

Заключение

Представленные методика и результаты математического анализа взаимосвязи конструктивных параметров и эксплуатационных показателей современных малолитражных автомобильных дизелей позволяют значительно облегчить: разработчикам - задачу создания новых конструкций автомобильных дизелей с перспективными показателями; изготовителям - принятие аргументированного решения по организации промышленного производства.

Полученные результаты позволили обосновать параметры отечественных малолитражных автомобильных дизелей серии 4ДТНА, дать оценку перспективности принятых решений и впервые показать конкретную перспективность отечественного дизеля 4ДТНА2.

Список литературы:

1. Блинов А.Д., Голубев П.А., Драган Ю.Е., Дрозденко В.Ф. *Современные подходы к созданию дизелей для легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков / Под. ред. Папонова В.С. и Минеева А.М. - М.: НИЦ "Инженер". - 2000. - 332 с.*
2. Драгомиров С.Г., Драгомиров М.С. *Основные тенденции развития двигателей легковых автомобилей за последнее десятилетие (1996 - 2005 г.г.) // Тр. 10 межд. науч.-практич. конф. "Фундаментальные и прикладные проблемы совершенствования поршневых двигателей" - Владимир: ВлГУ. - 2005. - 25 с.*
3. Мир легковых автомобилей // *Автокаталог. Вып. 3-13. - М.: ЗАО "КЖИ" За рулём"*, 1995 - 2005.
4. Яглом А.М., Яглом И.М., *Вероятность и информация. - М.: Наука, 1973. - 512 с.*
5. Кузин Л.Т. *Основы кибернетики. - М.: Энергия, 1973 - 504 с.*

УДК 621.436

**В.А.Пылев, д-р техн. наук, С.А. Кравченко, канд. техн. наук,
А.А. Прохоренко, канд. техн. наук, Е.Г. Заславский, канд. техн. наук,
В.В. Шпаковский, канд. техн. наук**

ШАХТНЫЙ ГАЗ – МОТОРНОЕ ТОПЛИВО ДЛЯ ДВИГАТЕЛЕЙ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Ограниченные запасы традиционных видов топлива, существенная зависимость украинской экономики от внешних поставщиков топливных ресурсов определяет комплекс вопросов, связанных с получением и потреблением энергии как проблему энергобезопасности государства. В этой связи Правительством Украины выпущен ряд организующих документов, направленных на разработку и внедрение мероприятий по использованию альтернативных и нетрадиционных видов топлива. Основным доку-

ментом здесь является «Энергетическая стратегия Украины на период до 2030 года». Практическая реализация совокупности положений указанной программы предопределяет высокую актуальность работ данного направления.

К одному из рассматриваемых новых видов топлива сегодня относят шахтный газ, в основном представляющий смесь метана с воздухом. Газ выделяется в шахтах при добыче угля. Его смесь с кислородом при определенных соотношениях становится

взрывоопасной [1]. Поэтому, для обеспечения безопасной работы в шахтах поддерживают нижний предел метана в смеси не более 5%, а верхний – не менее 32%. Вместе с тем опыт мирового двигателестроения свидетельствует о разработке и использовании в газовых двигателях метано-воздушной смеси с содержанием метана, подаваемом в основную камеру сгорания, не менее 27%.

Помимо взрывоопасности, метан является одним из газов, создающих парниковый эффект. Содержание метана в атмосфере быстро растет, ежегодно увеличиваясь на 0,6% (при увеличении объема диоксида углерода на 0,4%) [2].

Большое количество выбросов метана в атмосферу происходит именно при добыче каменного угля. При этом в 2000 году его мировые выбросы составили 25 млрд. м³, а утилизировано с получением энергии лишь 1,3 млрд. м³. Таким образом, кардинальное увеличение потребления шахтного газа предопределяет получение положительного эффекта в решении энергетической проблемы, а также имеет существенный экологический эффект.

В мире существует большое количество шахт со значительными запасами метана, оцениваемыми в 260 трлн. м³. Наиболее значительные ресурсы при этом сосредоточены в КНР, России, США, Австралии, ЮАР, Индии, Польше, Великобритании, Украине. В Украине ежегодные выбросы метана составляют примерно 10% от мировых. Из шахт Дон-

басса извлекается 2,5 млрд. м³, Львовско-Волынского бассейна – около 60 млн. м³. Лишь 8% указанного количества используется в качестве топлива, причем малоэффективно, преимущественно как печное топливо [3]. При этом по доле утилизованного метана Украина практически в 2,5 раза отстает от мирового показателя.

В 2004 году на «Шахте им. Засядько» началось проектирование мощной когенерационной станции с использованием шахтного газа в качестве моторного топлива. Первая очередь станции электрической мощностью 36 МВт и тепловой 35 МВт на энергоблоках с 12-ю форкамерными газовыми двигателями типа 20ЧН19/22 фирмы GE Jenbacher была введена в эксплуатацию в 2006 году на восточной промышленной площадке шахты. Безусловно, такой способ утилизации шахтного газа следует считать одним из наиболее эффективных и требует распространения на других украинских шахтах.

Важно отметить, что мировые производители газовых двигателей ориентируются на максимально возможный сегмент потребительского рынка. В качестве примера в табл.1 представлен ряд модификаций газовых двигателей, подтверждающий сказанное. Вместе с тем, из таблицы видно, что шахтный газ, несмотря на имеющийся опыт его практического использования, здесь не приводится.

Таблица 1. Примеры когенерационных установок компании GE Jenbacher

Двигатель	Страна использования	Используемый газ	Электрическая мощность, кВт
18xJGC 320 GS-L.L	Великобритания	Свалочный газ	18 500
3xJGC 316 GS-B.L	Индия	Газ очистных сооружений	
12xJGC 316 GS	Испания	Коксовый газ	
5xJGC 320 GS-S.L	Россия	Попутный нефтяной газ	3 775
12xJGC 620 GS-P.LC	Россия	Попутный нефтяной газ	36 000
1xJGC 620 GS-P.L	Россия	Попутный нефтяной газ	2 000
5xJGC 620 GS-B.LC	Россия	Биогаз	12 150
5xJGC 620 GS-B.LC	Россия	Свалочный газ	12 500
6xJGC 620 GS-N.LC	Россия	Природный газ	18 060

Целью настоящей работы является анализ проблем, возникающих при эксплуатации двигателей внутреннего сгорания на шахтном газе, и установление возможных путей их преодоления.

Как уже отмечалось, основным компонентом шахтного газа является метан. Технологический процесс вентиляции шахт предполагает смешивание шахтного газа с приточным воздухом и последующую принудительную эвакуацию смеси из шахты. При этом, как показывает практика, концентрация метана в смеси может изменяться по источникам газа (а также во времени) в широких пределах – от 5 до 60%.

В указанных условиях для стабильной работы двигателей необходимо иметь специальный узел газоподготовки, включающий возможность частичного использования в топливной смеси природного газа из промышленных газовых магистралей. Наиболее рациональными являются схемы питания, предусматривающие возможность повышения процентного содержания метана, направляемого в форкамеру, свыше 32%.

Исходя из задачи эффективной утилизации шахтного газа, возможны два варианта использования двигателей внутреннего сгорания.

Первый вариант предполагает постоянную работу двигателей на проектной мощности станции с максимальным получением электрической и тепловой энергии. Реализация такого проекта требует учета специфики переменной во времени концентрации поступающего из шахт метана и, соответственно, использования конструкций двигателей, способных работать практически лишь на форкамерном газе в случае недостаточной калорийности смеси. Опыт разработки двигателей таких конструкций имеет, например, ГП «Завод им. Малышева». Очевидно, что при падении калорийности шахтного газа требуется повышенный расход природного из промышленной магистрали.

Второй вариант в качестве первоочередной цели предполагает утилизацию шахтного газа при ми-

нимальных расходах промышленного. В этом случае получение электрической и тепловой энергии когенерационной станцией определяется калорийностью поступающей из шахты смеси в каждый момент времени. С падением процентного содержания метана в шахтном газе имеют место периодические остановки части двигателей станции. Количество таких пусков-остановов значительно превышает регламентируемое производителем их количество для двигателей электрических станций. Последнее обстоятельство приводит к снижению ресурса основных деталей, снижению других показателей надежности. В данном случае остро необходимым является внедрение комплекса мероприятий по продлению ресурса, повышению надежной эксплуатации машин.

Другой, не менее важной трудностью эффективной эксплуатации двигателей внутреннего сгорания на шахтном газе является организация бездетонационного горения топлива (каптивированного метана).

Детонационные явления, возникающие в результате самовоспламенения горючей смеси в зонах, удаленных от фронта ламинарного пламени, внешне проявляются в виде металлического стука в цилиндре. При этом работа двигателя с детонацией приводит к резкому сокращению срока его службы из-за чрезмерных тепловых и механических нагрузок, воздействующих на детали камеры сгорания и цилиндро-поршневой группы.

Возникновение детонации в газовом двигателе в первую очередь определяют следующие факторы: степень сжатия; коэффициент избытка воздуха; форма камеры сгорания; угол опережения зажигания; температура смеси на впуске; нагрузка (режим работы двигателя); метановое число топлива.

Перечисленные факторы имеют неравнозначное влияние на детонацию при эксплуатации двигателя конкретной конструкции. Так, например, степень сжатия является конструктивным параметром,

определяющим эффективность рабочего процесса, а потому не подлежит изменению либо оптимизации. Коэффициент избытка воздуха определяется оптимальными условиями сгорания смеси и в газовых двигателях составляет величину $\alpha=1,6\dots1,8$, позволяющую обеспечить полное сгорание топлива и снизить возможность детонации. Очевидно, что величина α регулируется системой автоматического управления в зависимости от нагрузки и состава топлива. Системой автоматического управления двигателя регулируется также угол опережения зажигания.

Температура рабочей горючей смеси на впуске ограничена сверху склонностью к возникновению детонации, а снизу ($t \approx 40^\circ\text{C}$) – конденсацией тяжелых углеводородов (пентана и выше) и воды.

Снижение нагрузки однозначно приводит к снижению тенденции к детонации, также регулируется системой автоматического регулирования составом и количеством топлива.

Таким образом, единственным независимым параметром, влияющим на возникновение детонации в газовом двигателе при его эксплуатации является такая физическая характеристика газового топлива, как метановое число.

Метановое число, предложенное в 60-х годах XX столетия фирмой AVL, является аналогом октанового числа и представляет собой процентное содержание по объему метана (МЧ = 100 ед.) в эталонной газовой смеси с водородом (МЧ = 0 ед.), которая имеет ту же детонационную стойкость, что и исследуемое топливо. В соответствии с паспортными данными газовых двигателей топливо должно иметь метановое число не менее 90 ед.

Определение метанового числа смеси газов – достаточно сложная и продолжительная по времени задача. Существуют расчетные методики определения метанового числа, разработанные фирмой AVL и Caterpillar, являющиеся коммерческими, закрытыми для широкой публикации. Открытой является мето-

дика CARB [4], в соответствии с которой метановое число определяется по формуле

$$\text{МЧ} = 1,624\{-406,14 + 508,04(\text{H/C}) - 173,55(\text{H/C})^2 + 20,17(\text{H/C})^3\} - 119,1, \quad (1)$$

где H/C – отношение количества атомов водорода к количеству атомов углерода в углеводородных компонентах топлива.

Рассмотрим для примера возможный средний состав шахтного газа, приведенный в таблице 2.

Исходя из приведенного в табл.2 состава газа значение метанового числа, определенного по формуле (1) соответствует величине 95 ед. Однако, как отмечается в работе [4], расчет метанового числа по методике CARB дает завышенные результаты. Так, например, метановому числу 100 по методике AVL соответствует значение 108 ед. по методике CARB.

Таблица 2. Состав шахтного газа

Компонент	Объемная доля, %
CH ₄	38,0
C ₂ H ₆	1,3
C ₃ H ₈	0,3
C ₄ H ₁₀	0,06
C ₅ H ₁₂	0,03
N ₂ + Ar	51,0
CO ₂	0,1
O ₂	8,9
NH ₃	0,3
Cl	
SO ₂	
H ₂ S	
CO	
H ₂	0,01

На основании данных [4] методом наименьших квадратов нами получена зависимость

$$\text{МЧ}_{\text{AVL}} = 59,4 - 0,39\text{МЧ}_{\text{CARB}} + 0,0071\text{МЧ}_{\text{CARB}}^2. \quad (2)$$

При этом, погрешность определения МЧ, соответствующего методике AVL не превышает 2 ед.

Расчет, выполненный с помощью полученной зависимости (2), показывает, что метановому числу

95 ед. по методике CARB соответствует $MЧ = 86$ по методике AVL. Таким образом, фактическое метановое число шахтного газа оказалось ниже допустимого, что может явиться причиной детонации при работе двигателя с полной нагрузкой.

Нами выполнен анализ резервов повышения метанового числа путем увеличения объемной доли CH_4 в топливной смеси за счет добавки в шахтный газ природного метана из промышленной магистрали. Зависимости метанового числа топлива и процентного по объему содержания метана в топливе от относительного количества добавленного магистрального метана приведена на рис. 1.

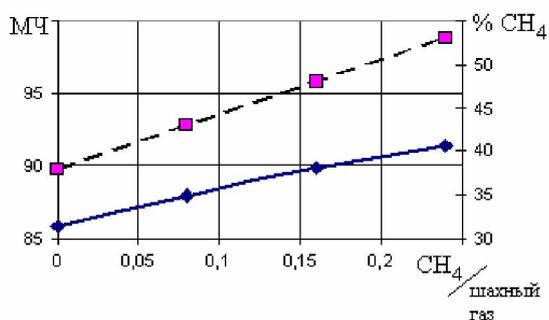


Рис. 1. МЧ и содержание метана в газовом топливе в зависимости от относительного количества добавленного магистрального метана:

- ◆— — МЧ;
- — содержание метана в топливе.

Видно, что увеличение объемной доли CH_4 в топливной смеси шахтного и природного газов к значительному увеличению метанового числа не приводит.

В связи с указанным, основными направлениями увеличения детонационной стойкости шахтного газа являются:

- удаление из газового топлива (либо уменьшение содержания) наиболее тяжелых углеводородов, имеющих высокую склонность к детонации;
- увеличение содержания в газовой смеси CO_2 , являющегося своеобразной антидетонационной присадкой для газового топлива [5]. Одной из возможностей такой модификации топлива является его

частичное сжигание [6], в т.ч. за счет воздуха, имеющегося в шахтном газе, без доступа дополнительного. В пользу последнего пути говорит возможность получения в указанном процессе работы (теплоты), получаемой в составе комбинированной когенерационной установки.

Последнее направление работ требует дальнейшего, более детального анализа. Также практический интерес здесь представляют исследования по повышению детонационных свойств топлива путем использования схем с рециркуляцией отработавших газов.

В целом с целью повышения эффективности использования двигателей когенерационных станций, применяющих в качестве моторного топлива шахтный газ, необходимыми являются следующие работы:

1. Разработка и внедрение комплекса новых мероприятий, направленных на бездетонационное протекание рабочего процесса двигателей, работающих на шахтном газе с переменной во времени концентрацией метана.
2. Разработка и реализация оптимизированных алгоритмов вывода двигателей на потребный уровень мощности и сброса мощности в условиях неаварийных остановов.
3. Разработка и реализация алгоритма управления двигателем в условиях аварийного останова модуля.
4. Применение прогрессивных мероприятий упрочнения боковой поверхности поршней, направленное на существенное уменьшение износов в сопряжении гильза-поршень, особенно в условиях частых пусков-остановов.

Указанный перечень работ направлен на существенное смягчение тепловых и силовых пиковых воздействий, воспринимаемых ответственными узлами и деталями двигателя, повышение его показателей надежности. При этом нами используется ряд

рабочих гипотез, новых методик и технологий, включая исследования и использование механизмов уменьшения износов и механических потерь в сопряжении поршень-гильза; влияния мгновенных тепловых потоков, каталитического воздействия, электретов, совокупности физико-химических процессов на бездетонационное протекание рабочего процесса в двигателях, работающих на шахтном газе.

Список литературы:

1. Шехурдин А.В. Горное дело. –М.: Недра, 1979.
2. Энергетические установки и окружающая среда /

Под общ. ред. В.А.Маляренко. Х.:ХГАГХ, 2002.
3. Карп И.Н. Метан угольных пластов / Экотехнологии и ресурсосбережение, 2005. №1. С. 5-8. 4. Paper Study on the Effect of Varying Fuel Composition on Cummins Gas Engines. M. Landau, Southern California Gas Company, 2005. 5. G. Brecq, J. Bellettre, M. Tazerout, T. Muller Knock prevention of CHP engines by addition of N₂ and CO₂ to the natural gas fuel. Applied Thermal Engineering. Vol. 23, Issue 11, 2003, P.P. 1359-1371. 6. Final Report "Biomass Gasification Evaluation of Gas Turbine Combustion". U.S. Department of Energy. 2003.

УДК 621.436

А.А. Лисовал, канд. техн. наук

МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ МИКРОПРОЦЕССОРНОГО РЕГУЛЯТОРА С ПРОГРАММНО-ИЗМЕРИТЕЛЬНЫМ КОМПЛЕКСОМ В ЕГО СОСТАВЕ

Введение

Постоянное ужесточение европейских норм на выбросы токсичных компонентов с отработавшими газами (ОГ) в атмосферу способствует широкому применению на автомобильных дизелях и на автомобилях электронных регуляторов и бортовых микропроцессорных систем управления. Такие системы могут быстро обрабатывать достаточно большое количество входящих сигналов от датчиков, осуществлять оптимальную настройку двигателя на эксплуатационные режимы, постоянно осуществлять бортовую диагностику систем, которые непосредственно влияют на токсичность ОГ, и сигнализировать водителю о неполадках.

Микропроцессорные системы управления для транспортных дизелей необходимо разрабатывать и производить на современной электронной элемент-

ной базе. Программное обеспечение необходимо разрабатывать самостоятельно.

Обзор публикаций

Началом работ в данном направлении послужили разработки систем питания и электронного регулирования подачи газа для газодизеля [1].

Выполнено теоретическое обоснование необходимости связанного управления подачей топлива и давлением наддувочного воздуха для дизелей с газотурбинным наддувом [2]. Реализация связанного управления осуществляется по разработанной методике с помощью микропроцессорного регулятора (МР) на базе микроконтроллера серии PIC 16 фирмы Microchip [3]. Архитектура основана на концепции отдельных шин и областей памяти для данных и для команд (Гарвардская архитектура). Шина данных и