

ПРИРОДНЫЙ ГАЗ – НАИБОЛЕЕ ЭФФЕКТИВНЫЙ ЗАМЕНИТЕЛЬ НЕФТЯНЫХ ТОПЛИВ НА АВТОТРАНСПОРТЕ

**П.М. Канило, профессор, д.т.н., Ф.И. Абрамчук, профессор, д.т.н.,
А.П. Марченко, профессор, д.т.н., И.В. Парсаданов, профессор,
д.т.н., ХНАДУ**

***Аннотация.** Рассмотрены основные аспекты современной топливно-экологической проблемы автомобильного транспорта, перспективы замещения нефтяных топлив альтернативными энергоносителями, в том числе природным газом. Приведены результаты исследований легковых автомобилей по Европейскому городскому ездовому циклу при использовании различных, в том числе газообразных, топлив и дан комплексный анализ экологических показателей автомобильных двигателей с учетом суммарной канцерогенности отработавших газов. Показано, что наиболее эффективным заменителем нефтяных моторных топлив на автотранспорте как с экономической, так и экологической точек зрения является природный газ.*

***Ключевые слова:** нефтяные и синтетические топлива, ароматические углеводороды, отработавшие газы, оксиды азота, канцерогенные углеводороды, бенз(а)пирен, экологические показатели.*

Введение

В настоящее время топливно-энергетические, а также экологические проблемы являются наиболее актуальными и глобальными [1 – 4]. Они связаны с нехваткой и подорожанием энергетических ресурсов, потребности в которых удовлетворяются в основном за счет ископаемых топлив. Именно исчерпание природных ресурсов при условиях их неэффективного использования и ухудшение качества окружающей среды, особенно в крупных городах, являются важнейшими составляющими топливно-экологического кризиса.

Сегодня в мире насчитывается более 800 млн. автомобилей с двигателями внутреннего сгорания (ДВС). За последние 30 лет общее количество автомобилей увеличилось в три раза и их производство постоянно растет. Через 10 лет этот показатель возрастет до 1 миллиарда и топливно-экологическая проблема обострится. Поэтому в ближайшие годы практически всеми странами мира планируется снижение потребления нефтяных моторных топлив на 20 – 30 %.

Из известных ныне путей снижения потребления нефтяных моторных топлив реальное практическое значение имеют два:

- существенное повышение экономичности автомобилей, в том числе применением более совершенных энергоустановок с высокой топливной экономичностью и параметрической надежностью;
- замещение нефтяных топлив (частичное или полное) альтернативными энергоносителями.

К альтернативным энергоносителям автомобильных двигателей необходимо отнести:

- природный газ как наиболее эффективный энергоноситель на переходный период;
- электроэнергию (электромобили);
- биотоплива растительного происхождения;
- синтетические моторные топлива (СМТ), в том числе спиртовые;
- в перспективе водород, который может использоваться как высокоэффективная добавка к горючим смесям, так и в качестве необходимого компонента при производстве СМТ [5].

Анализ топливно-ресурсной проблемы

Мировые ресурсы нефти ограничены, например, для Европы и стран СНГ, включая Российскую Федерацию, двумя десятками лет при постоянном снижении уровней ее добычи и существенном повышении стоимости (табл. 1).

Таблица 1 Ресурсы нефти*

Регионы	Ресурсы, млрд.т	Добыча, млн.т/год	Потребление, млн.т/год	Запас, годы
Северная Америка	7,8	642,5	1132,6	11,9
Латинская Америка	14,8	350,6	223,3	40,7
Европа и страны СНГ	19,2	845	963,3	22
Средний и Ближний Восток	101,2	1208,1	271,3	81
Африка	15,5	467,1	129,3	31,8
Индокитай и страны Тихого океана	5,4	381,7	1116,9	13,8
Украина	-	5	21	-
Мир	163,6	3895	3836,8	40,6

* – BP Statistical Review of World Energy 2007.

Автомобильный транспорт является основным потребителем нефтяных топлив, на получение которых расходуется примерно 80% добываемой нефти. Ресурсных запасов природного газа в Европе и странах СНГ, включая Российскую Федерацию, при современном уровне его потребления, предполагается достаточным примерно на 60 лет (табл. 2).

Таблица 2 Ресурсы природного газа*

Регионы	Ресурсы, млрд.м ³	Добыча, млрд.м ³ /год	Потребл., млрд.м ³ /год	Запас, годы
Северная Америка	7460	750,6	774,5	9,9
Латинская Америка	7020	135,6	124,1	51,8
Европа и страны СНГ	64010	1061,1	1121,9	60,3
Средний и Ближний Восток	72130	292,5	251,0	247
Африка	14390	163,0	71,2	88,3
Индокитай и страны Тихого океана	14840	360,1	406,9	41,2
Украина	1110	18,8	72,9	58,7
Мир	179830	2763	2749,6	65,1

* – BP Statistical Review of World Energy 2007.

Таблица 3 Данные по топливам

Вид топлива (т)	H^P , МДж/кг	Цена, долл/Дж	C_T , кг/ГДж	$\frac{G_{CO_2(i)}}{G_{CO_2(B)}}$, %
Бензин (Б)	44,0	30	19,3	100
Дизельное топливо (ДТ)	42,4	25	20,4	106
Пропан-бутан	45,7	15–20	17,9	93
Природный газ	49,8	6–9	15,1	79
Уголь	17–28	3–4	30,0	160
Метанол	19,7	20–30	19,0	96
Этанол	26,8	30–40	19,9	99
Водород	120,2	8*–100	0	0

Примечание. C_T – удельное содержание углерода в энергетически сравнимой доле топлива; * – водород, производимый электролизом на угольных ТЭС для собственных нужд.

Основными факторами, определяющими долю того или иного вида энергоносителя в общей структуре энергопотребления, являются: технико-экономический потенциал и региональные особенности топливно-энергетического баланса, динамика цен на сырье и топливо на мировом рынке, технический уровень и структура промышленности, энергетики и автотранспорта, а также экологическая ситуация в регионе. При этом потребуются перераспределение энергетических ресурсов по отраслям, в том числе постепенное (частичное) замещение на автотранспорте нефтяных топлив в первую очередь природным газом, а также и другими энергоносителями (рис. 1).

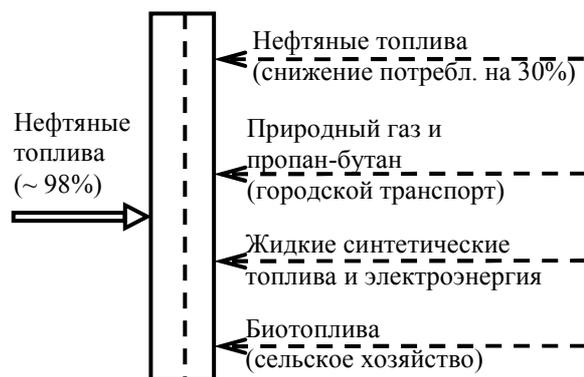


Рис. 1. Замещение нефтяных топлив на автотранспорте альтернативными энергоносителями

Предполагается постепенное снижение уровней потребления природного газа в промышленности и быту с 45 до 30 % за счет внедре-

ния более эффективных энергосберегающих технологий и расширение использования электроэнергии.

В настоящее время значительная часть природного газа потребляется в угольной теплоэнергетике (рис. 2). Дальнейшие перспективы развития теплоэнергетики в разных странах связывают в основном с использованием на тепловых электростанциях (ТЭС) угля, запасы которого весьма велики (табл. 4). Уголь приобретает ключевое значение в формировании топливно-энергетического баланса и в Украине. Он является единственным отечественным топливом, добыча которого может полностью удовлетворить запросы теплоэнергетики. По оценкам Минуглепрома Украины отечественных балансовых запасов углей при годовом объеме добычи 100 млн.т хватит на 400 лет и более [6].

В то же время качество углей, поступающих на ТЭС, значительно ухудшилось. Зольность, например, углей типа антрацитовый штыб возросла с 20 до 30 – 40 %, выход летучих не превышает 6 %, а низшая теплота сгорания понизилась от проектных значений 24 – 25 до 17 – 20 МДж/кг. Поэтому для уменьшения доли потребления природного газа в теплоэнергетике с 30 до 10% необходимо внедрение новейших технологий сжигания низкорейных углей:

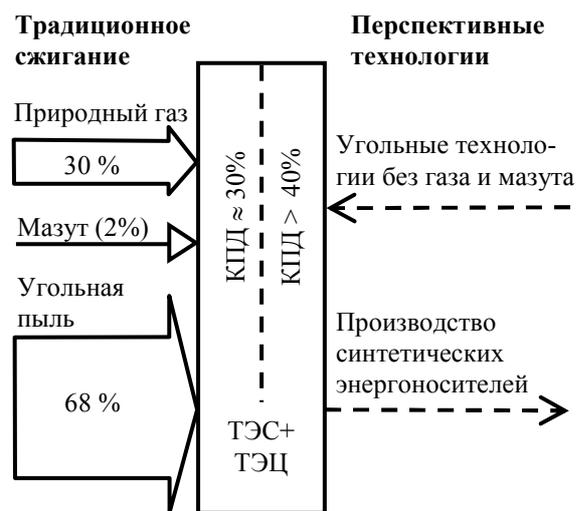


Рис. 2. Топливные проблемы угольной теплоэлектроэнергетики

– энергетических котлов с циркулирующим кипящим слоем [7] и с термохимической подготовкой угольной пыли [8, 9];

– плазменных и плазменно-водородных технологий [6, 9 – 13];

– создание в будущем на базе угольных ТЭС и АЭС энерготехнологических комплексов (рис. 3) с дополнительным производством синтетических газообразных и жидких топлив на основе термохимической переработки низкорейных органических энергоносителей, в том числе углей, с использованием водяного пара, водорода и кислорода, а также электролизных и плазменных технологий [14].

Таблица 4 Ресурсы угля*

Регионы	Ресурсы, млрд. т	Добыча, млн.т н.э./год	Потребл., млн.т н.э./год	Запас, годы
Северная Америка	254,4	615,3	613,9	231
Латинская Америка	19,9	47,3	21,1	269
Европа и страны СНГ	287,1	436,2	537,5	241
Средний и Ближний Восток + Африка	50,3	143,4	109,3	200
Индокитай и страны Тихого океана	296,9	1644,9	1648,1	92
Украина	34,2	40,7	37,4	436
Мир	942,8	2927,8	2967,3	160

* – BP Statistical Review of World Energy 2007; н.э. – нефтяной эквивалент.

В работе [15], в которой дается анализ перспектив развития мировой энергетики, указывается, что при любых прогнозах уже в ближайшие десятилетия потребуются активное внедрение новых источников энергии, в первую очередь расширение водородных и ядерно-технологических комплексов для регионального теплоэнергоснабжения, в том числе с газификацией углей и последующей транспортировкой синтез-газов по существующим газовым магистралям.

Следует особо отметить, что экономический приоритет выбора топлив для автотранспортных средств может определяться только в результате многофакторного системного анализа с учетом динамики развития отдельных составляющих в применении к конкретному региону. Высокие теплотехнические и детонационные показатели природного газа (метана), широкий диапазон изменения концентрационных пределов воспламенения

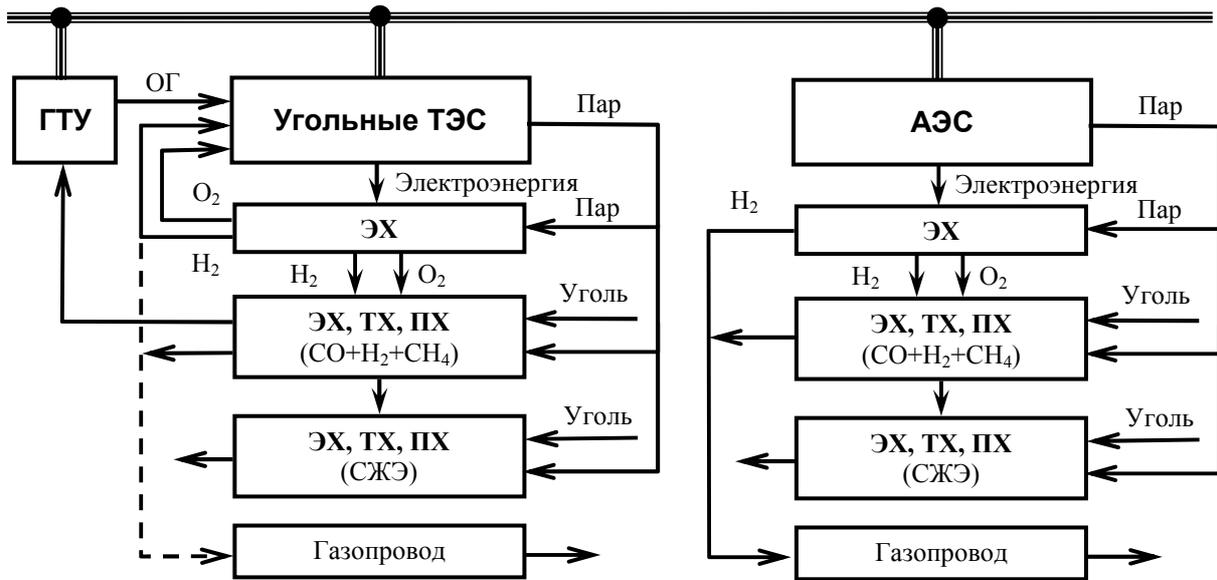


Рис. 3. Угольно-водородно-кислородные энерготехнологические комплексы: ГТУ – газотурбинная установка; ЭХ, ТХ, ПХ – электро-, термо-, плазмохимические циклы; СЖЭ – синтетические жидкие энергоносители

газовоздушных горючих смесей позволяют существенно повысить степень сжатия в ДВС с принудительным, в том числе с форкамерно-факельным воспламенением, реализовать энергетически и экологически высокоэффективное сжигание обедненных газовоздушных смесей (граница воспламенения бедной смеси характеризуется $\alpha_{\text{макс}} = 1,67$ и остается неизменной для всех значений степеней сжатия $\epsilon \leq 16$).

По данным ряда автотранспортных предприятий г. Харькова минимальные затраты по топливным составляющим обеспечиваются при эксплуатации даже традиционных автомобилей с модернизацией бензиновых ДВС для работы на природном газе.

Маршрутный микроавтобус-такси с бензиновым двигателем при эксплуатации по городу расходует в год ~ 16 т бензина (стоимостью ~ 20 тыс. долл.). Микроавтобус-такси с современным высокоэкономичным газовым двигателем (при том же пробеге в условиях города) предположительно будет расходовать не более 17 тыс. м³ природного газа, стоимостью ~ 6 тыс. долл. (при цене сжатого газа ~ 0,35 долл./м³). Годовая экономия только по топливу составит не менее 10 тыс. долл., с учетом разницы в стоимости автомобилей (~ 4 тыс. долл.) и без учета существенного снижения экологического ущерба от вредно-

го воздействия отработавших газов при эксплуатации автомобилей с газовым двигателем.

Эффективное использование природного газа в городском автотранспорте возможно при обеспечении следующих условий:

- существенное снижение стоимости и эксплуатации газонаполнительных компрессорных станций, а также их расположение в черте города;
- уменьшение массы и стоимости газобаллонной аппаратуры;
- создание или приобретение лучших мировых образцов автомобилей с газовыми двигателями с повышенной (не менее чем на 20 %) эксплуатационной топливной экономичностью.

Программа перевода части городского автомобильного транспорта на природный газ должна быть для конкретного региона экономически обоснованной, осуществляться как на государственном (что очень важно), так и региональном (что более реально) уровнях, а также на основе международного сотрудничества.

Анализ экологической проблемы

Автотранспорт является не только энергоемким потребителем материальных ресурсов, в том числе нефтяных топлив, но и опреде-

ляющим в экологическом (термическом, химическом, физическом, акустическом и т.д.) загрязнении окружающей среды, особенно атмосферы крупных городов. При этом интегральные токсические показатели автомобильных двигателей в значительной степени определяются их эксплуатационной топливной экономичностью, параметрической надежностью и качеством используемых топлив, в том числе их энергетическими показателями, уровнями содержания углерода, водорода, тяжелых металлов, ароматических углеводородов, серы и других элементов [1, 3, 5]. В табл. 3 приведены некоторые экологические, энергетические и стоимостные показатели для традиционных нефтяных моторных и альтернативных топлив, в том числе пропана и природного газа. Из таблицы следует, что использование природного газа позволяет снизить уровень выбросов CO₂ автомобильными двигателями не менее чем на 20 %.

Анализ загрязненности атмосферы городов с интенсивным автомобильным движением показал, что наиболее опасными по степени воздействия на организм человека являются оксиды азота (NO_x) и канцерогенные углеводороды (КУ). Их доля при оценке экологической опасности автомобильных двигателей составляет 95 % и более [1, 3, 5, 16]. Особенно опасны их производные – нитроканцерогенные вещества, обладающие, как следствие явлений синергизма, мутагенными свойствами. Именно БП, среди выделенной учеными приоритетной группы КУ, обладает наибольшим индексом канцерогенной агрессивности (ИКА) и для него установлена среднесуточная предельно допустимая концентрация в атмосфере городов [ПДК_{БП}]_{cc} = 10⁻⁶ мг/м³. Определена корреляционная зависимость между удельными уровнями выбросов с ОГ двигателей БП ($m_{БП}$) и составляющими приоритетной группы КУ ($m_{КУ}$) с учетом их ИКА: $\Sigma(m_{КУ} \cdot ИКА) = 1,3m_{БП}$, г/км [3]. Немецкая транспортная ассоциация на протяжении последних лет формирует так называемый экологический рейтинг автомобилей по критериям, отражающим степень вредного воздействия на здоровье человека отдельных составляющих ОГ. На первое место она ставит КУ. По мнению медиков, именно их доля в риске возникновения злокачественных опухолей составляет в больших городах ~ 85 %. Федеральное ведомство по охране ОС, разделяя эти оценки, способ-

ствовало тому, что правительством ФРГ была сформулирована задача: в ближайшие годы уменьшить, обусловленные автотранспортом, выбросы канцерогенов на 90 % [17]. Современные отечественные моторные топлива, производимые из нефти по новым технологиям, характеризуются повышенным содержанием АУ, что приводит при их использовании к существенному росту уровня выбросов NO_x и БП, а также твердых частиц с ОГ автомобилей с дизелями [5], т.е. к повышению канцерогенно-мутагенной агрессивности ОГ и интегральной эколого-химической опасности автомобилей.

Усредненные данные оценки выбросов NO_x и БП с ОГ двигателя легкового автомобиля, работающего на бензинах с различным содержанием АУ и пропан-бутане, при испытании по Европейскому ездовому циклу приведены в [19, рис. 2].

Интегральные показатели эколого-химической опасности по результатам испытаний автомобилей определялись по формуле

$$(\text{ЭХО})_B = 10^3 \left\{ \sum_{i=1}^3 k_i \frac{m_{i(B)}}{[i]_{cc}} \right\},$$

а нормативно допускаемые показатели по формуле

$$[\text{ЭХО}]_B = 10^3 \left\{ \sum_{i=1}^3 k_i \frac{[m_i]_B}{[i]_{cc}} \right\},$$

где i : NO = 0,9NO_x, NO₂ = 0,1NO_x, БП; $[i]_{cc}$ = [ПДК_i]_{cc}, мг/м³; m_i , $[m_i]$ – соответственно удельные реальные и допускаемые уровни выбросов NO_x и БП с ОГ при испытании автомобилей по городскому ездовому циклу; $k_{NO_x} = 3$; $k_{БП} = 4 \cdot 1,3 = 5,2$ – экспертные коэффициенты, оценивающие суммарный эффект усиления воздействия NO_x и БП на человека, в том числе канцерогенно-мутагенного, в условиях ОС.

При этом допустимые уровни выбросов БП с ОГ $[m_{БП}]_j$ определялись из граничных условий для нормируемых NO_x по зависимости

$$k_{NO_x} \left(\frac{0,9[m_{NO_x}]_j}{[NO]_{cc}} + \frac{0,1[m_{NO_x}]_j}{[NO_2]_{cc}} \right) = k_{KV} \frac{[m_{БП}]_j}{[БП]_{cc}}.$$

Результаты численных исследований показали, что эколого-химические показатели ав-

томобильных двигателей при использовании нефтяных моторных топлив с повышенным содержанием АУ не соответствуют даже экологическим требованиям Евро-2.

При использовании автомобилей с современным газовым двигателем уровни выбросов КУ с ОГ будут на один – два порядка ниже чем при использовании бензинов с АУ на уровне 50 – 60 %, а выбросы NOx будут находиться на уровне 0,1 – 0,15 г/км, т.е. практически на уровне требований Евро-3, а возможно и Евро-4. При необходимости выполнения более жестких международных экологических норм можно использовать современные накопительные нейтрализаторы восстановительного типа (для дополнительного снижения уровня выбросов NOx) или нейтрализаторы других типов [1, 17, 18].

Мировой опыт применения природного газа в качестве топлива на автотранспорте

В 60 странах мира на природном газе работает более 3,5 млн. автомобилей, пробег на одной заправке достигает 400 км. Мировым лидером является Аргентина (более 1 млн. автомобилей работающих на природном газе).

В соответствии с планами Европейской экономической комиссии ООН до 2020 года 23,5 млн. автомобилей или приблизительно десятая часть европейского парка машин будет работать на природном газе, главным образом это городские автобусы, микроавтобусы, легковые автомобили, находящиеся в индивидуальном пользовании.

Ежегодное потребление природного газа таким количеством машин составит почти 47 млрд.м³. В Германии перевод автомобилей на использование природного газа является одним из приоритетных направлений энергетического развития и экологической безопасности. К 2010 году количество автомобилей, работающих на природном газе, должно вырасти до 1 млн., к 2020 – до 6,5 млн. и составит более 30% от всего автопарка. Во Франции введен запрет на использование углеводородных топлив (кроме природного газа) на муниципальных автобусах и мусороуборочных автомобилях. В Италии введен запрет на строительство АЗС без блока заправки природным газом.

Заключение

Внедрение на городском автотранспорте газовых двигателей, работающих на природном газе, позволит:

- обеспечить существенный вклад в проблему ресурсосбережения за счет снижения потребления дефицитных нефтяных моторных топлив;
- снизить загрязнение атмосферы городов особо вредными ингредиентами ОГ автомобилей, в первую очередь канцерогенными и нитроканцерогенными составляющими;
- обеспечить значительный экономический эффект в результате снижения затрат на топливо и на возмещение экологического ущерба.

Харьковскому областному управлению по энергетике, транспорту и ресурсосбережению необходимо (с привлечением ученых и специалистов) провести аудит по энергетическим ресурсам области и подготовить долгосрочный план поэтапного снижения потребления нефтяных топлив автотранспортом, а также природного газа в стационарной энергетике, промышленности и быту. Целесообразно по согласованию с рядом городских автотранспортных предприятий, в том числе с частными, приобрести определенное количество самых современных образцов автомобилей с газовыми двигателями и мобильные газонаполнительные компрессорные станции. Предоставить этим предприятиям кредиты и ряд значимых льгот, а в перспективе организовать в г. Харькове производство газовых двигателей и модернизацию автомобилей для эффективного использования природного газа.

Положительные результаты харьковского эксперимента по применению природного газа в городском автотранспорте будут способствовать распространению газовых двигателей и газомобилей в других регионах Украины.

Литература

1. Канило П.М., Бей И.С., Ровенский А.И. Автомобиль и окружающая среда. – Харьков: Прапор. – 2000. –304 с.
2. Мэлор Стуруа, Чайка Ф., Лесков С. Жизнь после нефти: альтернативные источники

- энергии. – www.inauka.ru. – Известия науки. – 22.03.2007. С. 1 – 4.
3. Канило П.М., Костенко К.В., Сарапина М.В. Эколого-экономический анализ эффективности использования газообразных энергоносителей на автомобильном транспорте // Автомоб. транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2007. – Вып. 21. – С. 98 – 107.
 4. Марченко А.П., Парсаданов И.В. Проблемы экологизации двигателей внутреннего сгорания // Двигатели внутреннего сгорания. – Харьков: НТУ «ХПИ». 2005. – №2. – С. 3 – 8.
 5. Канило П.М., Шадрин М.В. Анализ эффективности и перспектив применения водорода в автомобильном транспорте // Пробл. машиностроения. – 2006. – № 2. – С. 154 – 159.
 6. Канило П.М., Ваврив Д.М., Соловей В.В. и др. Технологии сжигания низкосортных углей в энергоустановках без дополнительного использования мазута или природного газа // Пробл. машиностроения. – 2007. – Т.10. – № 1. – С. 91 – 98.
 7. Корчевой Ю.П., Майстренко А.Ю., Топал А.И. Экологически чистые угольные технологии. – Киев: Наук. думка. – 2004. – 187 с.
 8. Дунаевская Н.И. Влияние термохимической подготовки на свойства высокозольного антрацита при его факельном сжигании: Дис. ... канд. техн. наук. – К., 1999. – 190 с.
 9. Ольховский Г.Г., Тумановский А.Г. Применение новых технологий при техническом перевооружении угольных ТЭС // Теплоэнергетика. – 2003. – № 9. – С. 7 – 18.
 10. Кукота Ю.П., Бондзик Д.Л., Дунаевская Н.И., Чернявский Н.В. Плазменный поджиг высокозольных антрацитов при их факельном сжигании // Пром. тепло-техника. – 2004. – № 4. – С. 146 – 151.
 11. Мессерле В.Е., Аскарлова А.С., Устименко А.Б., Карпенко Е.И. Оптимизация процесса сжигания энергетических углей с использованием плазменных технологий // Теплоэнергетика. – 2004. – № 6. – С. 60 – 65.
 12. Kanilo P.M., Kazantsev V.I., Rasyuk N.I. Microwave plasma combustion of coal. // Fuel 82. – 2003. – P. 187 – 193.
 13. Канило П.М., Ваврив Д.М., Костюк В.Е. и др. Альтернативные технологии сжигания низкорекреационных углей в теплоэнергетических установках без дополнительного использования мазута или природного газа // Авиационно-косм. техника и технология. – 2006. – № 10(36). – С. 82 – 90.
 14. Канило П.М., Соловей В.В., Костюк В.Е., Костенко К.В. Водород в двигателях газотурбинного типа и энерготехнологических установках / Пробл. машиностроения. – 2007. – Т.10, № 4. – С. 26 – 32.
 15. Пономарев-Степной Н.Н. Атомная энергия и энергетическая безопасность // Атомная энергия. – 2006. – Т.101. – Вып. 4. – С. 247 – 254.
 16. Парсаданов И.В. Повышение качества и конкурентоспособности дизелей на основе комплексного топливно-экологического критерия. – Харьков: Издат. центр НТУ «ХПИ», 2003. – 244 с.
 17. Петров Р.Л. Германия: Экологический рейтинг автомобилей // Автомоб. пром-сть. – 2001. – № 7. – С. 35 – 39.
 18. Лямда-зонд «широкого профиля» // За рулем. – 2002. – № 3. – С. 93.
 19. Канило П.М., Костенко К.В., Сарапина М.В. Пути улучшения экологических показателей автомобилей при использовании высокоароматизированных нефтяных топлив // Автомоб. транспорт. – Харьков: ХНАДУ. – 2008. – Вып. 22. – С. 31 – 37.
- Рецензент: Н.Я. Говорущенко, профессор, д.т.н., ХНАДУ.
- Статья поступила в редакцию 17 января 2008 г.