

## ПРОБЛЕМЫ И КОНЦЕПЦИИ

УДК 621.432

**Б. П. РУДОЙ****КОНЦЕПЦИЯ РАЗВИТИЯ  
ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ  
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ**

Рассматривается возможность оценки перспектив развития поршневого ДВС и его конкурентоспособность в ряду других мобильных автономных источников энергии. Формулируются основные концептуальные положения, которые позволят на длительный период сохранить его лидирующие позиции как прямого источника механической энергии. *Двигатель; биосфера; кругооборот; конкуренция; перспективы*

**Рудой  
Борис Петрович**

профессор, заведующий кафедрой двигателей внутреннего сгорания. Дипломированный инженер-механик по авиационным двигателям (УАИ, 1963). Аспирантура в УАИ; кандидатская диссертация о нестационарном течении газов в системе «емкость-трубопровод» (защ. в МВТУ им. Баумана, 1970). Доктор технических наук по тепловым двигателям; докторская диссертация о влиянии на газообмен двигателей нестационарных газодинамических процессов (защ. в МВТУ им. Баумана, 1981). Академик Академии транспорта России, член-корреспондент Российской академии естественных наук. Заслуженный деятель науки и техники Российской Федерации, заслуженный деятель науки БАССР. Исследования в области нестационарных гидрогазодинамических процессов, перспективных рабочих процессов ДВС. Автор более 150 научных трудов, 10 учебных пособий. Научный руководитель 17 кандидатов наук.



Техника в руках варваров есть величайшее зло.

Н. В. Тимофеев-Ресовский

**О**пыт промышленной революции XIX века и научно-технической революции XX века показал, что попытка преобразовать биосферу, в которой существует человечество, привела к тому, что могущество человека обернулось глобальным разрушением его природной среды обитания. XX век характеризуется борьбой человечества за комфортные условия жизни. В этой борьбе техника стала главным его оружием. Тепловые двигатели и, в частности поршневые двигатели, стали основным источником энергии для использования в повседневной деятельности человека.

Вооруженное мощной техникой человечество не только душит живое вещество, но и начинает вмешиваться в ход геологических процессов. Тепловые двигатели являются основными потребителями газо- и нефтедобывающей промышленности. По оценкам специалистов, при сохранении существующих темпов извлечения нефти и газа они будут исчерпаны в первой половине XXI века. Таким образом, история использования человечеством нефти и газа, накапливавшихся сотни миллионов лет, становится очень

короткой — немногим более 200 лет. То же может произойти и с другими ресурсами, если человечество не примет другую парадигму развития.

«... Наконец, я хочу указать на следующее: мы привыкли рассуждать о биологической продуктивности Земли главным образом с точки зрения пищевых ресурсов для нас самих. Но ведь биосфера Земли — эта гигантская пищевая фабрика, преобразующая энергию и вещество на поверхности нашей планеты — формирует и равновесный состав атмосферы, и состав растворов в природных водах, а через атмосферу — энергетику нашей планеты. Она же влияет и на климат. Вспомним огромную роль в круговороте влаги на земном шаре испарения воды растительностью, растительным покровом Земли. Следовательно, биосфера Земли формирует все окружение человека. И небрежное отношение к ней, подрыв ее правильной работы будет означать не только подрыв пищевых ресурсов людей и целого ряда нужного людям промышленного сырья, но и подрыв газового и воздушного окружения людей. В конечном счете люди без биосферы или с плохо работающей биосферой не смогут вообще существовать на Земле» [1].

Тепловые двигатели являются основными потребителями на всем жизненном цикле не только ископаемого органического вещества, но и неорганического: металлов и неметаллов. Все это добывается из поверхностного слоя Земли, что может привести и приводит к существенному нарушению равновесия как на ограниченных территориях, так и во всей биосфере Земли.

Естественно, человечество вряд ли откажется от тех разумных благ, которые возникли и будут возникать в результате интеллектуального всплеска последних столетий. Но так же очевидно, что человечество уже не может бездумно использовать свое могущество. По В. Н. Вернадскому, выход возможен в сопряженном эволюционном развитии биосферы и человечества, составляющем суть его учения о ноосфере [2]. Он рассматривает человечество как мощную геологическую силу, переводящую биосферу в новое эволюционное состояние — ноосферу, как особую однородную часть живого вещества биосферы, а научную мысль, открывающую пути и средства преобразования биосферы, как природное и планетарное явление.

Таким образом, из предыдущего следует: необходимо, чтобы науки об искусственных объектах, создаваемые человеком, сопрягались с науками о биосфере. Тем самым добиться гармонизации взаимодействия двух самых мощных сил на планете — живого вещества биосферы и человечества. Критерий гармонизации — сохранение или нарушение равновесия в биосфере. Под равновесием здесь понимается не отсутствие развития, а развитие через состояния равновесия.

Равновесие в биосфере поддерживается кругооборотом жизненно важных веществ (углерода, азота, воды и т.д.). Отсюда следует, что предпочтение должно отдаваться таким искусственным системам и объектам, которые вписываются в естественный кругооборот веществ и преобразование энергии в природе.

Попытаемся с этих позиций оценить перспективы не всей энергетики, базирующейся на тепловых двигателях, а лишь той части, которая нужна для транспорта, средств механизации, мобильной и автономной энергетики. Для этого ряда механизмов в мире выпускается более 200 млн поршневых ДВС (ПДВС) в год мощностью от долей киловатта до десятков тысяч киловатт (судовые двигатели). Несмотря на то, что установленная мощность таких двигателей в 5–6 раз превышает установленную мощность всех электростанций, доля потребляемого ископаемого топлива примерно во столько же раз меньше потребляемого топлива электростанциями. Поэтому проблема первичных неископаемых источников энергии (топлива) для них может решаться специальным образом. Прежде всего необходимо попытаться ответить на главный вопрос: возможно ли вписать всю искусственную систему, связанную с обеспечением жизненного цикла ПДВС (или эквивалентных ему по принципу действия, например, роторно-поршневых), в круговорот энергии и веществ в биосфере без нарушения равновесия в ней. Хотя наука о биосфере интенсивно развивается, существенным поводом к чему послужило прежде всего создание ядерного оружия и те катастрофические последствия для человечества, которые оно привнесло, на поставленный вопрос на современ-

ном уровне ее развития однозначный ответ, по-видимому, дать невозможно. Однако ответить на вопрос, существует ли потенциальная возможность такого вектора развития ПДВС, можно.

Для этого прежде всего необходимо установить, существуют ли эквивалентные (по количеству и качеству) ископаемым топливам (полученным из нефти и газа) топлива, полученные не из ископаемых ресурсов, а из участвующих в кругообороте в биосфере веществ. Кругооборот в биосфере непосредственно осуществляется с участием живой субстанции, т. е. в процессе должны участвовать или животные, или растения, или микроорганизмы. Два важнейших процесса: первый — фотосинтез, осуществляющий усвоение энергии солнца и превращение организмами-автотрофами углерода и воды в органическое вещество; второй — трансформация организмами-гетеротрофами органического вещества в удобный для использования вид топлива. Более чем столетнее развитие ПДВС показало, что наиболее эффективна жидкая форма топлива. Жидкие топлива обладают наилучшим показателем, характеризующим отношением их запасенной энергии к объему топливной системы. Опыт, накопленный в использовании бензина, керосина и дизельного топлива, позволяет сделать заключение, что для сокращения времени замены органического топлива на естественное (не ископаемое), желательно максимально сохранить инфраструктуру, обеспечивающую жизненный цикл ПДВС. Таким естественным топливом может быть этанол, получаемый брожением из растительного сырья. Возможно использование и газового топлива — метана (болотного газа), также получаемого естественным путем за счет брожения (метановое брожение). Брожением может быть получен и водород  $H_2$ . На рис. 1 представлена схема кругооборота веществ и движения энергии в биосфере с включенным в нее ПДВС. Естественно, что человек может и должен на разумной основе вмешиваться в этот процесс: осуществлять отбор организмов — автотрофов и гетеротрофов — для повышения КПД преобразования солнечной энергии в запасенную энергию топлив ( $CH_4$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_5OH$  и др.); создавать условия для необходимой циркуляции; наращивать зеленую массу за счет включения в оборот пустынь; более рационально размещать заправочные станции; создавать условия для самообеспечения топливом в сельских районах и т. д. Можно представить себе заправочную станцию или индивидуальное хозяйство, в миниатюре обеспечивающих кругооборот, представленный на рис. 1.

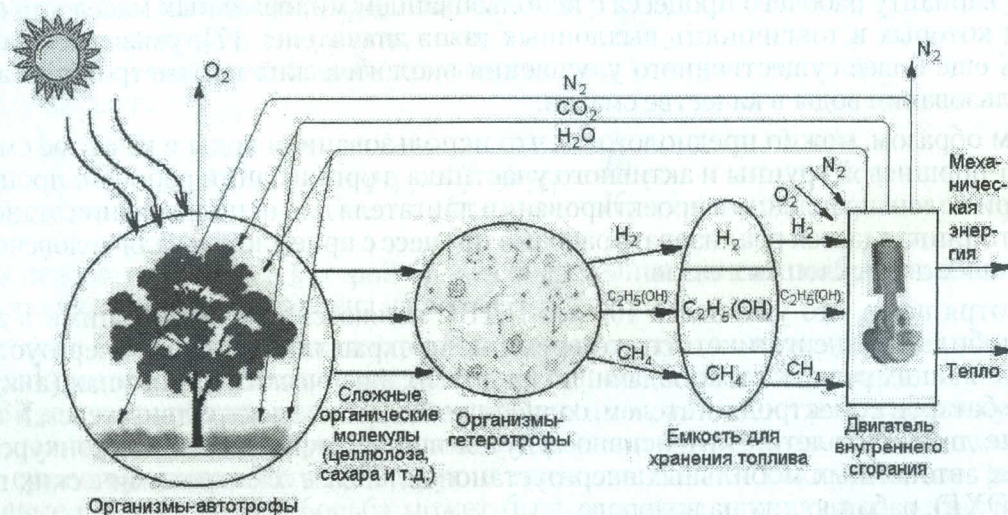


Рис. 1. Схема круговорота вещества и преобразования энергии в биосфере

Если будет обеспечен круговорот вещества в биосфере, то решается проблема основных источников парникового эффекта — углекислого газа и метана. Отпадет необходимость их нормирования, так как сколько их произведется, столько и поглотится.

Остается рассмотреть качество продуктов, выбрасываемых в окружающую среду. Большой проблемой является токсичность выхлопных газов ПДВС. Ее можно рас-

членить на две задачи. Первая связана с неполнотой сгорания сложных органических молекул, входящих в состав современных товарных топлив и смазочных материалов, приводящих к сохранению в выхлопных газах углеводородов  $C_mH_n$  и окиси углерода CO. Вторая обусловлена высокой температурой сгорания в рабочем цикле ПДВС ( $T_{\max} > 1500$  К), приводящей к образованию окислов азота  $NO_x$ .

В настоящее время эту проблему пытаются решить установкой нейтрализаторов выхлопных газов, но они, вследствие специфики их работы, сдерживают совершенствование рабочего процесса ПДВС.

Если в качестве топлива использовать водород, результатом сгорания которого в среде воздуха является вода, использовать в качестве смазки воду, то проблема токсичных углеводородов естественным образом исчезает. Остается проблема окислов азота. Есть основания полагать, что при определенных рабочих соотношениях воздуха и водорода окислы азота практически не образуются [3]. Этого же результата можно добиться снижением максимальной температуры цикла менее 1500 К [4]. Но использование водорода требует решения многих практически важных проблем безопасности и создания новой инфраструктуры для эксплуатации любых энергоустановок.

Поэтому сосредоточим внимание прежде всего на возможности использования этанола.

То, что спирты могут использоваться в двигателях, было известно еще в 1876 г., когда был изобретен двигатель внутреннего сгорания с искровым зажиганием. В 1920 г. выдающимся двигателем Н. Рикардо был сформулирован тезис об использовании топлив, участвующих в кругообороте: «Благодаря применению топлив растительного происхождения (этиловый спирт), человечество получает возможность превращать в энергию движения ежедневно поступающую энергию Солнца, в то время как, используя минеральное топливо, оно вынуждено расходовать свои запасы, которые весьма ограничены» [5]. Опыт Бразилии, с 1975 года широко использующей этанол в автомобильном транспорте [6], шведской компании Scania, приступившей к выпуску этанолового двигателя D9E40A, прошедшего самые жесткие сертификационные тесты California Air Resources Board (CARB), подтверждает перспективность работы по созданию экологически безопасного ПДВС. Выполнение норм CARB ПДВС, работающих по дизельному варианту рабочего процесса с использованием минеральных масел для смазки, вклад которых в токсичность выхлопных газов значителен [7], указывает на возможность еще более существенного улучшения экологических параметров двигателя при использовании воды в качестве смазки.

Таким образом, можно предположить, что использованием воды в качестве смазки цилиндрико-поршневой группы и активного участника в организации рабочего процесса, а также при целенаправленном проектировании двигателя для использования этанола в качестве топлива удастся реализовать рабочий процесс с приемлемым для человечества уровнем качества выхлопных газов.

Несмотря на то, что уже более 100 лет ПДВС являются доминирующими в автономной мобильной энергетике, все это время не прекращались поиски энергоустановок, позволяющих решать те же задачи, но на других физических принципах (аккумуляторные батареи с электродвигателем, солнечные батареи с электродвигателем и т. д.). Последние два десятилетия интенсивно ведутся поиски путей создания конкурентоспособных автономных мобильных энергоустановок на базе электрохимических генераторов (ЭХГ), работающих на водороде.

Как видно из вышеизложенного, единственным весомым аргументом в пользу замены ПДВС другими энергоустановками мог бы быть факт невозможности вписать его в систему кругооборота веществ и преобразования энергии в биосфере. Однако он обладает такой потенциальной возможностью. Поэтому аргументами в конкурентной борьбе различных энергоустановок, вписывающихся в кругооборот веществ и преобразование энергии, могут быть уже их частные преимущества, прежде всего, экономические.

Для того чтобы оценивать перспективность какого-либо объекта в конкурентной борьбе, необходима соответствующая методика. Такая методика может базироваться на следующей основе.

Обратимся к некоторым аспектам теории устойчивости, применив ее к структурной устойчивости [8]. Для этого воспользуемся логистическим уравнением

$$\frac{dX}{dt} = KX(N - X) - BX, \quad (1)$$

где в нашем случае  $X$  — количество двигателей, находящихся в обороте (приведенных к какой-либо мощности);  $N$  — потенциальное количество двигателей, которое общество может содержать;  $K$  — коэффициент, учитывающий производство, отнесенное к одному двигателю в единицу времени;  $B$  — коэффициент, учитывающий снятие двигателей с эксплуатации в единицу времени.

Это уравнение справедливо, если качество двигателей, производство и эксплуатация их с течением времени не меняются. В этом случае ситуация полностью детерминирована (рис. 2).

Количество двигателей перестает расти, когда ресурсы общества исчерпаны. Если же появляется двигатель с иными качественными характеристиками (например, существенно снизился удельный вес), то в рамках выделенных обществом ресурсов число  $N$  может измениться. Также в зависимости от иных параметров двигателя могут меняться значения  $B$  и  $K$ . В связи с этими инновациями (флуктуациями) возникает вопрос о структурной устойчивости: новые двигатели могут вытеснить существующие.

Пользуясь линейным анализом устойчивости, нетрудно показать, что новые двигатели вытеснят старые только в том случае, если

$$N_2 - \frac{B_2}{K_2} > N_1 - \frac{B_1}{K_1}. \quad (2)$$

Последовательность, в которой более совершенные двигатели будут заполнять существующую нишу, представлена на рис. 3.

История развития двигателестроения характеризуется конкуренцией различных типов двигателей: паровых поршневых и роторных, газовых поршневых и роторных, и т. д. В среде поршневых двигателей внутреннего сгорания идет жесткая конкуренция между двухтактными и четырехтактными, искровыми и дизельными. Иногда пытаются занять существующую нишу ДВС другие типы двигателей: газотурбинные, роторно-поршневые (Ванкеля). Эта борьба может быть отражена уточненным логистическим уравнением [9]

$$\frac{dX_i}{dt} = KX_i(N + \sum R^k S^k - X_i) - BX_i. \quad (3)$$

Здесь  $X_i$  — характеризует численность  $i$ -го типа двигателей;  $S_i^k$  —  $k$ -я качественная (или экономическая) функция  $i$ -го типа двигателя;  $R^k$  — коэффициент пропорциональности (весовой коэффициент функции).

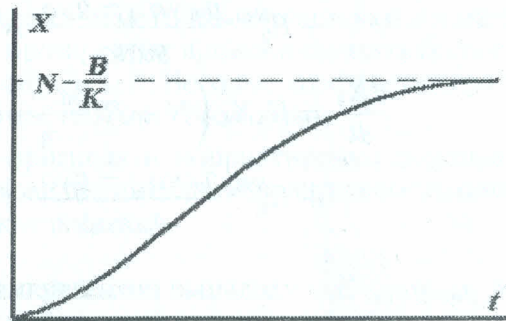


Рис. 2. Логистическая кривая (см. уравнение (1))

Рассмотрим простейший пример качественной (экономической) функции. Пусть эта функция связана с удельными весом  $\gamma$  двигателя следующей зависимостью:

$$S_i^\gamma = \frac{\gamma_0 - \gamma_i}{\gamma_0} N. \quad (4)$$

Смысл ее в том, что в результате снижения удельного веса нового двигателя появляется возможность сэкономить на производстве материалов для  $N$  двигателей. С учетом коэффициента пропорциональности  $R^\gamma$  общество может произвести дополнительное количество двигателей

$$R^\gamma \frac{\gamma_0 - \gamma_i}{\gamma_0} N. \quad (5)$$

Таким образом, если взять два типа двигателей, например, двухтактные и четырехтактные, то конкуренция между ними будет выражаться уравнениями

$$\begin{aligned} \frac{dX_2}{dt} &= K_2 X_2 \left( N + R_2^\gamma \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} N + R_2^{g_{om}} \frac{g_{om} - g_m}{g_{om}} N + \right. \\ &\quad \left. + R_2^{NO_x} \frac{g_0(NO_x) - g_{NO_x}}{g_0(NO_x)} N + \dots + R_2^3 \frac{3_0 - 3}{3_0} N - X_2 \right) - B_2 X_2, \\ \frac{dX_4}{dt} &= K_4 X_4 \left( N + R_4^\gamma \frac{\gamma_0 - \gamma}{\gamma_0} N + R_4^{g_{om}} \frac{g_{om} - g_m}{g_{2m}} N + \right. \\ &\quad \left. + R_4^{NO_x} \frac{g_0(NO_x) - g_{NO_x}}{g_0(NO_x)} N + \dots + R_4^3 \frac{3_0 - 3}{3_0} N - X_4 \right) - B_4 X_4, \end{aligned} \quad (6)$$

где  $\gamma$ ,  $g_m$ ,  $g_{NO_x}$ ,  $3$  — удельные показатели двигателей.

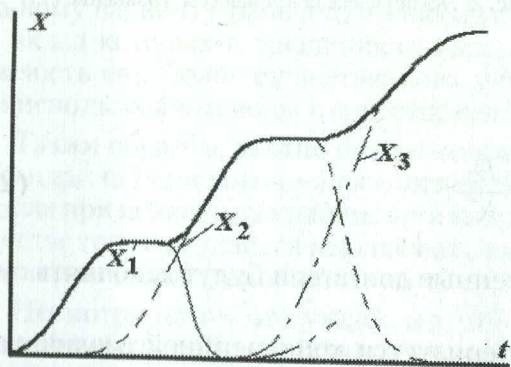


Рис. 3. Последовательность смены типов двигателей во времени

Весовые коэффициенты  $R$  при качественных (экономических) параметрах двигателей непостоянны и меняются в результате как конкурентной борьбы (причем в различных отраслях по-разному), так и общественного законодательства. Особенно резко в последнем десятилетии повысились весовые коэффициенты, связанные с экологическими характеристиками двигателей. Эти законодательные нормы особенно сильно сказались на производстве двухтактных двигателей.

Современные законодательные нормы ограничивают не только загрязнение окружающей среды выхлопными газами и шумом при эксплуатации, но косвенно вводят ограничения и на всех этапах жизненного цикла. Так, устанавливается минимальный пробег автомобильных двигателей, фирмам-производителям вменяется утилизация двигателей (и автомобилей) и т. д.

Анализ уравнений (6) показывает, что в настоящее время двухтактные двигатели без специального продувочного агрегата проигрывают четырехтактным почти по всем показателям, связанным с экологией, из-за больших весовых коэффициентов  $R^k$ .

Если рассмотреть уравнение (6), предположив, что экологические проблемы двухтактных двигателей сведены до уровня четырехтактных (этанол, смазка водой),

окажется, что наиболее перспективным типом двигателей является двухтактный с кривошипно-камерной продувкой и непосредственной подачей топлива в рабочую камеру.

Таким образом, концепция перспективного поршневого двигателя внутреннего сгорания может быть сформулирована следующим образом:

1. Тип двигателя — двухтактный с кривошипно-камерной продувкой и эффективным использованием нестационарных газодинамических процессов в газоздушном тракте.
2. Топливо растительного происхождения (спирт, биогаз и др.).
3. Смазка неорганического происхождения (например, вода).
4. Подача топлива непосредственно в рабочую камеру после завершения газообмена.
5. Двигатель изготавливается из одного материала или таким образом, чтобы различные материалы с минимальными затратами могли отсортировываться.
6. Подавление образования токсичных продуктов непосредственно в рабочей камере.

Совершенствование вычислительной техники и методов имитационного моделирования двигателей [10] наряду с совершенствованием методов компоновки и конструирования позволяет за относительно короткий промежуток времени оценить большинство качественных (экономических) функций двигателей. Весовые коэффициенты при них на ближайший отрезок времени или известны, или прогнозируемы.

Таким образом, появляется возможность прогноза и корректировки перспектив развития как ДВС, так и его конкурентов, а также оценивать перспективность вложения средств в научные и опытно-конструкторские работы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Тимофеев-Ресовский Н. В. Биосфера и человечество // Научные труды Обнинского отдела ГО СССР: Сб. первый. Ч. 1. Обнинск, 1968.
2. Вернадский В. Н. Размышления натуралиста. Кн. 2. Научная мысль как планетное явление. М., 1977.
3. Мак-Лиан В., де Боер П., Фагельсон Д. Водород в качестве топлива для поршневых двигателей // Перспективные автомобильные топлива. М.: Транспорт, 1982. С. 249–267.
4. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей / Под ред. А. С. Орлина, М. Г. Круглова. М.: Машиностроение, 1983. С. 143–144.
5. Ricardo H. R. Engineering. 110, 325 and 361 (1920).
6. Kremer F. G., Fachetti A. Alcohol as automotive fuel — Brazilian experience // SAE Technical Paper Series, 2000.
7. Топливная экономичность автомобилей с бензиновыми двигателями / Ред. Д. Хиллиард, Дж. Спрингер. М.: Машиностроение, 1988.
8. Prigogine J., Herman R., Allen P. The evolution of complexity and the laws of nature // Goalsina Global Community: A Report to the Club of Rome / Ed. E. Laszlo, J. Bierman. Oxford: Pergamon, 1977. V. I.
9. Пригожин И. Н. От существующего к возникающему. М.: Наука, 1985.
10. Система имитационного моделирования «Альбея» (ядро) / Под ред. Б. П. Рудого. Уфа, 1995.