

УДК 621.431.73

А.В. Грицюк, канд. техн. наук, А.С. Куценко, д-р техн. наук, О.А. Грицюк, бакалавр

МАТЕМАТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ПЕРСПЕКТИВНОСТИ ОТЕЧЕСТВЕННЫХ МАЛОЛИТРАЖНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ ДИЗЕЛЕЙ СЕРИИ 4ДТНА НА ЭТАПЕ ИХ ПРОЕКТИРОВАНИЯ

Введение

Малолитражные дизели в настоящее время преимущественно используются в таких секторах экономики как транспорт, сельскохозяйственная и строительно-дорожная техника, малая автономная энергетика, объекты Министерства обороны и т.п. Только в сельском хозяйстве большинство фермерских земель, садоводческих, овощеводческих, бахчеводческих плантаций обрабатываются малогабаритной техникой, в которой в качестве силового агрегата используется малолитражный дизель.

К сожалению, до последнего времени дизелестроение в Украине не получило должного развития. Особенно большое отставание от мировых лидеров наблюдается в создании отечественных дизелей для легковых и малотоннажных грузовых автомобилей, на долю которых приходится большая часть городских и междугородних перевозок. Ликвидировать такое существенное отставание и остаться в числе энергетически развитых стран невозможно без математического анализа развития современного мирового автомобилестроения, сопоставления показателей перспективных и отечественных малолитражных дизелей, выработки концепции развития их элементной базы с одновременной организацией производства на принципиально новой технологической основе.

Актуальность данного математического анализа, состоит в прогнозировании на этапе проектирования показателей отечественного малолитражного дизеля с одновременной оценкой возможности обеспечения этих показателей в конструкциях малолитражных дизелей серии 4ДТНА разработки Харьковского конструкторского бюро по двигателестроению.

1. Постановка задачи и информационная база для ее решения

В настоящее время ведущие автомобилестроительные фирмы расширяют применение дизелей на легковых и малотоннажных грузовых автомобилях. Наибольшее применение эти дизели имеют в Западной Европе. По исследованиям фирмы Perkins (Великобритания) на 53% новых французских и 20% новых германских легковых автомобилях установлены дизели. По данным фирмы Peugeot (Франция) 62% покупателей среднего класса во Франции и 29,8% в Европе предпочитают автомобиль с дизелем. Причина необычного роста спроса на автомобили с дизелями проста: расход дизельного топлива на 100 км составляет от 5 до 7 л и с учетом более низкой цены по сравнению с бензином "евросупер" расходы на эксплуатацию таких автомобилей могут снизиться почти в два раза [1]. Темпы роста применения дизелей в мире довольно стабильны и составляют примерно 1% в год от общего количества марок автомобилей [2]. Высокие темпы развития дизелей усложняют и без того непростую задачу обоснования параметров и прогнозирования их показателей на этапе проектирования. Мировая практика показывает, что при создании новых двигателей следует избегать копирования аналогичных конструкций, пусть даже и достаточно современных. Необходимо ориентироваться на тенденции развития дизелей, на закономерности эволюции их параметров и показателей, а также на перспективы совершенствования отдельных деталей, узлов и агрегатов. Только при этих условиях можно вести разработку с расчётом на опережение достигнутых результатов.

Основной задачей данной работы является исследование с помощью методов математического анализа взаимозависимости между несколькими признаками, определяющими конструктивные параметры и эксплуатационные показатели современных малолитражных дизелей, определение временных рядов сформировавшихся тенденций их развития, перенесение этих тенденций в будущее для оценки перспективности решений, закладываемых КП ХКБД в конструкцию нового автомобильного дизеля 4ДТНА2. При решении поставленной задачи использованы тенденции развития двигателей легковых автомобилей и данные о дизелях ведущих производителей за последние 10 лет [2,3].

2. Методическое обеспечение решения задачи

2.1. Выбор методов математического анализа

Развитие конструкции любого современного дизеля идет в направлении повышения литровой мощности с одновременным улучшением топливо-экологических показателей. При этом конструктивные параметры двигателя закладываются на этапе конструирования и остаются неизменными в течение всего периода производства. Ошибка при проектировании определяет негативную судьбу двигателя. Важность принятия решения подтверждается анализом массива данных об основных конструктивных параметрах современных малолитражных автомобильных четырехцилиндровых двигателей ведущих мировых производителей с 1996 по 2005 год (рис. 1). Представленная на этом рисунке область распределения существующих значений основных конструктивных параметров однотипных дизелей различных фирм даёт представление о сложности задачи конструктора и необходимости предварительного анализа.

Проблема выявления взаимосвязи между конструктивными параметрами и эксплуатационными

показателями дизелей решена оценкой меры взаимной информации путём расчёта информационного коэффициента связи [4, 5] с дальнейшим вычислением линейных и множественных коэффициентов корреляции для параметров, определяющих конструкцию дизеля.

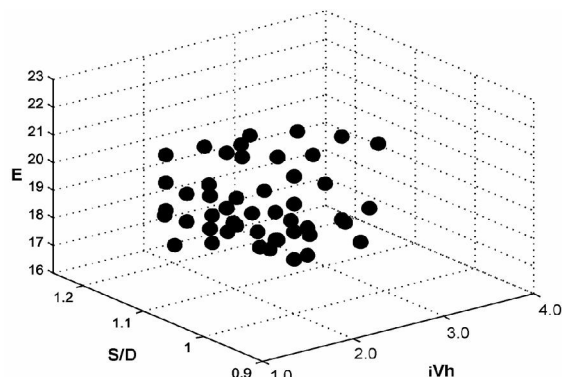


Рис. 1. Основные конструктивные параметры современных малолитражных автомобильных дизелей

По ежегодным математическим ожиданиям этих параметров проведен анализ значений коэффициентов автокорреляции и выявлено наличие линейной тенденции временных рядов искомых показателей. После приведения временного ряда исходных данных к линейному тренду сделан прогноз перспективности того или иного показателя разрабатываемых КП ХКБД автомобильных дизелей на ближайшие годы.

2.2. Расчётное исследование и анализ результатов

Для расчётного исследования использовалась информация о 78 современных малолитражных автомобильных дизелях. Ограничение объёма выборки проведено по компоновочному признаку, количеству цилиндров, наличию турбонаддува и охладителя наддувочного воздуха. По данным последних исследований российских учёных [2] современные автомобильные малолитражные дизеля в абсолютном большинстве (93 - 99%) строятся по рядному принципу, имеют четыре цилиндра, оборудуются агрега-

тами наддува с одновременным применением охладителей наддувочного воздуха. Эти ограничения и определили объём выборки, несмотря на то, что он не совсем достаточен для подобного анализа.

2.2.1. Анализ на основе информационных показателей связи

В качестве меры информационной связи между результативным (эксплуатационным) признаком (x_2) и факторным (конструктивным) признаком (x_1) принят информационный коэффициент связи.

$$R(x_1, x_2) = \frac{I(x_1, x_2)}{\sqrt{H(x_1) \cdot H(x_2)}}, \quad (1)$$

где $I(x_1, x_2) = H(x_1) + H(x_2) - H(x_1, x_2)$ - информация, содержащаяся в векторе x_2 по вектору x_1 ;

$$H(x_i) = -\sum_{i=1}^n p_i \cdot \ln p_i \text{ - энтропия вектора } x_i;$$

$$H(x_1, x_2) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n p_{ij} \cdot \ln p_{ij} \text{ - совместная энтропия векторов } x_1 \text{ и } x_2;$$

n - количество дизелей в выборке.

В качестве основных выбраны те конструктив-

ные параметры, которые определяют компоновку двигателя с возможностью его адаптации в МТО транспортного средства, массо-габаритные показатели и возможность унификации узлов и деталей в процессе модернизации дизеля в серийном производстве.

Выбранные конструктивные параметры и данные расчётного исследования по определению информационного коэффициента связи между этими параметрами и эксплуатационными показателями дизелей приведены в таблице 1. Данные таблицы показывают наличие связи с выбранными конструктивными параметрами (отсутствие информации равно нулю) для всех эксплуатационных показателей, что подтверждает правильность их выбора в качестве основных.

Вместе с тем данные таблицы не содержат величин равных или близких к единице, что указывает на отсутствие однозначных зависимостей и подтверждает возможность достижения важных эксплуатационных показателей при различном рациональном сочетании нескольких конструктивных признаков.

Таблица 1. Значения информационных коэффициентов связи между основными конструктивными параметрами и эксплуатационными показателями дизелей

Конструктивные параметры	Для эксплуатационных показателей						
	Номинальная мощность	Максимальный крутящий момент	Частота вращения при $M_{кр\max}$	Литровая мощность	Средняя скорость поршня	Скоростной коэффициент	Коэффициент приспособляемости
Рабочий объём	0,331	0,285	0,092	0,106	0,119	0,074	0,101
Отношение S/D	0,132	0,119	0,176	0,149	0,076	0,115	0,076
Степень сжатия	0,060	0,084	0,127	0,067	0,197	0,076	0,123

С этой целью определена мера совместного (попарного) информационного влияния на каждый из эксплуатационных показателей дизеля (x_3) одновременно двух конструктивных параметров (x_1 и x_2).

$$R((x_1, x_2), x_3) = \frac{I((x_1, x_2), x_3)}{\sqrt[3]{H(x_1) \cdot H(x_2) \cdot H(x_3)}}, \quad (2)$$

$$I((x_1, x_2), x_3) = I(x_1, x_2, x_3) - I(x_1, x_2), \quad (3)$$

$$I(x_1, x_2, x_3) = \sum_{i=1}^3 H(x_i) - H(x_1, x_2, x_3) \quad (4)$$

$$H(x_1, x_2, x_3) = -\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n p_{ijk} \cdot \ln p_{ijk}, \quad (5)$$

Численные значения информационных коэффициентов связи для трёх параметров приведены в таблице 2.

Известно, что $I((x_1, x_2), x_3) \geq I(x_1, x_2)$, т.е. совместное информационное влияние x_1 и x_2 всегда не меньше влияния x_1 , однако полученное при исследовании существенное увеличение информационного

коэффициента свидетельствует о качественной и устойчивой взаимосвязи эксплуатационных показателей от комплекса заложенных при проектировании дизеля конструктивных параметров.

Таблица 2. Значения информационных коэффициентов связи для трёх параметров дизелей

Конструктивные параметры	Для эксплуатационных показателей						
	Номинальная мощность	Максимальный крутящий момент	Частота вращения при $M_{кр\max}$	Литровая мощность	Средняя скорость поршня	Скоростной коэффициент	Коэффициент приспособляемости
Рабочий объём и степень сжатия	0,730	0,699	0,605	0,566	0,591	0,550	0,600
Рабочий объём и отношение S/D	0,523	0,537	0,385	0,354	0,574	0,377	0,446
Степень сжатия и отношение S/D	0,322	0,337	0,302	0,299	0,413	0,230	0,325

2.2.2. Корреляционный анализ

Наличие явной взаимосвязи между эксплуатационными показателями и конструктивными параметрами дизелей при комплексном объединении последних позволило провести дальнейший корреляционный анализ с целью количественного определения тесноты связи с помощью коэффициентов корреляции. При этом слабая информационная связь (табл. 1) при рассмотрении индивидуальных связей между двумя признаками сделала нецелесообразными исследования по определению значений коэффициентов парной корреляции. Они представляют интерес только для вычисления множественных коэффициентов корреляции между результативным (эксплуатационным) признаком (x_3) и двумя факторными (конструктивными) признаками (x_1 и x_2).

Данные, полученные в результате расчёта множественных коэффициентов корреляции при использовании того же массива исходных данных, представлены в таблице 3. Как видно из таблицы, каждая из анализируемых пар конструктивных параметров

оказывает очень сильное влияние на какой-либо из эксплуатационных показателей, имея максимальное значение множественного коэффициента корреляции, равное 1. Вместе с тем, такие эксплуатационные показатели малолитражного автомобильного дизеля, как средняя скорость поршня и коэффициент приспособляемости мало зависят от конструктивных факторов. Это легко объяснимо, т.к. рассматриваемая выборка двигателей ограничена дизелями, оборудованными агрегатами наддува, которые и формируют внешнюю характеристику, а имеющие место частоты вращения коленчатых валов на режимах максимальной мощности на данном этапе развития малолитражного дизелестроения ещё не достигли своих предельно допустимых значений.

$$K(x_3) = \sqrt{\frac{\kappa^2(x_3, x_1) + \kappa^2(x_3, x_2) - \frac{-2\kappa^2(x_1, x_2) \cdot \kappa(x_3, x_1) \cdot \kappa^2(x_3, x_2)}{1 - \kappa^2(x_1, x_2)}}{1 - \kappa^2(x_1, x_2)}} \quad (6)$$

Также очевидно, что наиболее значимым при проектировании малолитражного дизеля является правильное согласование значений двух из трёх ос-

новных конструктивных параметров, а именно рабочего объёма и степени сжатия.

Таблица 3. Значения множественных коэффициентов корреляции

Конструктивные параметры	Для эксплуатационных показателей						
	Номинальная мощность	Максимальный крутящий момент	Частота вращения при $M_{кр\max}$	Литровая мощность	Средняя скорость поршня	Скоростной коэффициент	Коэффициент приспособляемости
Рабочий объём и степень сжатия	0,723	0,681	1	0,247	0,288	0,950	0,229
Рабочий объём и отношение S/D	0,946	1	0,197	0,891	0,271	0,315	0,261
Степень сжатия и отношение S/D	0,098	0,07	1	0,272	0,507	0,933	0,194

2.3. Определение закономерности эволюции основных конструктивных параметров

Анализ тенденций развития основных конструктивных параметров проведен на основе временных рядов. Математическое ожидание каждого из трёх конструктивных параметров рассчитаны по ежегодным выборкам дизелей выпущенных с 2001 по 2005 год включительно. Для них и подсчитаны коэффициенты автокорреляции первого и второго порядков, которые измеряют зависимость между соседними годами и через год.

$$r_1 = \frac{\sum_{t=2}^n (y_t - \frac{\sum_{t=2}^n y_t}{n-1}) \cdot (y_{t-1} - \frac{\sum_{t=2}^n y_{t-1}}{n-1})}{\sqrt{\sum_{t=2}^n (y_t - \frac{\sum_{t=2}^n y_t}{n-1})^2 \cdot \sum_{t=2}^n (y_{t-1} - \frac{\sum_{t=2}^n y_{t-1}}{n-1})^2}} \quad (7)$$

$$r_2 = \frac{\sum_{t=3}^n (y_t - \frac{\sum_{t=3}^n y_t}{n-1}) \cdot (y_{t-2} - \frac{\sum_{t=3}^n y_{t-2}}{n-2})}{\sqrt{\sum_{t=3}^n (y_t - \frac{\sum_{t=3}^n y_t}{n-1})^2 \cdot \sum_{t=3}^n (y_{t-2} - \frac{\sum_{t=3}^n y_{t-2}}{n-2})^2}} \quad (8)$$

где y - временной ряд;

n - количество элементов временного ряда;

t - уровень временного ряда.

Поскольку прямым эксплуатационным показателем совершенства дизеля является литровая мощность, то значение коэффициентов автокорреляции дополнительно проанализировано как для неё, так и для других эксплуатационных показателей. Данные расчёта представлены в таблице 4.

Анализ данных таблицы и позволил сделать вывод о наличии в большинстве изучаемых временных рядов линейной тенденции. Для рабочего объёма малолитражного дизеля коэффициенты автокорреляции недостаточно велики, но после логарифмического преобразования нелинейность легко устраняется, и этот временной ряд также хорошо прогнозируется линейной функцией.

Исходные данные и их преобразования к линейным трендам представлены на рис. 2.

Из приведенных данных видно, что прогнозируемые математические ожидания основных конструктивных параметров малолитражных автомобильных дизелей выпуска 2007 года имеют следующие значения:

Таблица 4. Значения коэффициентов автокорреляции

Коэффициенты автокорреляции	Для основных конструктивных параметров и эксплуатационных показателей									
	Рабочий объём	Степень сжатия	Отношение S/D	Номинальная мощность	Максимальный крутящий момент	Частота вращения при $M_{кр\max}$	Литровая мощность	Средняя скорость поршня	Скоростной коэффициент	Коэффициент приспособляемости
r_1	0,125	0,995	0,674	0,611	0,530	0,787	0,996	0,757	0,670	0,106
r_2	0,376	0,996	0,938	0,293	0,518	0,741	1	0,9	0,878	0,997

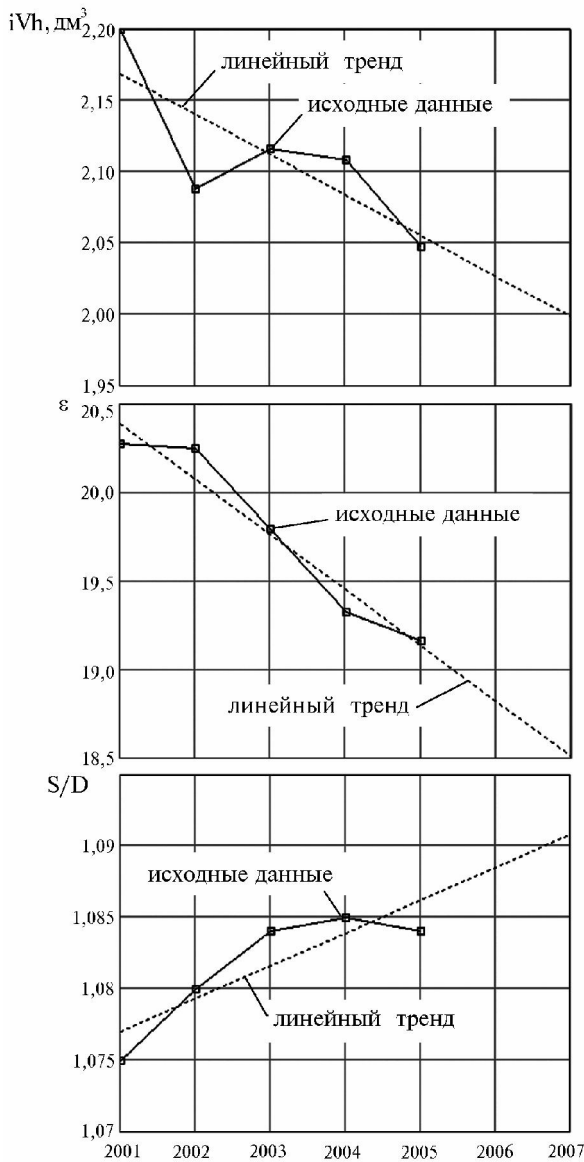


Рис. 2. Математические ожидания основных конструктивных параметров малолитражных автомобилей

- рабочий объём дизеля, dm^3 - 1,998;
- степень сжатия - 18,52;
- отношение S/D - 1,09.

3. Прогнозируемые показатели мирового уровня и общие рекомендации по совершенствованию малолитражных дизелей серии 4ДТНА

Объединение результатов проведенного исследования с результатами исследований [2] позволяет не только дать сравнительную оценку показателей автомобильных дизелей серии 4ДТНА разработки КП ХКБД с аналогичными показателями современных дизелей мирового автомобилестроения, а, самое главное, сделать прогноз их перспективности и выдать рекомендации по достижению этих показателей. В таблице 5 проведено сопоставление эксплуатационных показателей, конструктивных параметров, компоновочных решений, применённой элементной базы для современных дизелей мирового автомобилестроения и для отечественных серии 4ДТНА. Данные таблицы 5 показывают, что уровню современного дизеля соответствуют дизели 4ДТНА1 и 4ДТНА2, а уровню перспективного дизеля - только дизель 4ДТНА2. При этом наиболее значимые конструктивные параметры отечественных дизелей (iV_h и ϵ), закладываемые на этапе проектирования, полностью соответствуют перспективе автомобильного малолитражного дизелестроения, и успех развития конструкции дизеля 4ДТНА2 полностью зависит от совершенства его элементной базы.

Таблица 5. Сравнительный анализ малолитражных автомобильных дизелей

Технико-экономические характеристики, комплектация, конструктивные параметры и эксплуатационные показатели	Марка дизеля			
	Современный дизель (фактический диапазон значений) Перспектива на 2007 год (расчетное значение)	4ДТНА	4ДТНА1	4ДТНА2
Число цилиндров (i)	4	4	4	4
Расположение цилиндров в дизеле	R (рядное)	R	R	R
Рабочий объём дизеля (iV_h), dm^3	$\frac{1,40 - 3,20}{2,00}$	1,99	1,99	1,99
Диаметр цилиндра, мм	73 - 99	88	88	88
Ход поршня, мм	79 - 105	82	82	82
Отношение S/D	$\frac{0,92 - 1,21}{1,09}$	0,93	0,93	0,93
Степень сжатия (ϵ)	$\frac{17 - 22}{18,52}$	17,6	18,0	18,5
Удельная масса дизеля (Gуд), кг/кВт	4 - 2	2,6	2,2	1,85
Конструкция камеры сгорания	<u>НВ и РК</u> Неразделенная камера (НВ)	Вихревая камера (РК)	РК	НВ
Система топливоподачи	Непосредственного действия и аккумуляторные Аккумуляторные (Common Rail)	Непосредственного действия	Непосредственного действия	Common Rail
Способ наполнения цилиндров	Регулируемый турбонаддув (РТ)	Турбонаддув	РТ	РТ
Промежуточное охлаждение воздуха	Охладитель наддувочного воздуха (ОНВ)	Отсутствует	Отсутствует	ОНВ
Количество клапанов на цилиндр	$\frac{2 \text{ и } 4}{4}$	2	2	4
Схема установки распределительных валов	Верхнее расположение распредвала и клапанов (ОНС)	ОНС	ОНС	ОНС
Литровая мощность (N_L), кВт/л	$\frac{25 - 55}{41,36}$	27,7	33,3	40,7
Среднее номинальное эффективное давление (P_e), МПа	$\frac{0,75 - 1,7}{1,27}$	0,83	0,95	1,16
Номинальная мощность (N_e), кВт	$\frac{50 - 121}{82,73}$	55,1	66,2	80,9
Частота вращения при номинальной мощности ($n_{ном}$), min^{-1}	$\frac{3500 - 4500}{3920}$	4000	4200	4200
Максимальный крутящий момент (M_{max}), Н·м	$\frac{124 - 373}{249,3}$	162	177	221
Частота вращения при максимальном крутящем моменте ($n_{кр}$), min^{-1}	$\frac{2750 - 1400}{1880}$	2400	2200	2000
Средняя скорость поршня (C_p), м/с	$\frac{11 - 14}{11,96}$	10,9	11,5	11,5
Скоростной коэффициент (K_p)	$\frac{0,79 - 0,33}{0,48}$	0,6	0,52	0,48
Коэффициент приспособляемости (K_m)	$\frac{1,1 - 1,45}{1,29}$	1,22	1,18	1,20
Удельный эффективный расход топлива (g_e), г/кВт·ч	290 - 240	272	265	245

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