

На правах рукописи

КОПЕИН Алексей Викторович

**ВЫБОР СКОРОСТНОГО РЕЖИМА
ПЕРВИЧНЫХ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ
ГИБРИДНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК
С ЦЕЛЬЮ УЛУЧШЕНИЯ ИХ ЭКОЛОГИЧЕСКИХ
ХАРАКТЕРИСТИК**

05.04.02 - Тепловые двигатели

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Барнаул-2008

Работа выполнена в Открытом акционерном обществе
«Научно-исследовательский институт автотракторной техники»

Научный руководитель:	доктор технических наук, профессор Кукис Владимир Самойлович
Научный консультант	кандидат технических наук, доцент Малоземов Андрей Адиевич
Официальные оппоненты:	доктор технических наук, профессор Юр Геннадий Сергеевич
	кандидат технических наук, доцент Кулманаков Сергей Павлович
Ведущая организация	НПК "Агродизель" (г. Москва)

Защита состоится 28 ноября 2008 г. в 13 часов на заседании диссертационного совета Д 212.004.03 при Алтайском государственном техническом университете им. И.И. Ползунова по адресу: 656038 г. Барнаул, пр. им. В.И. Ленина, 46 (тел/факс (3852) 26 05 16; E-mail: D21200403@mail.ru)

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Алтайского государственного технического университета.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета.

Автореферат разослан « » октября 2008 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Малая энергетика России обеспечивает условия жизни и деятельности более 20 млн. граждан, многие виды добывающей промышленности на 70 % ее территории. Основой малой электроэнергетики являются около 50000 энергоустановок на базе двигателей внутреннего сгорания (ДВС), из которых около 47000 дизельные.

В процессе работы первичные дизели энергоустановок непрерывно взаимодействуют с окружающей средой, забирая из нее топливо и кислород воздуха и выбрасывая в нее продукты своей деятельности. Эта ситуация рождает значительное количество экологических проблем, включающих:

- 1) колоссальный расход природного органического топлива и атмосферного кислорода;
- 2) непоправимый вред здоровью человека, зданиям, сооружениям и окружающей природе, наносимый токсичными компонентами отработавших газов;
- 3) выброс углекислого газа;
- 4) тепловое «загрязнение» атмосферы;
- 5) диссипацию эксергии отработавших газов. Кроме того, экологический вред наносят шум и вибрация первичных двигателей.

У классических дизель-электростанций частота тока пропорциональна оборотам коленчатого вала первичного двигателя, и вопросы выбора скоростного режима, обеспечивающего хорошие экологические показатели, ранее даже не обсуждались, так как эти устройства отличаются высокой стоимостью, и до последнего времени двигатель-генераторы с переменной частотой вращения промышленностью не выпускались. Однако в связи с бурным развитием нетрадиционной энергетики (в частности ветроэнергетики) реализация данного технического решения стала экономически целесообразной, так как в состав ветроэлектростанции уже должно входить устройство стабилизирующее частоту тока и другие электрические параметры.

Специфика функционирования ДВС в составе энергоустановок позволяет значительно уменьшить их вредное воздействие на окружающую среду путем подбора эффективных скоростных и нагрузочных режимов, не изменяя конструкции двигателя.

В связи с тем, что выбор эффективного скоростного режима первичного двигателя является новым направлением, в настоящее время недоста-

точно глубоко проработана его научная основа, отсутствуют оценка возможного снижения экологических характеристик и результаты экспериментальных исследований, подтверждающих возможность реализации и эффективности предложенного технического решения. Сказанное затрудняет дальнейшее развитие гибридных энергоустановок и выбор оптимальных, с точки зрения экологии, режимов работы первичного двигателя.

Цель настоящего исследования: Оценить влияние скоростного режима первичных дизельных двигателей гибридных энергетических установок на их экологические характеристики и дать рекомендации по выбору целесообразного скоростного режима работы дизелей ОАО «ПО Алтайский моторный завод».

Задачи исследования:

1. Проанализировать особенности функционирования первичного дизеля в составе гибридной энергоустановки.

2. Обосновать выбор математической модели рабочих процессов поршневого ДВС, отражающей особенности его функционирования в составе гибридных энергоустановок с точки зрения токсичности его отработавших газов.

3. Расчетно-теоретически и экспериментально оценить влияние частоты вращения коленчатого вала и других факторов на экологические характеристики первичного дизеля, а также на показатели его топливной экономичности и надежности. Оценить адекватность использованной математической модели.

4. Выбрать и обосновать целесообразные режимы работы первичного двигателя гибридных энергоустановок с точки зрения экологических характеристик, надежности и стоимости владения.

5. Дать экономическую оценку влияния частоты вращения коленчатого вала и других факторов на экологические характеристики первичных дизелей ОАО «ПО Алтайский моторный завод» для гибридных энергоустановок.

Объект исследования: рабочий процесс в первичных дизелях ОАО «ПО Алтайский моторный завод» размерностью 13/14 различного конструктивного исполнения.

Выбор дизелей обусловлен тем, что они широко используются для привода энергоустановок мощностью 60-100 кВт, номенклатура двигателей включает модификации с наддувом (в том числе с ОНВ) и без наддува с различным числом цилиндров и уровнем форсирования, что позволяет распространить результаты исследования на дизели различных конструктивных исполнений.

Предмет исследования: процессы, формирующие экологические характеристики первичного дизеля гибридной энергоустановки, и зависи-

мость этих характеристик от его скоростного режима, конструктивных и регулировочных параметров.

Научная новизна. В диссертации:

1. Теоретически обоснован выбор целесообразного скоростного режима работы первичного дизеля энергетической установки с точки зрения улучшения его экологических характеристик.

2. Получены экспериментальные результаты, отражающие влияние частоты вращения коленчатого вала и других факторов на экологические характеристики первичного дизеля гибридной энергоустановки, в том числе впервые определено содержание твердых частиц в отработавших газах дизелей ОАО «ПО Алтайский моторный завод» размерностью 13/14 гравиметрическим методом.

Практическая ценность. Результаты исследования могут быть использованы при разработке и создании гибридных энергоустановок и их систем, модификаций первичных дизелей, предназначенных для работы в составе гибридных энергоустановок, модернизации существующих ДВС-электростанций по параметрам выбросов вредных веществ с отработавшими газами, при проведении НИОКР, в учебном процессе.

Реализация результатов работы. Материалы диссертации используются и внедрены: ОАО РАО «ЕЭС России» и входившими в его состав ОАО «Научно-исследовательский институт энергетических систем» и НПЦ «Малой энергетики» (г. Москва) - при разработке и проведении полевых испытаний гибридной энергоустановки на базе ветроэлектростанции «Заполярная» (г. Воркута); ОАО «ПО Алтайский моторный завод» (г. Барнаул) - при доводке продукции по экологическим показателям и разработке модификаций дизелей для энергоустановок; НП «Сертификационный центр автотракторной техники» (г. Челябинск) - при проведении испытаний серийной продукции ОАО «ПО Алтайский моторный завод» и разработке рекомендаций по ее доводке по экологическим параметрам.

Апробация работы. Материалы диссертации были доложены и одобрены на заседаниях НТС ОАО «НИИ автотракторной техники» (г. Челябинск, 2006, 2007, 2008); научном семинаре НТС НП «Агродизель» (г. Москва, 2007, 2008); IV межрегиональной научно-технической конференции «Многоцелевые гусеничные машины (Броня-2008)» (г. Омск, 2008); научно-технической конференции «Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин» (г. Челябинск, 2008); на Международной научно-технической конференции «Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей» (г. Санкт-Петербург, 2008).

Публикации. По теме диссертации опубликовано десять печатных работ, в том числе *три* работы в изданиях, рекомендованных ВАК.

Объем и содержание работы. Диссертация содержит 153 с. текста, 68 рисунков, 12 таблиц и состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы, включающего 118 наименований, и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель, сформулированы научная новизна и практическая ценность работы, дана её общая характеристика и изложено краткое содержание.

В первой главе проанализированы актуальные вопросы повышения эффективности методов снижения токсичности отработавших газов дизельных двигателей. Приведены требования нормативно-технических документов к выбросам вредных веществ. Показаны причины образования токсичных веществ в рабочем процессе дизеля. Выполнен анализ мероприятий по снижению выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей с учетом особенностей их функционирования в составе энергетических установок. Приведено описание основных конструктивных особенностей многофункциональных энергетических комплексов на базе двигатель-генераторов с переменной частотой вращения и внешних возобновляемых источников энергии. Сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе выполнен обзор математических моделей рабочего цикла поршневых ДВС, химической кинетики горения углеводородных топлив, предложенных научными школами ЦНИДИ, С.Пб. политехнического университета, МГТУ, ХПИ, АлтГТУ, зарубежных источников и анализ возможности их применения для оценки образования токсичных веществ в камере сгорания первичного дизеля гибридной энергоустановки. Предложено использование математической модели на основе системы дифференциальных уравнений массового и энергетического балансов рабочего тела и химического механизма горения углеводородов «Kilpinen-97». Расчетom установлено, что кинетика образования вредных веществ зависит от скорости нарастания температуры газов в камере сгорания (рис. 1).

Эти данные были использованы для расчетно-теоретической оценки концентрации токсичных веществ в отработавших газах первичных дизелей АМЗ с газотурбинным наддувом и без него. Результаты расчета показали, что увеличение скорости изменения температуры рабочего тела (соответствующее снижению частоты вращения коленчатого вала от номинальной до максимального крутящего момента) приводит к увеличению выбросов NO_x в 1,5-2 раза (рис. 2). Для других токсичных веществ зависимость выбросов от частоты вращения коленчатого вала не является столь однозначной (см., например, рис. 3).

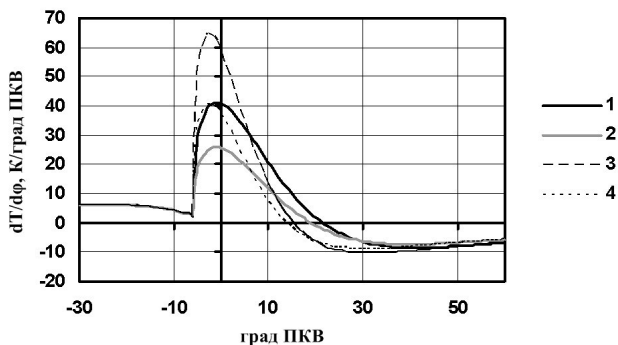


Рис. 1. Скорость изменения температуры рабочего тела в камере сгорания дизеля ОАО «ПО АМЗ» (результаты расчета):

- 1 – без наддува, при 1500 мин⁻¹; 2 – с наддувом, при 1500 мин⁻¹;
- 3 – без наддува, при 1000 мин⁻¹; 4 – с наддувом, при 1000 мин⁻¹

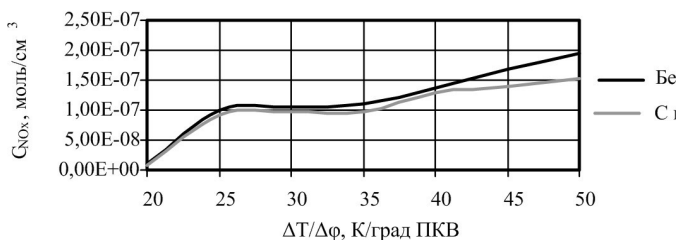


Рис. 2. Концентрация оксидов азота в момент времени τ при различных скоростях изменения температуры рабочего тела (температура воздушного заряда $T_0=1000$ K)

Расчет рабочего цикла подтвердил возможность снижения удельного расхода топлива и, соответственно, расхода воздуха, выбросов углекислого газа, теплового загрязнения атмосферы для первичных дизелей с переменной частотой вращения коленчатого вала (рис. 4).

Предложенная, на основе уравнения Костина, формула:

$$T' = T \cdot \frac{P_z}{P_z'} \cdot \left(\frac{n}{n'} \right)^{1.5} \cdot \left(\frac{T_k}{T_k'} \right)^{0.88} \cdot \left(\frac{\eta_v' \cdot P_k'}{\eta_v \cdot P_k} \right)^{0.38}, \quad (1)$$

позволила выполнить оценку относительного изменения ресурса первичного дизеля гибридной энергоустановки (рис. 5).

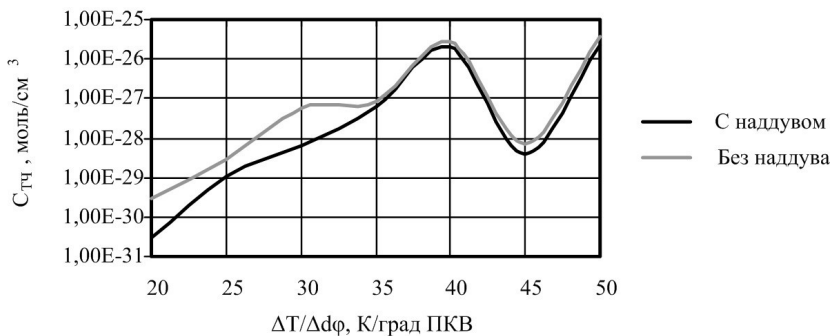


Рис. 3. Концентрация твердых частиц в момент времени $\tau=8$ мс при различных скоростях изменения температуры рабочего тела (температура воздушного заряда $T_0=1000$ К)

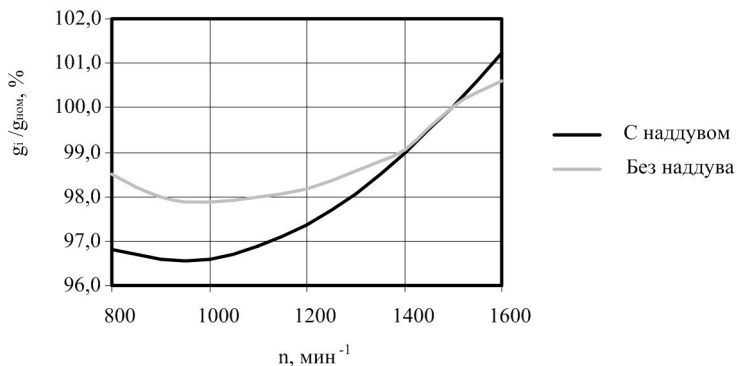


Рис. 4. Зависимость индикаторного удельного расхода топлива (% от номинального значения) от частоты вращения коленчатого вала первичного дизеля энергоустановки ($N_{e_{цил}}=const=12$ кВт)

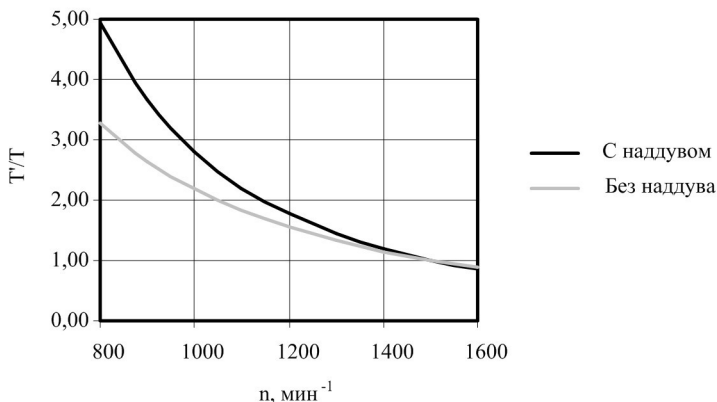


Рис. 5. Зависимость показателя ресурса от частоты вращения коленчатого вала первичного дизеля энергоустановки

В целом, расчетно-теоретические исследования подтвердили целесообразность снижения скоростного режима первичного дизеля с целью улучшения его экологических характеристик и показали, что необходимы дополнительные экспериментальные исследования по оценке влияния частоты вращения коленчатого вала первичных дизелей ОАО «ПО АМЗ» на выбросы токсичных веществ с отработавшими газами.

В **третьей** главе приведены результаты экспериментальных исследований выбросов токсичных веществ с отработавшими газами гибридных энергоустановок. Объектами экспериментального исследования были дизели типа 4С13/14 (А-41), 4СН13/14 (Д-442 и Д-3047), 6С13/14 (А-01), 6СН13/14 (Д-461) производства ОАО «ПО Алтайский моторный завод».

Испытания, с учетом того, что дизели могут быть отнесены к категории конвертируемых, проводились по методикам ГОСТ 18509, ГОСТ 17.2.2.05 и ГОСТ Р 41.96. Для определения содержания твердых частиц в отработавших газах использовался гравиметрический метод. Суть метода заключается в пропускании разбавленных в определенной пропорции отработавших газов через стекловолоконный фильтр с фторуглеродным покрытием или фильтр с фторуглеродной основой мембранного типа, который взвешивается до и после эксперимента.

Испытательный комплекс для определения выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей различных типов включает в себя разбавительный туннель МТ-120, разработанный институтом TUV-UVMV (Чехия), систему пробоотбора на нагрузочном стенде, весы «Mettler Toledo» AX26DR

для взвешивания фильтров (в климатической камере на виброизолирующем фундаменте, имеющие точность – 2 мкг), фильтры – «Pall Flex».

Зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах дизелей ОАО «ПО Алтайский моторный завод» представлена на рис. 6.

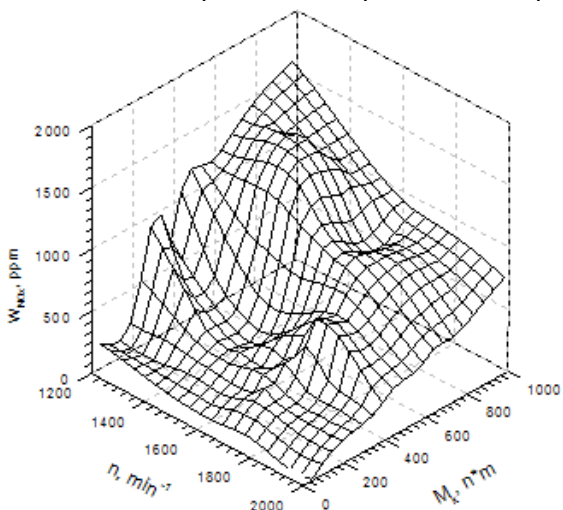


Рис. 6. Зависимость концентрации оксидов азота в отработавших газах дизелей ОАО «ПО Алтайский моторный завод» от частоты вращения коленчатого вала и крутящего момента

Уменьшение частоты вращения коленчатого вала при сохранении требуемой мощности приводит к увеличению концентрации оксидов азота в отработавших газах примерно в 1,5-2 раза, что полностью соответствует результатам расчетно-теоретической части исследования.

Регрессионная зависимость выбросов оксидов азота от основных параметров, характеризующих рабочий цикл дизеля, имеет вид:

$$W_{NOx} = 0,181 \cdot n + 2,94 \cdot M_{кр} - 49,3 \cdot G_T - 0,451 \cdot G_B + 141,62, \dots \dots \dots (2)$$

где W_{NOx} – концентрация оксидов азота в отработавших газах, ppm;
 n – частота вращения коленчатого вала, мин⁻¹; $M_{кр}$ – крутящий момент, Н·м;
 G_T – расход топлива, кг/ч; G_B – расход воздуха, кг/ч.

Анализ данных по выбросам других вредных веществ показывает, что наиболее целесообразно снижение частоты вращения коленчатого вала первичных двигателей А-01 (6Ч13/14) и Д-3047, для которых (в зависимости от режима нагружения) выбросы оксида углерода уменьшаются на

10-50 %, углеводов – на 10-20 %, твердых (дисперсных) частиц – в 1,5-4 раза (рис. 7).

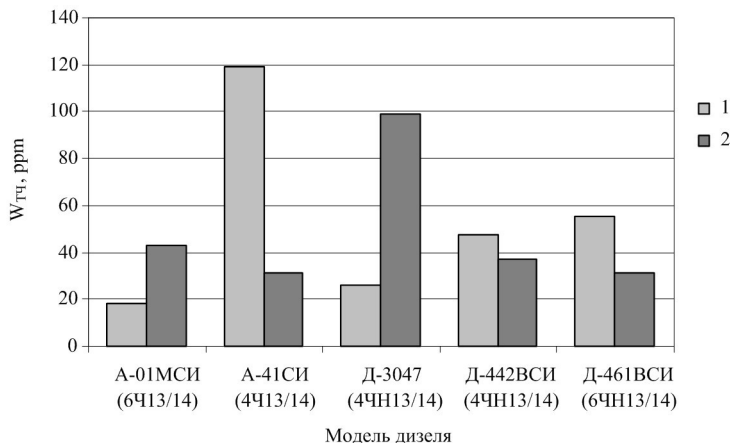


Рис. 7. Средние значения выбросов твердых частиц с отработавшими газами дизелей АМЗ при пониженной (1) и номинальной (2) частоте вращения коленчатого вала

В результате, с учетом того, что токсичность твердых частиц в два раза выше, чем оксидов азота, суммарный показатель токсичности уменьшается. Для остальных двигателей суммарный показатель токсичности выбросов увеличивается.

Оптимальная, с точки зрения топливной экономичности, взаимосвязь между частотой вращения коленчатого вала и нагрузкой первичного двигателя в составе гибридной энергоустановки может быть аппроксимирована формулой:

$$n = n_{x.x.} + \frac{n_{nom} - n_{Mк}}{N_{e nom} - N_{e Mк}} \cdot N_e, \quad (3)$$

где $n_{x.x.}$ – частота вращения холостого хода, n_{nom} , $N_{e nom}$ – номинальные значения частоты вращения коленчатого вала и эффективной мощности, $n_{Mк}$, $N_{e Mк}$ – частота вращения коленчатого вала и эффективная мощности при максимальном крутящем моменте дизеля.

На рис. 8 показано, что экономия топлива (Δg_e) при работе двигателя по оптимальной характеристике может достичь 15 % при нагрузке менее 25 % от номинальной.

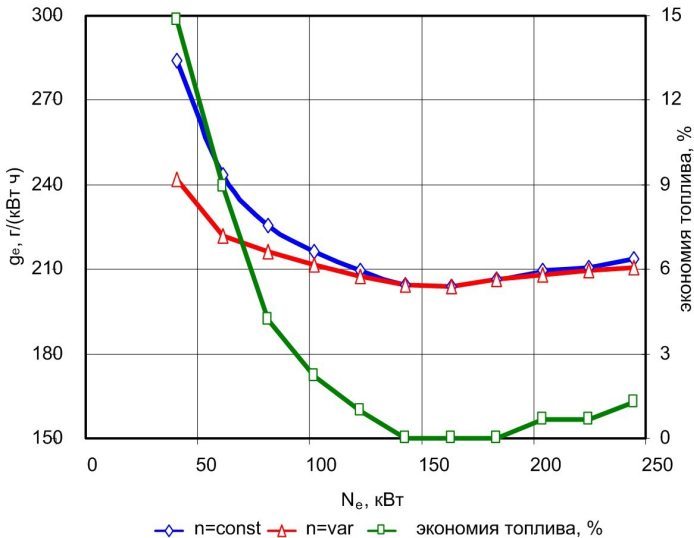


Рис. 8. Потенциальная экономия топлива в случае работы двигателя 6Ч-Н13/14 при оптимальной, с точки зрения минимизации удельного эффективного расхода топлива, взаимосвязи между частотой вращения коленчатого вала и нагрузкой первичного двигателя в составе гибридной энергоустановки

В четвертой главе выполнена оценка эффективности влияния скоростного режима первичных дизельных двигателей гибридных энергетических установок на их экологические характеристики, которые определяются изменением: токсичности их отработавших газов; расхода природного органического топлива и атмосферного кислорода; выбросов в атмосферу углекислого газа; теплового «загрязнения» атмосферы; диссипации эксергии отработавших газов, выбрасываемых в атмосферу.

Этот эффект складывается из двух составляющих - экономической (которая может быть оценена количественно в денежном выражении) и социальной (которая является не менее важной, но может быть оценена только в относительной форме). В денежном выражении был оценен эффект от снижения токсичности отработавших газов дизеля и от расхода природного органического топлива. В относительной форме - эффект изменения остальных составляющих. Материалы анализа оценки эффективности влияния скоростного режима первичных дизельных двигателей ги-

бридных энергетических установок на их экологические характеристики приведены в основных результатах работы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В ходе выполнения диссертационного исследования:

Проведен анализ особенностей функционирования первичного дизеля в составе гибридной энергоустановки.

Обоснован выбор математической модели рабочих процессов поршневого ДВС, отражающей особенности его функционирования в качестве первичного двигателя гибридных энергоустановок, с учетом кинетического механизма окисления углеводородных топлив и синтеза оксидов азота. Адекватность математической модели подтверждена экспериментально.

Выполнена расчетно-теоретическая и экспериментальная оценка (в стендовых условиях) влияния частоты вращения коленчатого вала и других факторов на экологические характеристики первичного дизеля, а также его надежность.

Дана экономическая оценка влияния скоростного режима первичных дизельных двигателей гибридных энергоустановок на их экологические характеристики.

В результате настоящего исследования подтверждена выдвинутая гипотеза о том, что улучшение экологических характеристик первичных дизельных двигателей гибридных энергоустановок может быть достигнуто выбором целесообразного скоростного режима их работы и установлено следующее:

1. При снижении частоты вращения коленчатого вала в 1,2-1,5 раза по отношению к номинальным и уменьшении нагрузки (p_e) энергоустановки:

- выбросы оксида углерода дизелей Д-3047 уменьшаются в 1,5-4 раза, А-41 и Д-461 - на 20-30 %; выбросы дизелей А-01 и Д-442 при коэффициенте нагрузки 0,5 снижаются до 30 %, при коэффициенте нагрузки 0,75 увеличиваются на 10-80 %; выбросы углеводородов изменяются мало (± 20 %);

- выбросы оксидов азота дизелями ОАО «ПО АМЗ» в среднем увеличиваются в 1,7-2,0 раза;

- выбросы твердых частиц (наиболее токсичных компонентов отработавших газов) для дизелей А-01 и Д-3047 уменьшаются в 3-4 раза. Для двигателей А-41, Д-461 и Д-442 снижение частоты вращения приводит к увеличению выбросов твердых частиц.

Топливная экономичность при снижении частоты вращения коленчатого вала в 1,2-1,5 раза по отношению к номинальным улучшается, при этом максимальная экономия топлива может составить до 25 %, при коэф-

эффициенте загрузки 0,25 экономия топлива для дизелей ОАО «ПО АМЗ» составляет 15 %.

3. Ресурс первичного дизеля при уменьшении частоты вращения в 1,2-1,5 раза (по результатам расчета) может быть увеличен практически в 2,2-2,8 раза.

4. Оптимальной, с точки зрения топливной экономичности, режимом работы первичных двигателей ОАО «ПО АМЗ» является работа по характеристике представленной формулой (3).

5. При использовании двигатель-генератора мощностью 100 кВт в составе гибридной энергоустановки, где преобразователь частоты уже входит в ее состав, абсолютная величина годового экономического эффекта для дизелей АМЗ в среднем составляет 150-330 и 750-1100 тыс. руб. при коэффициентах загрузки 0,75 и 0,50 соответственно.

При автономном использовании, преобразователь частоты окупается за 6,1 и 0,8 года, соответственно (при расчетном сроке непрерывной эксплуатации не менее 10 лет).

Социальный эффект составляет в среднем по расходу атмосферного воздуха 20-47 и 25-60 %, по выбросам углекислого газа 21-29 и 37-50 %, по тепловому «загрязнению» 27-47 и 48-57 %, по диссипации эксергии 27-52 и 49-70 % при коэффициентах загрузки 0,75 и 0,50 соответственно.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Копеин А.В. Влияние давления впрыскивания топлива и величины степени сжатия на выбросы вредных веществ с отработавшими газами / А.В. Копеин // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: научный вестник. - Вып. 18. - Челябинск: ЧВВАКИУ, 2006. - С. 115-117.

2. Копеин А.В. Расчетно-теоретическое исследование химической кинетики предпламенных процессов в поршневых ДВС на различных видах топлива газами / А.В. Копеин // Методические рекомендации по ремонту бронетанкового вооружения и техники и автомобильной техники. - №132-С.Пб.: 29 НКТЦ, 2006. - С. 12-17.

3. Копеин А.В. Сравнительный анализ технического уровня тракторных дизелей отечественного и зарубежного производства / А.В. Копеин // Методические рекомендации по ремонту бронетанкового вооружения и техники и автомобильной техники. - №136 - С.Пб.: 29 НКТЦ, 2007. - С. 6-10.

4. Копеин А.В. Вредные вещества в отработавших газах дизелей / А.В. Копеин // Повышение эффективности силовых установок колесных и

гусеничных машин: научный вестник. - Вып. 19. - Челябинск: ЧВВАКИУ, 2007. - С. 94-101.

5. Копеин А.В. Расчетная оценка пределов форсирования дизелей с учетом требований к выбросам вредных веществ с отработавшими газами / А.В. Копеин, В.С. Кукис, А.А. Малоземов // Улучшение эксплуатационных показателей автомобилей, тракторов и двигателей: материалы Международной научно-технической конф. (22-23 марта 2008). С.Пб: Изд-во СПбГАУ, 2008. - С. 66-71.

6. Копеин А.В. Оценка выбросов вредных веществ с отработавшими газами дизелей на стадии проектирования / А.В. Копеин, А.А. Малоземов // Вестник академии военных наук. - № 3 (24). - 2008. - С. 106 - 110.

7. Малоземов А.А. Оценка токсичности отработавших газов дизелей одного типоразмера с использованием регрессионных зависимостей / А.А. Малоземов, В.Н. Бондарь, А.В. Копеин // Вестник ЮУрГУ. - №23. - Вып.12. - Серия «Машиностроение». - Челябинск, 2008. - С. 81-85.

8. Босяков В.П. Исследование влияния различных факторов на образование твердых частиц в цилиндре дизеля А-01МСИ / В.П. Босяков, А.В. Копеин // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. - Челябинск: ЧВВАКИУ, 2008. - С. 31-34.

9. Копеин А.В. Повышение топливной экономичности первичного дизеля энергоустановки оптимизацией скоростного режима 01МСИ / А.В. Копеин, А.А. Малоземов, О.А., Алешков // Повышение эффективности силовых установок колесных и гусеничных машин: материалы научно-технической конференции, посвященной 40-летию кафедры двигателей. - Челябинск: ЧВВАКИУ, 2008. - С. 60-65.

10. Малоземов А.А. Повышение эффективности энергоустановок оптимизацией скоростного режима первичных дизелей в их составе / А.А. Малоземов, А.В. Копеин, О.А. Алешков // Двигателестроение - № 4 - 2008.