

Безуглеродные и низкоуглеродные газомоторные топлива для тепловозных дизельных двигателей

Под редакцией В.А. Маркова



Москва

ИЗДАТЕЛЬСТВО
МГТУ им. Н.Э. Баумана
2 0 2 6

УДК 621.436; 681.51
ББК 31.51
Б39

Издание доступно в электронном виде по адресу
<https://press.bmstu.ru/catalog/item/8618/>

Авторы:

*А.С. Кулешов, А.А. Кулешов, В.А. Марков,
С.В. Плахов, В.В. Фурман, М.И. Шленов*

Рецензент

*д-р техн. наук, профессор кафедры «Тракторы и автомобили» Российского
государственного агроинженерного университета Московской
сельскохозяйственной академии им. К.А. Тимирязева
(РГАУ – МСХА им. К.А. Тимирязева) С.Н. Деянин*

**Б39 Безуглеродные и низкоуглеродные газомоторные топлива для тепловозных
дизельных двигателей** : монография / под ред. В. А. Маркова. — Москва :
Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2026. — 171, [5] с. : ил.

ISBN 978-5-7038-6574-3

Рассмотрены тенденции развития мирового и российского топливно-энергетического комплекса и проведен анализ перспектив использования безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив. Представлены виды топлив, их физико-химические свойства и технологии получения; исследованы проблемы улучшения экологических показателей двигателей при использовании этих топлив: проанализированы особенности рабочих процессов двигателей и возможности их совершенствования, приведены результаты расчетных и экспериментальных исследований двигателей при использовании безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив. Проведен анализ экологических и топливно-экономических показателей этих двигателей.

Для инженерно-технических работников предприятий транспортного машиностроения, организаций, занимающихся разработкой, производством и эксплуатацией дизельных двигателей, а также для студентов вузов, магистров и аспирантов, обучающихся по специальностям «Двигатели внутреннего сгорания», «Автомобили и автомобильное хозяйство», «Инженерная защита окружающей среды (автотранспортный комплекс)».

УДК 621.436; 681.51
ББК 31.51



*Уважаемые читатели! Пожелания, предложения, а также сообщения о замеченных
опечатках и неточностях Издательство просит направлять по электронной почте:
press@bmstu.ru*

ISBN 978-5-7038-6574-3

© Оформление. Издательство
МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2026

Предисловие

В настоящем издании обобщен опыт использования альтернативных безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив в дизельных двигателях. В качестве безуглеродных моторных топлив рассмотрены водород и аммиак, в качестве низкоуглеродного топлива — природный газ. Необходимость применения этих альтернативных топлив обусловлена настоятельной потребностью кардинального улучшения экологических показателей тепловозных двигателей. К этим показателям относятся выбросы в атмосферу основного парникового газа — диоксида углерода, а также выбросы нормируемых токсичных веществ — оксидов азота, монооксида углерода, легких несгоревших углеводородов и твердых частиц. Следует отметить, что использование природного газа позволяет заметно сократить затраты на приобретение моторного топлива.

В отечественной технической литературе проблемам организации работы тепловозных двигателей на указанных альтернативных топливах уделяется недостаточное внимание, практически отсутствует учебная литература по данной тематике. В то же время в разрабатываемых новых учебных программах по подготовке бакалавров и магистров в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в ряде других вузов изложение этих вопросов предусмотрено.

Предлагаемое издание написано на основе комплекса научных исследований, проведенных авторами в МГТУ им. Н.Э. Баумана и в других организациях. Представленный материал изложен в соответствии с лекционными курсами «Теория рабочих процессов ДВС», «Системы поршневых и комбинированных двигателей» и «Управление в технических системах», читаемыми авторами.

Принятые сокращения

ВИЭ	—	возобновляемые источники энергии
ВМТ	—	верхняя мертвая точка
ДВС	—	двигатель внутреннего сгорания
ДГУ	—	дизель-генераторная установка
ДТ	—	дизельное топливо
КМ	—	контроллер машиниста
КПГ	—	сжатый природный газ
КПД	—	коэффициент полезного действия
КПК	—	клапан продувки коллектора
КПО	—	камера постоянного объема
КС	—	камера сгорания
МЭСМ	—	метилловый эфир соевого масла
НМТ	—	нижняя мертвая точка
ОГ	—	отработавшие газы
ОГК	—	отсечной газовый клапан
ОНВ	—	охладитель наддувочного воздуха
ОЧ	—	октановое число
ПАУ	—	полициклические ароматические углеводороды
ПГ	—	природный газ
ПДК	—	предельно допустимая концентрация
ПЗВ	—	период задержки воспламенения
ПИД	—	пропорционально-интегрально-дифференциальный (закон)
ПК	—	программный комплекс
п.к.в.	—	поворот коленчатого вала (двигателя)
САР	—	система автоматического регулирования
САУ	—	система автоматического управления
СПГ	—	сжиженный природный газ
ТБО	—	твердые бытовые отходы
ТГ	—	топливный газ
ТНВД	—	топливный насос высокого давления
ТЧ	—	твердые частицы
ПЗВ	—	период задержки воспламенения
УОВТ	—	угол опережения впрыскивания топлива
хх	—	холостой ход
ЦЧ	—	цетановое число
ЭГК	—	электрогидравлический клапан

Основные обозначения

C	—	сажа
C	—	объемная концентрация
CH_x	—	углеводороды
CO	—	монооксид углерода
CO_2	—	диоксид углерода
$dq/d\varphi$	—	скорость тепловыделения
e	—	удельный массовый выброс
G	—	часовой расход
G_T	—	расход топлива
G_B	—	расход воздуха
g_e	—	удельный эффективный расход топлива
H_U	—	низшая теплота сгорания топлива
K_X	—	дымность по шкале Хартриджа
LW	—	интеграл Ливенгуда — B_u
M_d	—	крутящий момент на валу двигателя
N_e	—	эффективная мощность двигателя
NH_3	—	аммиак
NO_x	—	оксиды азота
n	—	частота вращения коленчатого вала двигателя
p_k	—	давление наддувочного воздуха
p_z	—	максимальное давление сгорания
ppm (лат. parts per million — миллионная доля) — единица измерения массовой концентрации (1 ppm = 0,0001 %)		
q	—	подача
q_u	—	цикловая подача
$V_{впр}$	—	скорость впрыскивания
α	—	коэффициент избытка воздуха
ε	—	степень сжатия; энергетическая доля вещества в общей подаче топлива
η_e	—	эффективный КПД двигателя
η_i	—	индикаторный КПД двигателя
θ	—	угол опережения впрыскивания топлива (см. также УОВТ)
π_k	—	степень повышения давления в компрессоре
ρ	—	плотность
δ	—	абсолютная доля топлива в каждой из зон в камере сгорания
τ_i	—	период задержки воспламенения (см. также ПЗВ)
φ	—	угол поворота коленчатого вала

Введение

Актуальной проблемой современного двигателестроения остается обеспечение наилучших показателей токсичности отработавших газов двигателей внутреннего сгорания и их топливной экономичности. Среди двигателей различного назначения необходимо выделить дизельные двигатели, устанавливаемые на тепловозы. Тепловозные двигатели вырабатывают около 16 % всей энергии, производимой двигателями внутреннего сгорания, которые эксплуатируются в России. Они потребляют более 12 млн т дизельного топлива в год и выбрасывают в атмосферу около 2 млн т вредных компонентов отработавших газов. В связи с этим в Стратегии развития железнодорожного транспорта в Российской Федерации до 2030 года предусмотрены реализация мероприятий по повышению энергоэффективности и экологической безопасности грузовых и пассажирских перевозок, модернизация уже эксплуатируемых тепловозов и создание новых тепловозов с усовершенствованными энергетическими установками.

Одним из наиболее перспективных направлений реализации этой Стратегии является более широкое использование в тепловозных дизельных двигателях безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив. Перевод двигателей на такие топлива кардинально улучшает экологические показатели тепловозных двигателей — снижает выбросы в атмосферу вредных веществ с отработавшими газами. Применение этих топлив также позволит уменьшить зависимость железнодорожного транспорта от поставок нефтяного дизельного топлива, особенно в удаленных районах Российской Федерации, улучшить снабжение различными моторными топливами подвижного состава российских железных дорог, сократить эксплуатационный расход моторного топлива на железнодорожном транспорте.

В монографии рассмотрены тенденции развития топливно-энергетического комплекса и проанализированы перспективы использования безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив на транспорте, а также экологические показатели дизельных двигателей. Представлены технологии производства водорода и аммиака, особенности организации работы двигателей внутреннего сгорания на указанных газомоторных топливах и на природном газе. Проведены расчетные исследования рабочего процесса тепловозных дизельных двигателей, адаптированных к работе на этих газомоторных топливах. Исследован двухтопливный рабочий процесс — газодизельный цикл, в котором воспламенение рассматриваемых газомоторных топлив происходит от теплоты сгорания легковоспламеняющегося жидкого дизельного топлива.

Описана система электроуправляемой подачи газа и дизельного топлива для двигателей, работающих по газодизельному циклу, разработанная проектно-производственным предприятием ООО «ППП Дизель автоматика» (г. Саратов). Приведены результаты экспериментальных исследований параметров тепловозного газодизельного двигателя с этой системой, работающего на природном газе с запальной дозой дизельного топлива. Исследована возможность сжигания аммиака в двухтопливном цикле с использованием в качестве запального топлива легковоспламеняющегося жидкого метилового эфира соевого масла. Рассмотрена возможность улучшения параметров тепловозного дизельного двигателя с таким циклом на частичных нагрузочных режимах за счет отключения части его цилиндров.

Оглавление

Предисловие	3
Принятые сокращения	4
Основные обозначения	5
Введение	6
Глава 1. Тенденции развития топливно-энергетического комплекса и анализ перспектив использования безуглеродных и низкоуглеродных газомоторных топлив	8
1.1. Экологические показатели дизельных двигателей	8
1.2. Тенденции развития топливно-энергетического комплекса и перехода к безуглеродной энергетике	20
1.3. Технологии производства водорода и аммиака, их хранения и использования в транспортных энергетических установках ...	40
1.4. Организация работы двигателей внутреннего сгорания на водороде и аммиаке	46
Глава 2. Работа тепловозных двигателей на природном газе	55
2.1. Обоснование необходимости использования природного газа в качестве топлива в тепловозных газодизельных двигателях	55
2.2. Расчетные исследования рабочего процесса тепловозного газодизельного двигателя, работающего на природном газе с запальной дозой дизельного топлива	59
2.3. Система электронного управления топливopодачей тепловозного газодизельного двигателя	82
2.4. Экспериментальные исследования рабочего процесса тепловозного газодизельного двигателя, работающего на природном газе с запальной дозой дизельного топлива	91
Глава 3. Работа тепловозных двигателей на водороде	102
3.1. Предпосылки, преимущества и проблемы использования водорода в качестве топлива для тепловозных двигателей	102
3.2. Расчетное исследование параметров тепловозного двигателя, работающего на жидком нефтяном топливе с добавками водорода во впускную систему	109
Глава 4. Работа тепловозных двигателей на аммиаке	127
4.1. Предпосылки, преимущества и проблемы использования аммиака в качестве топлива для тепловозных двигателей	127
4.2. Расчетное исследование параметров тепловозного двигателя, работающего на аммиаке с запальной дозой биотоплива	132
4.3. Расчетное исследование параметров двухтопливного двигателя, работающего на аммиаке на частичных нагрузочных режимах	142
Заключение	151
Литература	152