



ГОСУДАРСТВЕННЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ИНСТИТУТ ФИЗИКИ ВЫСОКИХ ЭНЕРГИЙ

ИФВЭ 98-40
ОРИ

В.Н.Пелешко, П.А.Олисов*

**ВЛИЯНИЕ ПРИМЕНЕНИЯ
ОБОГАЩЕННОГО КИСЛОРОДОМ ВОЗДУХА
НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Направлено в *“Двигателестроение”*

*Турботехника, 142284 Протвино, Россия

Протвино 1998

Аннотация

Пелешко В.Н., Олисов П.А. Влияние применения обогащенного кислородом воздуха на характеристики дизельных двигателей.: Препринт ИФВЭ 98–40. – Протвино, 1998. – 10 с., 7 рис., библиогр.: 13.

В работе приведены результаты расчета характеристик дизельных двигателей в зависимости от содержания кислорода в поступающем в двигатель воздухе. Показано, что при незначительном увеличении содержания кислорода (до 25%) мощность двигателя увеличивается на $\approx 30\%$. При этом экология двигателей значительно улучшается.

Abstract

Peleshko V.N., Olisov P.A. Influence of Oxygen Enriched Air to Diesel Engine Parameters: IHER Preprint 98–40. – Protvino, 1998. – p. 10, figs. 7, refs.: 13.

In this paper diesel engines calculated characteristics are given as a function of oxygen contents in the air. It is shown that engine's power is increased up to 30% with 25% contents of oxygen. Also the ecological parameters of engine are improved significantly.

Введение

В настоящее время разработаны мембранные технологии разделения различных газов для газовых и газожидкостных смесей. Данные технологии дают возможность при малых газодинамических потерях, габаритах и стоимости изменять в небольших пределах состав газовых и газожидкостных смесей, например насыщение воздуха кислородом до 25-45%. Согласно частной информации¹, это может найти применение в следующих областях: портативные и стационарные устройства получения обогащенного кислородом воздуха для медицинских целей, двигатели внутреннего сгорания, устройства беспузырькового внедрения и удаления определенных газов и газожидкостных смесей, химические и биологические установки, промышленное применение кислорода и азота.

Настоящая работа посвящена теоретическому обоснованию применения мембранных технологий для применения обогащенного кислородом воздуха в дизельных двигателях. Исследования были проведены с помощью широко апробированной расчетной программы математического моделирования двигателей внутреннего сгорания [1].

Расчетная модель двигателя внутреннего сгорания

В мировой практике двигателестроения в настоящее время используются различные модели физических процессов, происходящих в двигателе внутреннего сгорания (ДВС). Разработанные модели лежат в диапазоне от полуэмпирических корреляций до детального анализа газодинамики и термодинамики двигателя. В представленной работе использовались математическая модель и расчетная программа [1], относящаяся к классу квазистационарных моделей ДВС. Основным допущением квазистационарности является то, что в каждый фиксированный момент времени течение газов ведет себя так, как если бы оно было стационарным. Основой модели является рассмотрение законов сохранения энергии, массы и состава газов для термодинамического контрольного объема цилиндра двигателя.

¹Compact Membrane Systems, Inc. Частная информация. 1998.

В модели учитываются следующие физические процессы:

- массопередача через впускные и выпускные каналы головки цилиндров;
- подача топлива;
- теплообмен с поверхностями контрольного объема;
- тепловыделение от сгорания топлива;
- совершение работы поршнем или над ним.

Следует отметить, что квазистационарные модели ДВС различной степени сложности нашли широкое применение в мировой практике двигателестроения. Основные положения таких моделей приведены в работах [1-6].

Общая система дифференциальных уравнений для контрольного объема цилиндра ДВС имеет вид

$$\frac{dT}{d\varphi} = \left\{ \left[\sum_{sf} \frac{d\theta_{sf}}{d\varphi} + \sum_{in} \left(\frac{dH_o}{d\varphi} \right)_{in} - \sum_{out} \left(\frac{dH_o}{d\varphi} \right)_{out} + \frac{dm_f}{d\varphi} - U \cdot \frac{dm}{d\varphi} \right] \cdot \frac{1}{m} - \frac{RT}{V} \cdot \frac{dV}{d\varphi} - \frac{dU}{dF} \cdot \frac{dF}{d\varphi} \right\} \frac{dU}{dT},$$

$$\frac{dm}{d\varphi} = \sum_{in} \left(\frac{dm}{d\varphi} \right)_{in} - \sum_{out} \left(\frac{dm}{d\varphi} \right)_{out} + \sum \frac{dm_f}{d\varphi},$$

$$\frac{dF}{d\varphi} = \frac{F_1}{m} \left(\frac{F_1}{L_{mst}} \frac{dm_{fb}}{d\varphi} - F \frac{dm}{d\varphi} \right),$$

где $F_1 = 1 + FL_{mst}$; $m_{fb} = \frac{mFL_{mst}}{F_1}$.

Условные обозначения: T — температура (К); φ — угол поворота коленчатого вала (рад.); Q — теплота (Дж); H_o — полная энтальпия (Дж), m — масса (кг); u — удельная внутренняя энергия (Дж/кг), F — эквивалентное отношение, L_{mst} — стехиометрическое отношение. Индексы: sf — поверхность контрольного объема; in — входной поток в контрольный объем; out — выходной поток из контрольного объема; f — топливо; fb — сгоревшее топливо.

Расчетный анализ двигателя внутреннего сгорания

В качестве объекта анализа был выбран реально существующий дизельный двигатель (диаметр цилиндра 0,08 м, ход поршня 0.0895 м, степень сжатия 20). Исходные данные и основные режимы работы были взяты из работы [7].

На рис.1 приведены параметры работы двигателя для внешней скоростной характеристики (эффективная мощность Ne , эффективный крутящий момент Me , коэффициент избытка воздуха α , расход воздуха G_e , расход топлива G_m , эффективный удельный расход топлива g_e). Сплошной линией обозначены результаты базового расчета (воздух содержит 21% кислорода). Пунктирной линией отмечены результаты, при которых в воздухе содержится 25% кислорода, а расход топлива оставлен без изменения. При сравнении можно отметить более высокий уровень

коэффициента избытка воздуха (т.е. соотношение кислород/топливо стало значительно больше). Вследствие этого (более бедные смеси) несколько увеличились мощностные показатели двигателя (N_e и M_e), а также улучшилась топливная экономичность (минимальный эффективный удельный расход топлива уменьшился на 3 г/кВт·ч). Следует отметить, что на практике улучшения могут быть больше, так как появляется возможность более широкой регулировки процессов смесеобразования и горения.

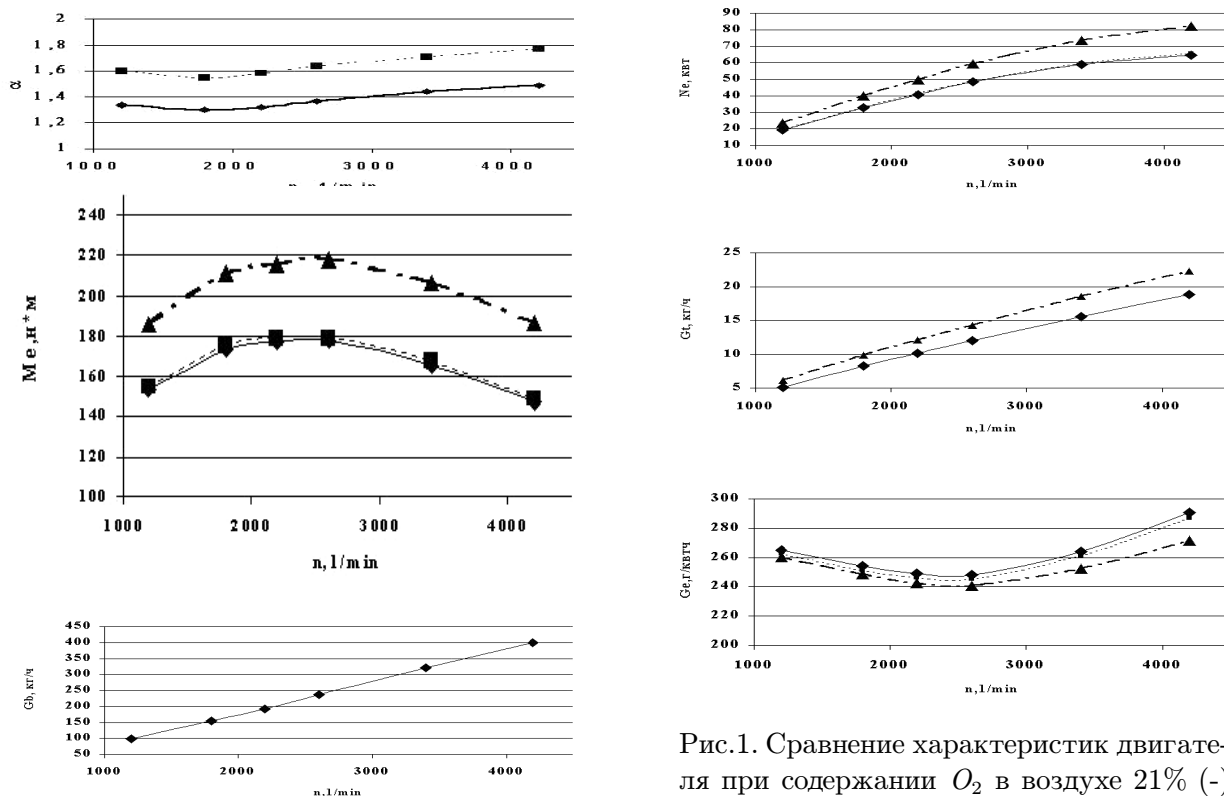


Рис.1. Сравнение характеристик двигателя при содержании O_2 в воздухе 21% (-) и 25%.

Здесь же (рис.1) приведены результаты расчета при увеличении расхода топлива (коэффициент избытка воздуха равен базовому), но при этом в поступающем воздухе увеличено содержание кислорода до 25%. На графике эти результаты отмечены штрихпунктирной линией. В результате получено значительное снижение эффективного удельного расхода топлива (минимальный уменьшается на 7,5 г/кВт·ч). Значительно увеличиваются крутящий момент и мощность двигателя (до 28%). Следует отметить, что на данном графике приведены практически два крайних случая (первый $G_m = \text{const}$, второй $\alpha = \text{const}$). На практике можно также реализовать любой из промежуточных случаев.

Аналогичные расчеты были проведены для случая 30%-го содержания кислорода в воздухе (рис.2). Положительные изменения в данном случае более значительны. Мощность двигателя может быть увеличена на 62%, при уменьшении эффективного удельного расхода топлива на 13 г/кВт·ч для данного двигателя.

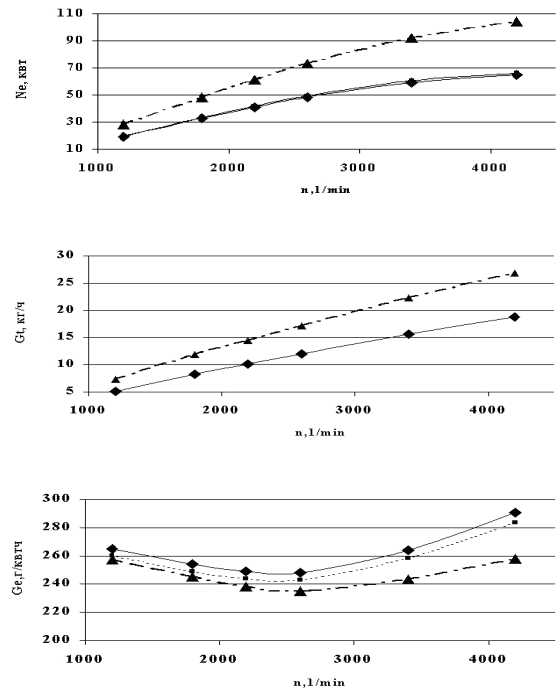
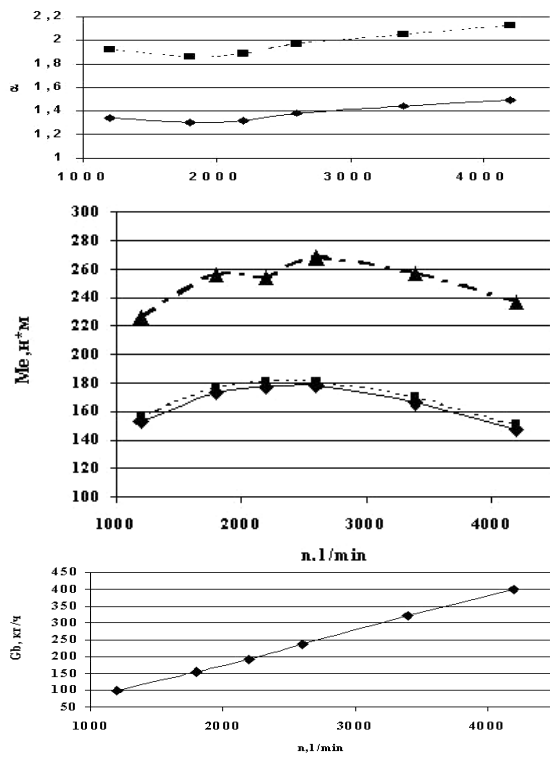


Рис.2. Сравнение характеристик двигателя при содержании O_2 в воздухе 21% (-) и 30%.

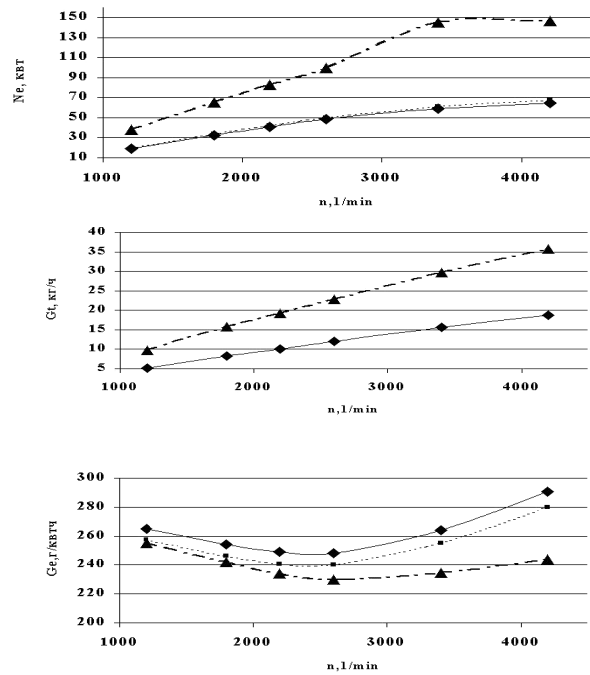
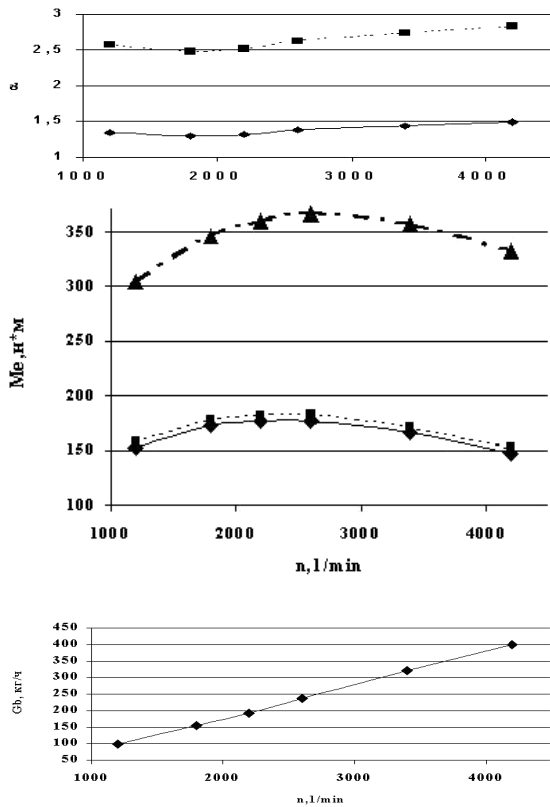


Рис.3. Сравнение характеристик двигателя при содержании O_2 в воздухе 21% (-) и 40%.

На рис.3 приведены результаты для 40% содержания кислорода в воздухе, где также зафиксированы значительные улучшения. Однако следует отметить, что при увеличении содержания кислорода в воздухе происходит также увеличение максимальных температур и давлений в цилиндре двигателя.

На рис.4 приведены изменения эффективной мощности (N_e), эффективного момента двигателя (M_e), эффективного удельного расхода топлива (g_e), максимальной температуры (T_{max}) и давления (P_{max}) цикла для режима максимального крутящего момента двигателя в зависимости от содержания кислорода в воздухе. Здесь также рассмотрены два крайних случая ($G_m=const$ и $\alpha=const$). Области графика, расположенные между штрихпунктирной и сплошной линиями, показывают возможные варианты изменения мощности, удельного эффективного расхода топлива, крутящего момента, максимальных давления и температуры в цилиндре двигателя.

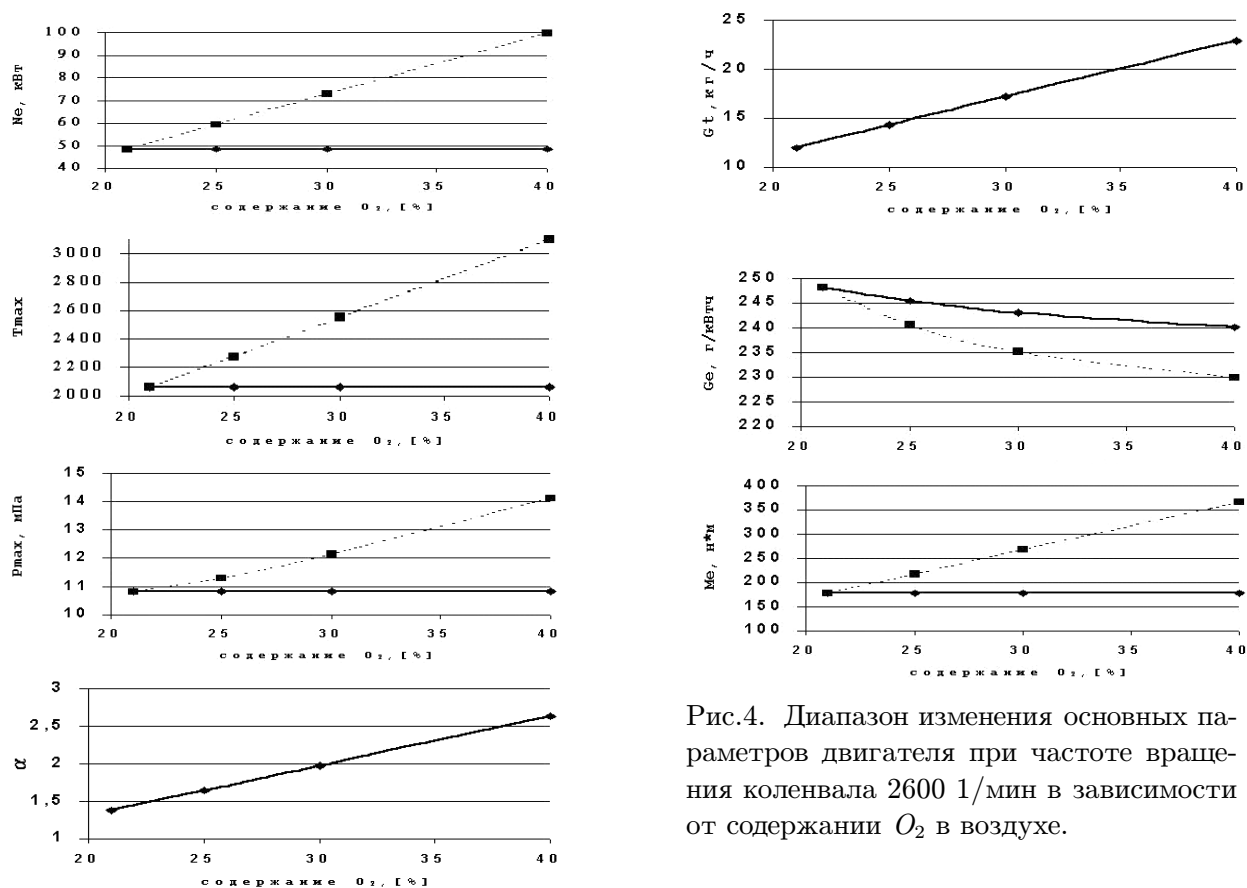


Рис.4. Диапазон изменения основных параметров двигателя при частоте вращения коленвала 2600 1/мин в зависимости от содержания O_2 в воздухе.

На основе рис.4 и анализа существующих и перспективных дизельных двигателей можно сделать следующие выводы:

1. Для существующих двигателей наиболее реально использовать обогащение кислородом воздуха до 25%.
2. Для перспективных двигателей содержание кислорода в воздухе можно было бы довести до 30%.

Данные ограничения накладываются тепловыми и механическими нагрузками на детали двигателя. Тем не менее применение обогащенного кислородом воздуха является, по всей видимости, перспективным и реальным для достижения повышения мощности двигателя от 20 до 60% и улучшения топливной экономичности от 2 до 13 г/кВт·ч.

Экологические проблемы

В то время как современные дизельные двигатели имеют довольно высокие рабочие характеристики, в особенности топливную экономичность, существуют экологические проблемы. Выхлопные газы содержат окислы азота NO_x , сажу, CO , несгоревшие углеводороды в твердом и газообразном состояниях. Особенно следует отметить несгоревшие углеводороды и сажу, которые могут рассматриваться как потенциальная опасность здоровью человека, так как доказано, что они содержат канцерогенные вещества [8]. В настоящее время во всех развитых странах приняты очень жесткие нормы выброса вредных веществ для двигателей внутреннего сгорания. Данная проблема широко рассматривается теоретическими и экспериментальными методами (например, работы [8-12]).

Процесс сгорания в дизельном двигателе можно разделить на две фазы, каждая из которых определяется фундаментально различными физико-химическими процессами. Во время первой фазы часть топлива успевает перемешаться во время периода задержки воспламенения — таким образом, здесь имеет место сгорание предварительно подготовленной топливо-воздушной смеси. Однако вскоре после начала процесса сгорания наступает вторая фаза — фаза диффузионного горения, так как определяющим становится смещение топлива и воздуха. Пламя в цилиндре дизельного двигателя разделяется на зоны, богатые топливом, где и происходит процесс сажеобразования и формирования углеводородов (HC), и зоны интенсивной химической реакции горения, где формируется основное количество NO_x и происходит окисление углеводородов, сажи и CO . Ввиду отсутствия детальной информации относительно образования вредных веществ в дизельных двигателях, в работах [9,11] для получения эмпирических корреляций был использован простой параметр диффузионного пламени — адиабатическая стехиометрическая температура пламени. Авторы данных работ связали состав воздуха с данной характеристической температурой (варьируя содержание кислорода и азота в воздухе). Были получены и обобщены данные для ряда дизельных двигателей по зависимости состава вредных веществ в выхлопных газах двигателя от адиабатической стехиометрической температуры (фактически от содержания кислорода и азота в воздухе).

Нормализованные результаты работы [11] приведены на рис.5 — для NO_x , на рис.6 — для сажи, на рис.7 — для углеводородов. Данные для CO аналогичны данным для сажи из-за схожести условий образования. Диапазон добавления кислорода в воздух был 0-6%, азота 0-15%.

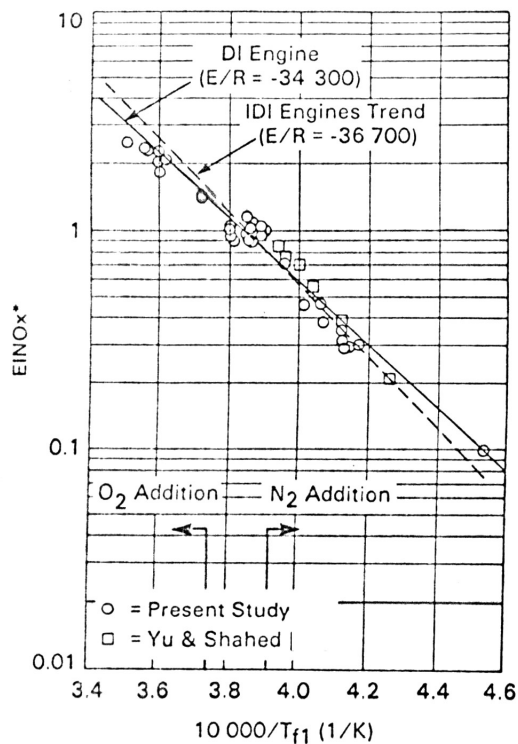


Рис.5. Нормализованная NO_x эмиссия в зависимости от температуры для различных двигателей [11].

Из приведенных данных видно, что увеличение содержания кислорода в воздухе до 25-27% значительно уменьшает выброс сажи, CO и несгоревших углеводородов. Но при этом увеличивается также содержание NO_x , которое может быть снижено другими общепринятыми методами: более поздней подачей топлива, улучшением смесеобразования и применением нейтрализаторов. Хотя в определенных случаях можно применить и обогащение воздуха азотом, что видно из рис.5, вместо использования рециркуляции отработавших газов.

Холодный запуск двигателя

Сегодня одна из главных проблем разработчиков (особенно для условий России) — улучшение характеристик холодного запуска дизельных двигателей. Существует определенная связь между коэффициентом избытка воздуха

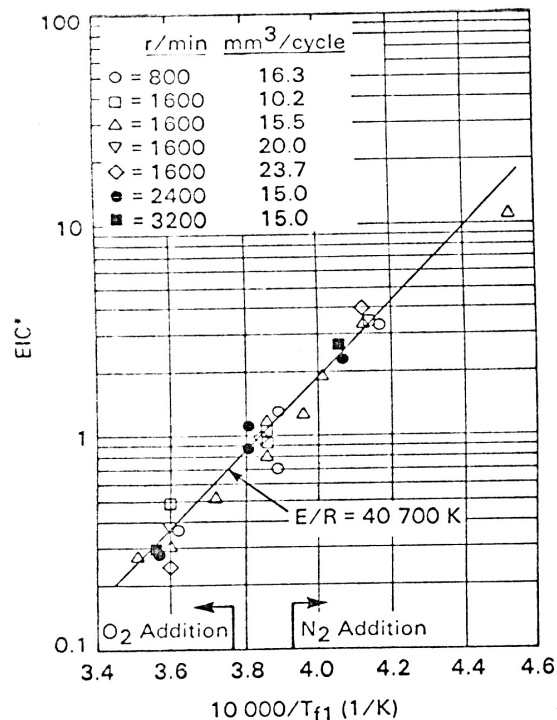


Рис.6. Зависимость эмиссии частиц углерода от температуры [11].

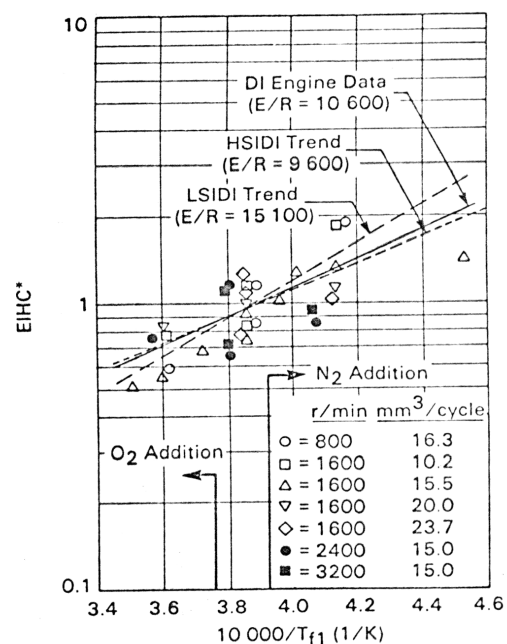


Рис.7. Эмиссия углеводородов для различных двигателей в зависимости от температуры [11].

и температурой самовоспламенения топливо-воздушной смеси. При пониженных температурах, которые имеют место при холодном запуске двигателя, требуется определенное максимальное значение коэффициента избытка воздуха [12]. Применение обогащенного кислородом воздуха значительно расширяет диапазон локальных коэффициентов избытка воздуха, что приводит к улучшению характеристик холодного запуска двигателя. Сокращение периода холодного запуска также приведет к значительному уменьшению выброса вредных веществ во время этого периода.

Следует отметить, что уровни выброса вредных веществ во время периода холодного запуска очень высокие. По результатам материалов Compact Membrane Systems, Inc., применение обогащенного кислородом воздуха, во-первых, приведет к более полному сгоранию в цилиндре двигателя (более низкий уровень выброса углеводородов, сажи и CO), во-вторых, период прогрева двигателя уменьшится, что приведет к уменьшению периода запуска двигателя.

Условия высокогорья

В условиях высокогорья вследствие уменьшения плотности воздуха отмечается ухудшение мощностных, топливно-экономических и экологических показателей двигателей. Причиной этого является уменьшение массового содержания воздуха (следовательно, и кислорода) в цилиндре двигателя. Применение обогащенного кислородом воздуха может устранить эту проблему.

Заключение

1. Применение обогащенного кислородом воздуха (до 25%-го содержания) в современных дизельных двигателях может иметь следующие положительные характеристики:

- увеличение мощностных показателей до 28%;
- улучшение топливной экономичности практически на всех режимах работы до 8 г/кВт·ч;
- значительное уменьшение выброса вредных веществ (сажа, CO , несгоревшие углеводороды);
- улучшение холодного запуска двигателя (уменьшение периода запуска, уменьшение выброса вредных веществ);
- улучшение мощностных, топливно-экономических и экологических характеристик двигателей в условиях высокогорья;

2. Приведенные выводы для дизельных двигателей в определенной мере справедливы и для других технических устройств, использующих процессы горения различного вида топлив: бензиновые и газовые двигатели внутреннего сгорания, топки и печи, газотурбинные установки и двигатели, авиационные и аэрокосмические силовые установки, различные дожигатели и т.д.

3. Кроме этого, применение обогащенного кислородом воздуха может позволить использование более вязких и тяжелых топлив в вышеперечисленных устройствах.

4. Следует отметить, что в некоторых случаях для определенных режимов может быть использован и процесс обогащения воздуха азотом, а не кислородом. Это положительно скажется на выбросе NO_x . Кроме этого, обогащенный азотом ионизированный воздух может быть применен в устройствах нейтрализации NO_x в выхлопных газах различных устройств.

Авторы выражают глубокую признательность Compact Membrane Systems, Inc. за предоставленную информацию и доктору технических наук В.Н. Каминскому за поддержку и полезные обсуждения.

Список литературы

- [1] Олисов П.А., Зефирова А.А. Программа термодинамического расчета ДВС "ОТЕПЛ". Версия 1.0. Руководство пользователя. — НПФ "Турботехника", 1990.
- [2] Watson N., Janota M.S. Turbocharging the internal combustion engine. MacMillan Press, 1982.
- [3] Marzouk M. Simulation of turbocharged diesel engine under transient conditions. PhD Thesis, University of London, 1976.
- [4] Borman G.L. Mathematical simulation of internal combustion engine processes. PhD Thesis, University of Wisconsin, 1964.
- [5] McAulay K.J., Chen S.K., Tang W., Borman C.L., Myers P.S., Ujehara O.A. Development and evaluation of the simulation of compression-ignition engine. SAE Paper 650451, 1965.
- [6] Streit E.E., Borman C.L. Mathematical simulation of a large turbocharged two-stroke diesel engine. SAE Paper 710176, 1971.
- [7] Проведение базовых расчетов дизельного двигателя модели 21413. Научно-технический отчет, этап 3.4 — НПФ "Турботехника", 1991.
- [8] Andrews G.E., Iheozor-Ejiofor I.E., Oeapipatanakul S. Unburnt hydrocarbon and polynuclear aromatic hydrocarbon emission and their relationship to diesel fuel composition. — In: Int. Conf. on Combustion in Engineering. Paper C73/83, IMechE, 1983.
- [9] Ahmad T., Plee S.L., Myers J.P. Diffusion flame temperatureits influence on diesel engine particulate and hydrocarbon emissions. IMechE Conference. Diesel engines for passenger cars and light duty vehicles. Paper C101/82, IMechE, 1982.

- [10] Kamimoto N., Matsuoka S., Miyairi Y. Soot oxidation rate in the flame in DI diesel engine. — IMechE Conference. Diesel engines for passenger cars and light duty vehicles. Paper C103/82, IMechE, 1982.
- [11] Ahmad T., Plee S.L. Application of flame temperature correlation to emissions from direct-injection diesel engine. SAE Paper 831734, 1983.
- [12] Norris-Jones S.R., Hollis T., Waterhouse C.N.F. A study of the formation of particulates in the cylinder of direct-injection diesel engine. SAE Paper 840419, 1984.
- [13] Phatak R., Nakamura T. Cold startability of open-chamber direct-injection diesel engines-Part 1: Measurement technique and effects of compression ratio. SAE Paper 831335, 1983.

Рукопись поступила 4 июня 1998 г.

В.Н.Пелешко, П.А.Олисов.

Влияние применения обогащенного кислородом воздуха на характеристики дизельных двигателей.

Оригинал-макет подготовлен с помощью системы \LaTeX .

Редактор Н.В.Ежела.

Технический редактор Н.В.Орлова.

Подписано к печати 09.06.98. Формат $60 \times 84/8$. Офсетная печать.
Печ.л. 1,25. Уч.-изд.л. 0,96. Тираж 150. Заказ 194. Индекс 3649.
ЛР №020498 17.04.97.

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий
142284, Протвино Московской обл.

