

УДК 621.43.052

*А.П. Марченко, д-р техн. наук, В.А. Петросянц, канд. техн. наук,  
А.А. Прохоренко, канд. техн. наук, Д.Е. Самойленко, канд. техн. наук  
Д.В. Мешков, инж.*

## ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ ВНУТРЕННЕГО РЕГУЛИРОВАНИЯ ТУРБИНЫ ТКР АВТОТРАКТОРНОГО ДИЗЕЛЯ

### Постановка проблемы

Известно, что работа транспортного двигателя характеризуется большим количеством переходных и долевых режимов работы. При этом, у ДВС со свободным турбокомпрессором характеристики поршневого двигателя и лопаточных машин согласованы в узком диапазоне расчетных режимов (например, номинальной мощности либо максимального крутящего момента), доля которых в эксплуатации не превышает 15%. Изменение режима работы двигателя приводит к рассогласованию характеристик поршневого ДВС и свободного ТКР, что влечет за собой ухудшение показателей токсичности, снижение экономичности и приемистости силовой установки. Теория и

практика свидетельствуют о том, что регулирование поршневой части и системы турбонадува позволяет значительно улучшить технико-экономические характеристики двигателя во всем диапазоне эксплуатационных режимов его работы [1].

В настоящее время среди систем регулирования турбонадува наибольшее распространение получили комбинированные схемы, включающие турбокомпрессор и вспомогательный агрегат, а также различные методы внешнего и внутреннего регулирования ТКР. При этом известно, что системы внутреннего регулирования турбины постепенно вытесняют конструкции турбокомпрессоров с перепуском газа в обход турбины.

*І.В. Рикова, канд. техн. наук*

## ХІІ МІЖНАРОДНИЙ КОНГРЕС ДВИГУНОБУДІВНИКІВ

Тринадцятий Міжнародний Конгрес двигунобудівників відбувся з 14 по 19 вересня 2008 року за традицією на базі спортивно-оздоровчого табору «Ікар» Національного аерокосмічного університету ім. Н.Е. Жуковського «ХАІ».

Учасниками конгресу стали 205 представників 62 організацій з Харкова, Запоріжжя, Києва, Миколаєва, Луганська, Донецька, Дніпропетровська, Одеси, Херсона, Москви, С.-Петербурга, Самари, Казані, Пермі, Рибінська, Уфи, Тугасво, Алмати. В 7 секціях конгресу було представлено 282 доповіді.

На секції «Поршневі двигуни внутрішнього згорання» було заслухано 36 доповідей, основна увага в яких була приділена поліпшенню паливної економічності, зниженню шкідливих викидів з відпрацьованими газами, використанню альтернативних енергоносіїв, удосконаленню систем двигунів і підвищенню їхньої надійності.

Особливий інтерес на секції викликали доповіді авторів з Національного університету кораблебудування ім. адмірала Макарова Н.І. Радченко, О.А. Сироти, А.Н. Радченко, А.А. Андрєєва, присвячені тепловикористовуючим системам охолодження повітря суднових малооборотних дизелів, Крайнюка О.І., Крайнюка А.О., Брянцева М.А., Кашуби В.І. зі Східноукраїнського національного університету про можливість підвищення ефективності повітряних холо-

дильних установок і розробці математичної моделі режимів спільної роботи складених агрегатів газової холодильної машини з каскадним обмінником тиску, Марченка А.П., Турчина В.Т., Пильова В.О., Шпаковського В.В. з Національного технічного університету «ХПІ», присвячені проблемі прогнозування ресурсу поршнів швидкохідних форсованих дизелів.

Уперше в роботі секції була апробована практика представлення основних результатів дисертаційних досліджень на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук. Заступник генерального конструктора по науково-дослідній роботі КП «ХКБД» Грицюк О.В. виступив з доповіддю «Науково-технічні основи розробки малолітражного дизеля з високими паливно-екологічними показниками», доцент Східноукраїнського національного університету Полив'янчук А.П. представив доповідь «Наукові основи підвищення ефективності визначення викидів твердих часток з відпрацьованими газами дизелів», завідувач кафедри ливарного виробництва Національного технічного університету «ХПІ» Акімов О.В. зробив доповідь «Наукові основи й методи комп'ютерно-інтегрованого ресурсного проектування литих блоків-картерів ДВЗ». Така практика сприяє широкому ознайомленню наукової громадськості з результатами дисертаційних досліджень і одержала схвалення в учасників Конгресу.

Можно выделить два конкурирующих способа управления потоком газа через турбину: сопловое регулирование в конструкциях турбин с сопловым аппаратом и регулирование в конструкциях ТКР с безлопаточными направляющими аппаратами - за счет изменения площади эффективного проходного сечения улитки турбины. Эффективность соплового регулирования и его влияние на показатели рабочего процесса достаточно изучены, однако основным недостатком этого метода является высокая стоимость таких ТКР, которая обусловлена наличием сложного и малонадежного механизма поворота сопловых лопаток. Регулирование же в ТКР с безлопаточным направляющим аппаратом (БНА) является конструктивно более простым, менее дорогим, а значит и более надежным в сравнении с сопловым регулированием ТКР.

#### Обзор последних исследований, объект моделирования

В работах [2-5] представлены результаты расчетного моделирования совместной работы двигателя с различными типами регулирования турбин ТКР. Данные расчетного моделирования позволяют оценить возможность улучшения показателей дизеля при работе по внешней характеристике и сравнить эффективность 2-х способов регулирования турбонаддува: традиционного – соплового и нового – путем изменения площади проходного сечения конца разгонного участка БНА улитки турбины. При сравнении целесообразно применить методику, описанную в источнике [2], которая предполагала сравнение по 2-м параметрам: исходя из максимально достижимой глубины регулирования и по углу наклона кривой, описывающей алгоритм регулирования турбины ТКР. Указанная методика является универсальной и может быть использована для оценки эффективности любых способов внутреннего (качественного) регулирования турбины ТКР.

Объект моделирования и результаты расчетных исследований по влиянию соплового регулирования на показатели рабочего процесса дизеля СМД-23 типа 4ЧН 12/14 при его работе по внешней характеристике описаны в источниках [2,3], а результаты расчетного моделирования этого же дизеля, но с регулированием БНА в трудах [2,5]. В указанных источниках приведен и порядок проведения расчетных исследований.

#### Цели и задачи исследования

Цель исследования – сравнительная оценка эффективности соплового регулирования и регулирования турбины ТКР с БНА при работе дизеля по внешней скоростной характеристике.

Задачи исследования:

1. Провести сравнительную оценку эффективности традиционного (соплового) и нового способа регулирования (регулирование турбины ТКР с БНА) на основании изменения показателей дизеля в зависимости от глубины регулирования.

2. Провести сравнительную оценку эффективности указанных способов регулирования исходя из угла наклона кривой, описывающей алгоритм регулирования.

Для проведения сравнения по первому фактору выбраны режим с  $Ne = 55$  кВт и  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> и режим максимального крутящего момента. Номинальный режим при этом не учитывался. Для корректного сравнения изменение показателей отслеживается в зависимости от величины  $F_{np}$  – приведенного расхода, который характеризует глубину регулирования. При сопловом регулировании  $F_{np}$ , %:

$$F_{np} = \frac{F_{C_{сеп}} - F_{C_{рег}}}{F_{C_{сеп}}} \cdot 100, \quad (1)$$

где  $F_{C_{сеп}}$  – суммарное проходное сечение серийного соплового аппарата, мм<sup>2</sup>,  $F_{C_{рег}}$  – суммарное проходное сечение соплового аппарата в процессе регулирования, мм<sup>2</sup>.

Аналогично определяется величина  $F_{np}$  при регулировании БНА:

$$F_{np} = \frac{F_{БНА_{сеп}} - F_{БНА_{рег}}}{F_{БНА_{сеп}}} \cdot 100, \quad (2)$$

где  $F_{БНА_{сеп}}$  – серийное проходное сечение конца разгонного участка БНА, мм<sup>2</sup>,  $F_{БНА_{рег}}$  – проходное сечение конца разгонного участка БНА регулируемого ТКР, мм<sup>2</sup>.

Максимально достижимая (с точки зрения возможности совместной работы двигателя СМД – 23 и ТКР) глубина регулирования для ТКР с БНА на режиме с  $Ne = 55$  кВт и  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> составила: – 43%, на режима максимального момента – 24%. При сопловом регулировании турбонаддува на режиме с  $Ne = 55$  кВт и  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> максимальное значение  $F_{np}$  – 42%, на режиме максимального момента – 22%. Такие близкие значения максимальной пропу-

скной способности позволяют сделать достаточно точную оценку эффективности традиционного и нового метода регулирования ТКР.

Оценка эффективности рассматриваемых методов регулирования по углу наклона кривой, описывающей алгоритм регулирования предполагает, сравнение угла наклона кривой алгоритма регулирования в координатах: площадь сечения (суммарного соплового аппарата, либо конца разгонного участка БНА) - частота вращения коленчатого вала дизеля. При этом более эффективным считается тот метод, у которого угол наклона кривой алгоритма регулирования меньше, а значит чувствительность к регулированию выше.

**Результаты исследования**

*Сравнение исходя из глубины регулирования турбины ТКР*

Влияние соплового регулирования ТКР и регулирования в ТКР с БНА на основные показатели рабочего процесса дизеля 4 ЧН 12/14 (СМД-23) при различных значениях глубины регулирования показано на рис. 1, 2.

На режиме работы ДВС с  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ , исходя из рис. 1, 2 видно, что при малой глубине регулирования параметры двигателя с регулируемой турбиной ТКР с БНА значительно лучше, чем при сопловом регулировании турбонаддува. Так, у турбины с серийным сечением БНА из-за более высокого КПД турбины (на 3%) и, как следствие КПД ТКР, удается достичь более высоких значений  $\alpha$ , и индикаторного КПД  $\eta_i$ . Насосных потери, характеризуемые отношением  $p_k/p_r$ , при этом также уменьшаются. Эти факторы в совокупности приводят к улучшению экономичности двигателя на рассматриваемом режиме. Так, в сравнении с сопловым регулированием ТКР экономичность двигателя улучшилась на 12 г/кВт·ч.

С увеличением  $F_{np}$  эффективность обоих способов регулирования становится практически одинаковой, и при достижении максимальной глубины регулирования показатели дизеля с сопловым регулированием наддува несколько улучшаются, хотя и незначительно.

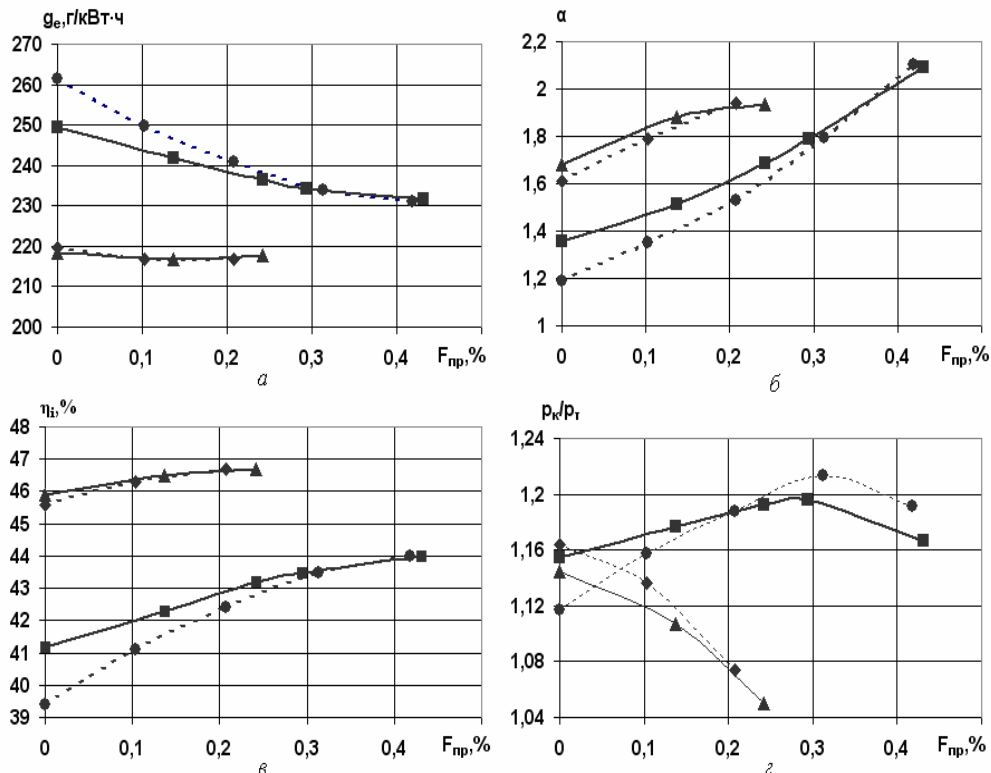


Рис.1. Показатели дизеля СМД-23 при различных способах регулирования ТКР

$N_e = 55 \text{ кВт}, n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  : -●- сопловое регулирование; —■— регулирование БНА  
 $N_e = 106,6 \text{ кВт}, n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  : -◆- сопловое регулирование; —▲— регулирование БНА  
 а,б,в,г – параметры для сравнения при различной глубине регулирования

На режиме максимального крутящего момента показатели двигателя с сопловым регулированием наддува и регулированием ТКР с БНА практически идентичны, небольшое различие обнаруживается только при малых  $F_{np}$ , где параметры дизеля с безсопловым регулированием немного лучше. Так, при очень близких значениях  $\eta_i$  за счет более высокого отношения  $p_k/p_T$  и большего значения  $\eta_{TKP}$  при незначительном увеличении  $\alpha$ , значение  $g_e$  уменьшается на 1 г/кВт·ч. С увеличением глубины регулирования кривые удельного эффективного расхода топлива сливаются для обоих способов регулирования ТКР.

Таким образом, в зоне максимальной глубины регулирования (от 30% и более) эффективность регулирования турбины ТКР с БНА практически не уступает сопловому регулированию. Более того, серийная турбина ТКР с БНА обеспечивает лучшие показатели дизеля в диапазоне от режима при  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  до режима максимального крутящего мо-

мента. Это подтверждается данными [5], где сравниваются характеристики турбин ТКР с БНА и с сопловым аппаратом. При этом показано, что турбины ТКР с БНА имеет более растянутую универсальную характеристику турбинной ступени, а значит более широкий диапазон режимов совместной работы двигателя и ТКР с максимальным КПД турбины.

*Сравнение исходя из угла наклона кривой, описывающей алгоритм регулирования турбины ТКР*

По результатам расчетного исследования были получены рациональные алгоритмы управления элементом регулирования и соответственно сечениями, при которых обеспечивался минимальный  $g_e$  на всех режимах внешней характеристики. Из рис. 3 видно, что зависимость сечения БНА и суммарного сечения соплового аппарата от частоты вращения коленчатого вала дизеля описывается прямой с различным углом наклона. Исходя из рис. 3 можно сделать 2 вывода:

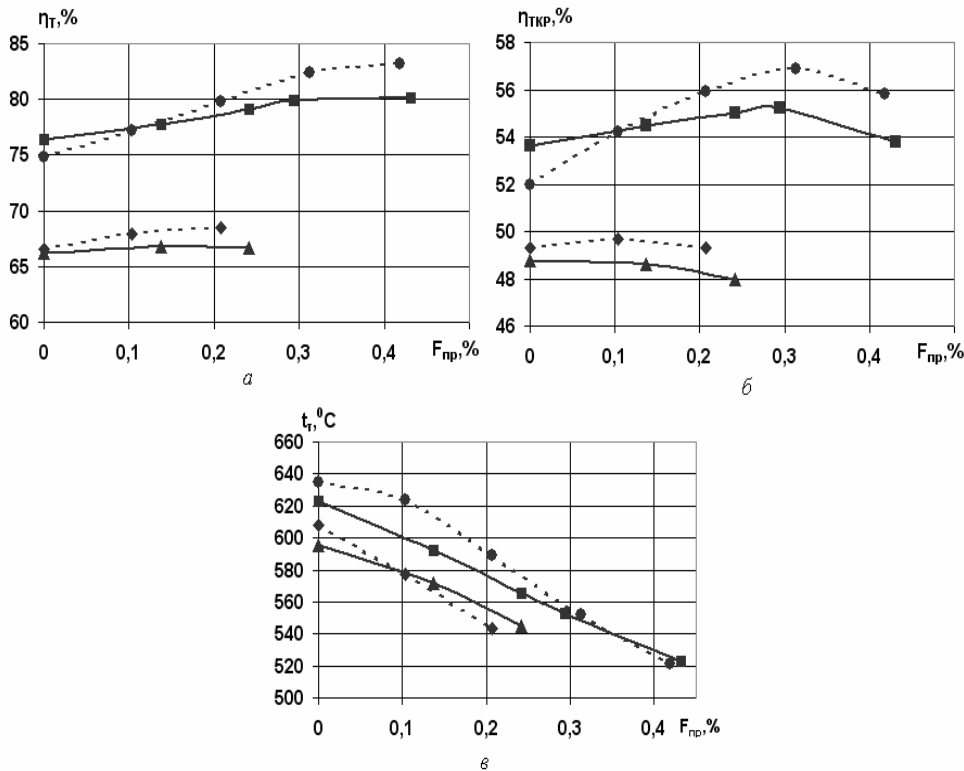


Рис.2. Показатели дизеля СМД-23 при различных способах регулирования ТКР  
 $N_e = 55 \text{ кВт}, n = 1000 \text{ мин}^{-1}$  : -●- сопловое регулирование; —■— регулирование БНА  
 $N_e = 106,6 \text{ кВт}, n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  : -◆- сопловое регулирование; —▲— регулирование БНА  
 а, б, в – параметры для сравнения при различной глубине регулирования

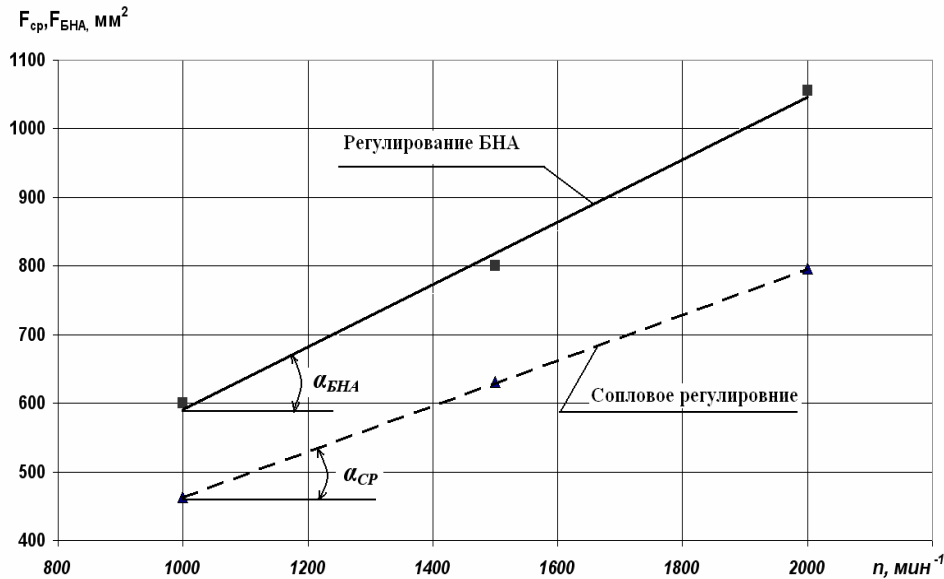


Рис. 3. Алгоритм регулирования турбины ТКР при работе дизеля СМД-23 по внешней характеристике

$$F_{\text{БНА}} = 135,84 + 0,455 \cdot n, \quad \alpha_{\text{БНА}} = 35 \text{ град}$$

$$F_{\text{ср}} = 130,5 + 0,333 \cdot n, \quad \alpha_{\text{ср}} = 30 \text{ град}$$

1. Угол наклона прямой при сопловом регулировании меньше, а значит переход при регулировании, к примеру, с 1800 до 1400 мин<sup>-1</sup> будет сопровождаться меньшим изменением, в сравнении с БНА, суммарного сечения соплового аппарата. Следовательно, сопловое регулирование более эффективно в сравнении с регулированием БНА.

2. Эффективность регулирования БНА не значительно уступает сопловому, поскольку разность между углами незначительна, и составляет всего 5 градусов.

#### Выводы

1. Предложена универсальная методика по оценке эффективности различных способов внутреннего регулирования турбины ТКР. Методика предполагает проводить оценку по 2-м параметрам: исходя из максимально достижимой глубины регулирования и по углу наклона кривой, описывающей алгоритм регулирования турбины ТКР.

2. Сравнительная оценка эффективности применения соплового регулирования и регулирования турбины ТКР с БНА показала, что в зоне максимальной глубины регулирования (от 30% и более) регулирование турбины ТКР с БНА практически не уступает по эффективности сопловому регулированию. Более того, серийная турбина ТКР с БНА обеспечивает лучшие показатели дизеля в диапазоне от

режима с  $n = 1000$  мин<sup>-1</sup> до режима максимального момента.

3. Установлено, что алгоритм регулирования с сопловыми лопатками и путем изменения площади проходного сечения конца разгонного участка турбины с БНА описывается прямой зависимостью, однако угол наклона прямой у ТКР с сопловым регулированием на 5 градусов меньше (30 град), что свидетельствует о незначительном преимуществе соплового регулирования в сравнении с регулированием БНА.

#### Список литературы:

1. Самойленко Д.Е. Улучшение технико – экономических показателей автотракторного дизеля путем регулирования турбонаддува: дис. ... канд. техн. наук: 05.05.03 / Самойленко Дмитрий Евгеньевич. – Харьков, 2008. – 166 с.
2. Марченко А.П. Оценка эффективности применения соплового регулирования для наддува 4-х цилиндрового автотракторного дизеля / А.П.Марченко, Д.Е.Самойленко, В.А.Петросяню // Вестник науки и техники. – 2004. – Вып. 1(16). – С.42 – 51.
3. Марченко А.П. Выбор закона регулирования турбины автотранспортного дизеля / А.П. Марченко, И.В. Парсаданов, Д.Е. Самойленко, В.А. Петросяню, В.Н. Михайлик // Авиационно – космическая техника и технология. – 2005. – Вып.18. – С.54 – 57.
4. Марченко А.П. Влияние регулирования турбокомпрессора с безлопаточным направляющим аппаратом на показатели дизеля 4ЧН 12/14 / А.П. Марченко, В. А. Петросяню, Д.Е. Самойленко // Дви-

гатели внутреннего сгорания. – 2005. – № 1. – С. 35-39. 5. Марченко А.П. Улучшение технико – экономических показателей транспортного дизеля путем регулирования турбокомпрессора с безлопаточным

направляющим аппаратом / А.П. Марченко, В. А. Петросянц, Д.Е. Самойленко и др. // Двигатели внутреннего сгорания. – 2004. – № 1. – С. 3-6.

УДК 621.43.068.4

**П.М. Канило, д-р техн. наук, И.В. Парсаданов, д-р техн. наук**

## АНАЛИЗ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АЛЬТЕРНАТИВНЫХ ТОПЛИВ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

Возрастающие потребности человечества в производстве энергии предопределяют увеличение расхода природных ресурсов и загрязнение окружающей среды. Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) потребляют наиболее значительную долю нефтепродуктов и одновременно являются активным, постоянно действующим фактором химического, механического, теплового и других видов вредного воздействия на окружающую среду. Максимальный ущерб окружающей среде причиняется химическим фактором, связанным с загрязнением атмосферы токсичными веществами, находящимися в отработавших газах (ОГ). Основным потребителем нефтяных топлив является автомобильный транспорт.

Сегодня в мире насчитывается примерно 800 млн. автомобилей с ДВС и их производство постоянно растет. В ближайшее 10 – 20 лет число автомобилей, в первую очередь легковых, возрастет до 1 миллиарда и топливно-экологическая проблема обострится. Поэтому, практически всеми странами мира, планируется снижение потребления нефтяных моторных топлив, включая их замещение альтернативными топливами.

К альтернативным топливам относят топлива, не являющиеся продуктами переработки нефти и традиционные нефтяные топлива, модифицированные различными добавками. Наиболее перспективными альтернативными топливами являются: природный газ; синтетические моторные топлива

(СМТ), в том числе спиртовые; биотоплива, водород, который может использоваться как основное топливо, так и в качестве высокоэффективной добавки к горючим смесям, а также – как необходимый компонент при производстве СМТ, водотопливные эмульсии [1,2,3,4].

**Анализ топливно-ресурсной проблемы.** Согласно прогнозам, мировые ресурсы нефти ограничены, например, для стран Европы, включая Российскую Федерацию, – двумя-тремя десятками лет. Запасов природного газа в указанных странах (при современном уровне его потребления) предположительно должно хватить примерно на 60 лет (табл. 1). Так как природный газ имеет низкую энергетическую стоимость, примерно в 2 раза ниже стоимости современных бензинов (табл. 2), то по имеющимся запасам и стоимости его следует рассматривать в ближайшие десятилетия как одно из наиболее перспективных топлив для автотранспорта, особенно эксплуатируемого в крупных городах [5].

Разведанных запасов углей и сланцев с учетом производства СМТ на Земле хватит на сотни лет. В настоящее время потребительская стоимость энергетических углей (Ц<sub>у</sub>) находится на уровне 6 долл./ГДж, что в среднем почти в пять раз ниже стоимости современных нефтяных топлив. Однако удельная стоимость производства синтетического бензина по традиционным технологиям (рис. 1) пока существенно выше стоимости природного газа, но уже приближается к стоимостям нефтяных топлив [5,6,7].

Таблица 1. Запасы ресурсов (Европа и страны СНГ)

Показатели	Невозобновляемые ресурсы		
	Нефть, млн.т	Природный газ, млрд.м <sup>3</sup>	Уголь, млн.т н.э.
Ресурсы	19000	64010	110000
Добыча за год	845	1061	436
Потребление за год	960	1122	538
Запас, годы	22	60	240

Н.э. – нефтяной эквивалент. Источник. BP Statistical Review of World Energy 2008