Ti} - часовой расход топлива на i -м режиме; N_{ei} - мощность двигателя на этом режиме;

K_i - коэффициент, отражающий долю времени каждого режима, k - число режимов. Таким образом, при выборе средств улучшения топливной экономичности предпочтительными являются те из них, которые обеспечивают снижение расхода топлива не только на номинальном режиме, но и на других эксплуатационных режимах дизельных двигателей электроагрегатов и транспортных дизельных двигателей.

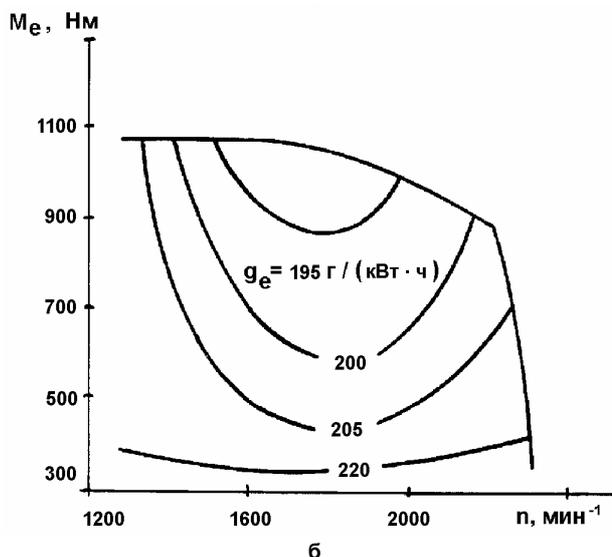
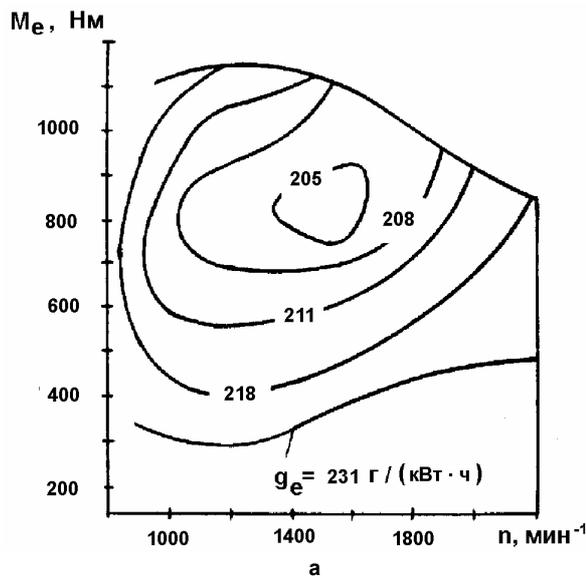


Рис. 8.3. Многопараметровые характеристики транспортных и автотракторных дизельных двигателей: а - КамАЗ-7406 (8СН12/12); б - 6076 Н (6СН11,6/12,1) фирмы John Deere (США); M_e - крутящий момент двигателя; g_e - удельный эффективный расход топлива.

При подборе транспортного дизельного двигателя для конвертации в промышленную модификацию необходимо, в первую очередь, учитывать топливную экономичность исходного двигателя на режимах, которые будут преобладать при эксплуатации двигателя промышленного назначения.

Удельный расход условного топлива, затрачиваемого на производство 1 кДж теплоты, определяется как:

$$g_T^y = \frac{G_T^3}{Q_T} = 10^6 \frac{1}{29300 \cdot \eta_{ТЭС}^{бр}}, \quad (10.27)$$

где $\eta_{ТЭС}^{бр}$ – КПД (брутто) мини-ТЭС по производству тепла Q_T , определяемый в виде

$$\eta_{ТЭС}^{бр} = \frac{Q_T}{G_T Q_H^p} = \eta_{ку}^H \cdot \eta_{п} \cdot \eta_{тр}, \quad (10.28)$$

Такое условное разделение удельных расходов топлив $g_{эл}^y$ и g_T^y позволяет определить приоритет производства электроэнергии на фоне утилизации и потребления тепла.

Удельный расход условного топлива $g_{отм}^y$ на единицу отпущенной энергии также рассчитывается по формулам (10.26) и (10.27) при замене КПД (брутто) $\eta_{эл}^{бр}$ и $\eta_T^{бр}$ на КПД (нетто) $\eta_{эл}^{нетто}$ и $\eta_T^{нетто}$. Следует заметить, что сравнение КПД ТЭС $\eta_{эл}^{бр}$ и $\eta_T^{бр}$, определяемых в соответствии с формулами (10.21) и (10.22), необходимо осуществлять при одинаковых значениях отпускаемых тепловой и электрической энергий, т.е.: $G_{Э1} = G_{Э2}$ и $G_{Т1} = G_{Т2}$.

Для характеристики общего использования теплоты ТЭС независимо от способа производства электроэнергии служит коэффициент теплоиспользования или общий КПД $\eta_{ТЭС}^{бр}$, рассчитываемый по формуле (10.17). Однако он характеризует лишь балансовую сторону превращения теплоты в дизельной ТЭС и не дает представления об ее термодинамическом совершенстве при производстве электрической и тепловой энергии. Обычно избытки тепловой энергии целесообразно преобразовывать в другие виды энергии (механическую или электрическую), либо накапливать.

Обобщенным показателем работы ТЭС является себестоимость вырабатываемой ею энергии. При обсуждении вопроса об ее оценке пришли к выводу, что платить надо не за энергию, а за эксергию. Для этого целесообразно использовать единицу измерения эксергии «Гиббс» 1Ги = 1 Дж эксергии. Это может существенно упростить расчеты, что видно на примере тарифов на водяной пар, различных для паров высокого и низкого давления. В связи с этим, составляются таблицы тарифов для различных давлений пара, а при оплате за эксергию таблицы не требуются, т.к. по мере снижения давления и температуры пара его эксергия снижается. Поэтому плата за горячую воду приводится в соответствии величиной ее эксергии. Это стимулирует ее сохранение, т.к. в отличие от энергии, эксергия уменьшается и может исчезнуть бесследно. Большинство ведущих зарубежных фирм ввели эксергетический анализ в качестве составной энергочасти проектов. Приведенный выше балансово-

энергетический анализ мини-ТЭС основан на представлении о равноценности всех видов энергии (электрической, тепловой и т.д.), поэтому при вычислении коэффициента использования энергии ТЭС вырабатываемая электроэнергия суммируется с теплотой, что с точки зрения энергетического подхода некорректно.

Ниже мы рассмотрим методы эксергетического анализа эффективности ТЭС, при котором выделяют три уровня:

- на первом уровне определяют потери эксергии от необратимости процессов во всех энергетических элементах ТЭС и причины, вызывающие эту необратимость;
- на втором уровне определяют эксергетические коэффициенты отдельных элементов ТЭС, оценивая достоинства и недостатки ее отдельных узлов;
- на третьем уровне выявляют взаимосвязи и взаимодействия элементов ТЭС и осуществляют термодинамическую оптимизацию ее структуры на основе варьирования исходными параметрами или структурой для достижения максимального эксергетического КПД.

Эксергетические методы исследования эффективности ТЭС на основе эксергетического баланса

В настоящее время разработаны энергетические и эксергетические методы оценки совершенства технологических процессов получения тепла и электричества, вырабатываемых ТЭС. Так при оценке эффективности работы дизельных двигателей мини-ТЭС (т.е. процессов преобразования в них теплоты сгорания топлива в полезную работу) в целях более объективной оценки используют энергетический и эксергетический балансы (рис. 10.2). На основе вышеизложенного анализа тепловых потерь в дизельном двигателе (рис. 10.3) можно рассмотреть энергетический баланс по внешнему контуру (воздух – отработавшие газы) комбинированного двигателя (в общем случае – двигателя с турбонаддувом и охлаждением наддувочного воздуха), производящего эффективную работу L_e . Его энергетический баланс можно представить в обобщенном виде:

$$H_o + Q_o = L_e + L_{мд} + H_{то} + Q_{ох} + Q_w, \quad (10.29)$$

где H_o – энтальпия рабочего тела, на входе в двигатель (во впускной коллектор, в компрессор турбокомпрессора), кДж; $H_{то}$ – энтальпия рабочего тела, поступающего в окружающую среду, кДж; Q_o – теплота, выделившаяся при сгорании топлива, кДж; $Q_{ох}$ – теплота, отведенная от рабочего тела в охладителе воздуха, кДж; Q_w – теплота, переданная от рабочих газов в стенки цилиндра, кДж; $L_{мд}$ – работа, затрачиваемая на привод механизмов двигателя, кДж.

Глава 12. Системы пуска и прогрева дизельных двигателей электроагрегатов

12.1. Сопротивление прокручиванию дизельных двигателей при пуске

Для пуска дизельного двигателя необходимо прокручивать коленчатый вал с частотой вращения около $n_{\min}=100\text{--}300$ мин⁻¹, что позволяет создать необходимые параметры всасываемого в цилиндры воздушного заряда и требуемые давления впрыскивания топлива. Такой режим называется пусковым режимом двигателя.

При определении пусковой частоты вращения коленчатого вала основным параметром является сопротивление прокручиванию двигателя. Суммарное сопротивление движению деталей и механизмов при пуске двигателя принято оценивать величиной среднего момента сопротивления прокручиванию, зависящей от вязкости моторного масла, площади поверхностей трения, частоты вращения и неравномерности вращения коленчатого вала, а также потерь рабочего тепла в процессах сжатия-расширения.

Сопротивление прокручиванию двигателей с различным числом и объемом цилиндров оценивают по величине среднего давления трения, определяемой по формуле

$$P_T = \frac{1,257M_c}{V_h}, \quad (12.1)$$

где P_T – среднее давление трения [кг/см² (МПа)]; M_c – средний момент сопротивления прокручиванию дизельного двигателя [кг·м (Н·м)]; V_h – рабочий объем цилиндров [л]. Согласно ОСТ 37.001.052-75 «Автомобили и автомобильные двигатели. Требования к пусковым качествам. Нормы для проектирования» для автомобильных дизельных двигателей с геометрической степенью сжатия $\varepsilon_r=17$ при прокручивании коленчатого вала с частотой вращения $n=100$ мин⁻¹ на масле с вязкостью $\nu_m=4000$ сСт (при -12°C) средние давления трения не должны превышать $P_T=4,75$ кгс/см² (0,475 МПа) – при числе цилиндров $i=4$ и менее, $P_T=4,25$ кгс/см² (0,425 МПа) – при $i=6$, $P_T=3,85$ кгс/см² (0,385 МПа) – при $i=8$ и более.

Расчет момента сопротивления прокручиванию дизельного двигателя M_c на стадии проектирования проводится по следующим эмпирическим формулам:

- при числе цилиндров четыре и менее:

$$M_c = 0,875V_h \cdot i \cdot \left(0,24 + 0,033 \frac{n}{100} \right) \gamma^{0,37} \quad (12.2)$$

- при числе цилиндров шесть:

$$M_c = 0,875V_h \cdot i \cdot \left(0,10 + 0,033 \frac{n}{100} \right) \gamma^{0,41}, \quad (12.3)$$

- при числе цилиндров восемь и более:

$$M_c = 0,875V_h \cdot i \cdot \left(0,11 + 0,022 \frac{n}{100} \right) \gamma^{0,39}, \quad (12.4)$$

где i – число цилиндров; n – частота вращения коленчатого вала дизельного двигателя при прокручивании [мин⁻¹]; γ – вязкость моторного масла [сСт].

Разброс значений моментов сопротивления M_c конструктивно подобных дизельных двигателей определяется технологическим уровнем производства и колебаниями величины геометрической степени сжатия ε_r . Увеличение ε_r на единицу приводит к росту среднего M_c дизельного двигателя на 2–4%. Моменты сопротивления прокручиванию дизельных двигателей электроагрегатов и электростанций приведены в табл. 12.1.

Таблица 12.1. Моменты сопротивления прокручиванию дизельных двигателей.

№ п/п	Тип дизельного двигателя	Момент сопротивления прокручиванию M_c [кг·м (Н·м)] при вязкости масла $\nu_m=3000\text{--}3500$ сСт и частоте прокручивания коленчатого вала n [мин ⁻¹]	
		$n=100$	$n=1500$
1	Д-21 А	$M_c=8\text{--}10$ (78-98)	$M_c=9\text{--}10$ (88-98)
2	Д-144	16-17 (157-167)	17-18 (167-176)
3	Д-65 А-П	17-18 (167-176)	18-19 (176-186)
4	А-41	25-27 (245-265)	26-28 (255-274)
5	А-01 МЕ	29-30 (284-294)	30-31 (294-304)
6	ЯМЗ-236 и	26-27 (255-265)	17-27 (265-274)
7	ЯМЗ-238 им2	30-32 (294-313)	34-36 (332-352)
8	Д-160.О	42-46 (412-451)	45-49 (441-480)

Снижение моментов сопротивления прокручиванию коленчатого вала дизельного двигателя может быть достигнуто применением загущенных моторных масел, обладающих лучшими вязкостно-температурными характеристиками.

12.2. Пусковые качества дизельных двигателей

Рабочий процесс дизельного двигателя при пуске по сравнению с номинальным режимом имеет ряд особенностей. На пусковых режимах скорость потока воздуха на впуске мала, и запаздывание закрытия впускного клапана после НМТ приводит к обратному выбросу части воздушного