

ДВУХКОНТУРНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА, КАК ТЕХНИЧЕСКАЯ ОСНОВА СОЗДАНИЯ НОВОГО КЛАССА ПОРШНЕВЫХ ДВС

Андрей Олегович Миллер, ведущий специалист ГУАП, Санкт-Петербург

Показано, что применение двухконтурного принципа построения рабочего процесса поршневых ДВС приводит к существенному повышению их эффективных характеристик. Пространство одного рабочего цилиндра поршневого двигателя ограничивает количество возможных направленных воздействий на процессы смесеобразования и сгорания. Особые условия, благоприятно влияющие на характер протекания процесса сгорания топлива, создаются при совместной работе двух цилиндров, в каждый из которых может подаваться смесь различного состава, включая чистый воздух.

It is shown that the use of the two-circuit principle of constructing the working process of piston internal combustion engines leads to a significant increase in their effective characteristics. The space of one working cylinder of a piston engine limits the number of possible directed influences on the processes of mixture formation and combustion. Special conditions that favorably affect the nature of the fuel combustion process are created when two cylinders work together, each of which can be supplied with a mixture of different composition, including clean air.

Ключевые слова: *послойное смесеобразование, качественное регулирование мощности, малотоксичный процесс сгорания, многотопливный поршневой двигатель.*

Keywords: *layer-by-layer mixture formation, high-quality power control, low-toxic combustion process, multi-fuel piston engine.*

По прогнозам фирмы Bosch, в 2030 году примерно 75 % новых легковых автомобилей и малотоннажных грузовиков все ещё будут оснащаться двигателями внутреннего сгорания. Остальные транспортные средства будут оснащаться электрическими или гибридными двигателями, доля которых будет постепенно расти.

В общем объёме расходуемых топлив, а также в выбросах в атмосферу токсических компонентов с отработавшими газами значительная часть приходится на технику, оснащённую двигателями внутреннего сгорания. Поэтому работа по совершенствованию двигателей внутреннего сгорания всех типов должна продолжаться.

Наибольший эффект в повышении эффективных характеристик поршневого ДВС можно ожидать от мер, улучшающих процесс сгорания, затем следует средства, направленные на оптимизацию газообмена и фаз газораспределения и средства, уменьшающие механические потери, как в самих ДВС, так и в трансмиссии транспортных средств.

К факторам, влияющим на эффективность процесса сгорания, относятся конструктивные параметры: (степень сжатия - ϵ , форма и тип камеры сгорания) и режимные параметры: (коэффициент избытка воздуха - α , угол опережения зажигания), способ регулирования мощности, качество и тип смесеобразования, управляемость процесса сгорания.

Те же факторы в существенной степени влияют на выбросы токсичных компонентов с отработавшими газами, которые образуются в процессе сгорания. Рассмотрим некоторые факторы.

Способ регулирования мощности

Теоретически целесообразно с уменьшением нагрузки использовать не дросселирование, а обеднение смеси, то есть качественное регулирование.

В сравнении с дросселированием использование качественного регулирования обеспечивает повышение экономичности от 0 на полной нагрузке (когда дроссель полностью открыт), до 50 % на нагрузках порядка 20 % от полной из-за роста термического КПД [1].

Помимо роста термического КПД, улучшение экономичности при качественном регулировании, определяется так же устранением потерь насосных ходов, уменьшением относительных тепловых потерь в стенке цилиндров, улучшением качества очистки цилиндра, устранением требуемого дросселированием переобогащения заряда на частичных нагрузках и увеличением скорости сгорания заряда.

Поэтому расширение пределов качественного регулирования представляет собой важную задачу для поршневых ДВС с иск-

ровым зажиганием, у которых предел качественного регулирования в редких случаях достигает значений $\alpha = 1,2$.

Качественное регулирование в пределах устойчивого воспламенения топливо-воздушных смесей (ТВС), можно осуществить на основе разделения заряда по составу. Существуют следующие способы разделения заряда:

1. Впрыск топлива;
2. Применение разделённых или полуразделённых камер сгорания и форкамерно-факельного зажигания;
3. Турбулизация ТВС;
4. Подача ТВС различного состава в процессе впуска при совместной работе двух цилиндров;
5. Комбинация перечисленных способов.

Разделение заряда должно достигаться простыми техническими решениями, так как значительное усложнение конструкции двигателя будет неприемлемо для серийного производства.

При прямом впрыске топлива (GDI) качественное регулирование обеспечивается во всем диапазоне нагрузок. Однако при этом на смесеобразование отводится меньше времени, чем при внешнем смесеобразовании (карбюрировании), что приводит к недоиспользованию воздуха и другим проблемам:

"В отличие от обычных двигателей с впрыском топлива через форсунку во впускном трубопроводе (PFI), которые смешивают топливо и воздух перед впрыском в цилиндры двигателя, технология GDI предусматривает распыление топлива непосредственно в цилиндры, что позволяет повысить степень сжатия. В результате двигатели GDI достигают более высокой эффективности сгорания по сравнению со своими аналогами PFI, что приводит к повышенной экономии топлива и, следовательно, сокращает выбросы CO_2 до 14 %.

Доля рынка автомобилей в США, оснащённых двигателями GDI, увеличилась с 2,3 % в 2008 модельном году до 51 % в 2018 модельном году. Агентство по охране окружающей среды США (EPA) прогнозирует, что 93 % автомобилей в США будут оснащены двигателями GDI к 2025 году.

Но кроме выбросов CO_2 имеются и другие показатели токсичности отработанных газов. Подобно дизельным двигателям, прямой впрыск топлива в двигателях GDI создает богатые топливом карманы вблизи зоны впрыска, и особые условия сгорания в этих карманах способствуют образованию углеродистых твердых частиц и особенно черного углерода. Следовательно, двигатели GDI выделяют большее количество черного углерода, чем двигатели PFI, что было подтверждено несколькими лабораторными исследованиями.

Сильный поглотитель солнечной радиации, черный углерод проявляет значительное влияние на потепление климата и увеличение его выбросов будет способствовать изменению климата, особенно в городских районах, воздействие которого будет значительно превышать преимущество, связанное со снижением выбросов CO₂ [2].

Реализовать преимущества качественного регулирования возможно при условии, что бедные смеси сгорают так же эффективно, как смесь с $\alpha \approx 1$. Учитывая, что рост экономичности возможен на всех нагрузочных режимах, практически любое техническое решение по расслоению смеси может дать эффект в какой-то части нагрузочных режимов. Для реального двигателя этого недостаточно. Необходимо снижение расхода топлива во всем диапазоне частичных нагрузок.

Имеется целый ряд предложений и опытных ДВС, ставящих целью расширить пределы качественного регулирования.

Все предложения строятся на основе разделения рабочего заряда по составу (послойного смесеобразования). При этом часть заряда вблизи свечи зажигания, для поддержания высоких скоростей сгорания на частичных нагрузках, должна иметь постоянный (примерно стехиометрический) состав смеси. Другая часть заряда является воздухом. Для осуществления полного и быстрого сгорания целесообразно иметь скачкообразное изменение концентрации топлива при переходе от горячей смеси к воздуху, то есть иметь минимальную толщину пограничного слоя.

На режиме полной нагрузки состав смеси должен быть однородным, без чего неизбежно увеличение расхода топлива или снижение максимальной мощности. В полной мере осуществить процесс сгорания по изложенной рациональной схеме не удастся.

Коррективы в данную схему вносит форкамерно-факельное зажигание, обеспечивающее высокие скорости сгорания обедненных смесей и расширение пределов качественного регулирования до коэффициента избытка воздуха $\alpha = 1,5...1,6$ благодаря воспламенению бедных смесей факелом горячей богатой смеси из форкамеры двигателя.

Компания Honda в 1972 году запустила в серийное производство двигатель CCVC с послойным смесеобразованием и форкамерно-факельным зажиганием, который мог работать при значениях α до 1,5 [3].

Двигатель выпускался до начала 1990 х годов и был заменен новым двигателем VTEC-E без форкамерно-факельного зажигания, у которого послойное смесеобразование достигалось применением многоклапанной головки цилиндров, варьируемого клапанного газораспределения и благодаря интенсивному завихрению заряда в камере сгорания. Таким образом, можно сделать вывод о том, что форкамерно-факельное зажигание не смогло обеспечить дальнейший рост эффективных характеристик и от него отказались [4].

Однако такой вид зажигания применяется до сих пор [5]:

"В современных двигателях Формулы 1 применяется технология Turbulent Jet Ignition (турбулентного реактивного зажигания) разработки компании Mahle, которая позволяет сжигать в моторах чрезвычайно бедную смесь и получать большую мощность на выходе. Топливо-воздушная смесь получается очень однородной и сгорает максимально эффективно: тепловая эффективность достигает 47 %.

Технология Turbulent Jet Ignition позволяет решить целый ряд вопросов - экономить топливо, при таком зажигании в атмосферу выбрасывается гораздо меньше оксида азота и твердых частиц. Относительно богатая смесь может подаваться лишь в предварительную камеру. Большая доля топливоздушной смеси чрезвычайно бедная, что серьезно повышает КПД. Зажигание смеси в основной камере происходит одновременно сразу в нескольких точках плазменными струями, пробивающими смесь насквозь. Благодаря этому обеспечивается равномерность горения и снижение детонации. Воспламенение происходит не в центре цилиндра, как на обычных моторах, а направленно - сверху вниз. Это же способствует более эффективному последующему наполнению

камеры. Как результат - большая мощность при максимальной топливной экономичности и экологичности. Массовое появление системы Turbulent Jet Ignition на моторах обычных граждан произойдет в ближайшие годы".

Следует отметить, что применяемые на современных автомобильных двигателях системы послойного смесеобразования обеспечивают устойчивое воспламенение и быстрое сгорание бедных смесей только на режимах малых нагрузок и низких частот вращения.

Поэтому необходимо расширять диапазон эффективного сжигания бедных смесей до более высоких показателей среднего эффективного давления P_e .

Турбулизация

В работе [6] было впервые обосновано деление процесса сгорания на три фазы, принятое сейчас в теории ДВС.

Первая фаза - зажигание и зарождение начального очага горения. Скорость сгорания зависит от нормальной скорости пламени, и, следовательно, от физико-химических свойств топлива. В этой фазе крупномасштабная турбулентность не влияет на скорость сгорания, так как вихри могут перенести очаг воспламенения лишь как целое, не искривляя его поверхности.

Увеличить скорость сгорания обедненной смеси в первой фазе сгорания можно лишь незначительно путём лучшей очистки зоны свечи от продуктов сгорания, интенсификации искры, углубления электродов свечи в тело головки цилиндров и ликвидации тем самым крупномасштабной турбулентности в зоне очага начального горения [7].

Во второй фазе очаг пламени становится большим, он искривляется крупномасштабными вихрями и даже разрывается или на несколько новых очагов, что способствует ускорению сгорания.

Усиление турбулизации заряда во второй фазе сгорания ускоряет выделение тепла в этой фазе, делает подвод тепла более выгодным с термодинамической точки зрения, увеличивает термический КПД рабочего цикла.

В третьей фазе происходит догорание топлива за фронтом пламени, а также в пристеночных и "защемленных" объемах камеры сгорания. При этом вновь доминирующее влияние оказывают законы мелкомасштабной турбулентности.

Наиболее существенное влияние на характер протекания процесса сгорания оказывают турбулентные пульсации свежего заряда, которые возникают в цилиндре двигателя в процессе газообмена и не затухают до момента поджигания заряда.

Когда вихревое движение заряда создается на такте всасывания посредством применения винтового или тангенциального впускного канала или тангенциального направления продувочных окон в двухтактных двигателях, то от начальной кинетической энергии вихреобразования, полученной в процессе всасывания к концу развитого горения, сохраняется лишь около 4 % [8].

Однако этот способ создания завихрения в цилиндре является основным для современного двигателестроения.

Период создания турбулентных пульсаций целесообразно сместить с такта впуска на конец сжатия. При этом сокращается время между созданием и использованием вихрей и, следовательно, могут быть уменьшены энергетические затраты на создание вихря [9].

Использование вытеснителя на днище поршня в качестве генератора турбулентных пульсаций смеси в камере сгорания так же обеспечивает максимальные скорости течения газа в зоне порожка вытеснителя на участках 12...15° угла поворота коленчатого вала до и после ВМТ, то есть в наиболее целесообразный период рабочего процесса [10].

Важным эффектом от создания интенсивного вихря в камере сгорания является сокращение периода видимого сгорания топлива [11]. Данный эффект обеспечивает многотопливность двигателя, то есть возможность сгорания низкооктановых видов топлива при высокой степени сжатия (с более высокой экономичностью и литровой мощностью) без детонации.

На первом этапе развития авиации самолеты оснащались

поршневыми ДВС, которые затем были практически полностью вытеснены турбореактивными двигателями - ТРД, процесс совершенствования которых, в свою очередь, привел к созданию двухконтурного турбореактивного двигателя - ТРДД.

Главное достоинство ТРДД заключается в возможности создания большей тяги и лучшей экономичности, по сравнению с ТРД.

Применение двухконтурного принципа построения рабочего процесса поршневых ДВС так же приводит к существенному улучшению их характеристик.

Пространство одного рабочего цилиндра ограничивает количество возможных направленных воздействий на процессы смесеобразования и сгорания. Особые условия, благоприятно влияющие на характер протекания рабочего процесса, создаются при совместной работе двух цилиндров, в каждый из которых может подаваться смесь различного состава, включая чистый воздух.

Работы по таким двигателям в нашей стране проводили В.М. Кушуль и А.И. Костин с участием специалистов НПО им. Климова (Ленинград), СКБ Зид (завода им. В. А. Дегтярева, Ковров), ВНИИМотопрома (Серпухов) и др.

На рис. 1 представлен поперечный разрез автомобильного

четырехтактного двигателя Кушуля - ДК-6. Рабочий процесс этого двигателя осуществляется в двух цилиндрах, постоянно сообщенных между собой с помощью канала. Камеру сгорания имеет только один из них - левый цилиндр № 1. Поршень правого цилиндра (№ 2) с минимально допустимым зазором подходит к головке цилиндра и вытесняет весь воздушный заряд в первый цилиндр. Сообщающий цилиндры канал имеет достаточно большое сечение для того, чтобы не дросселировать потоки газов при перетекании.

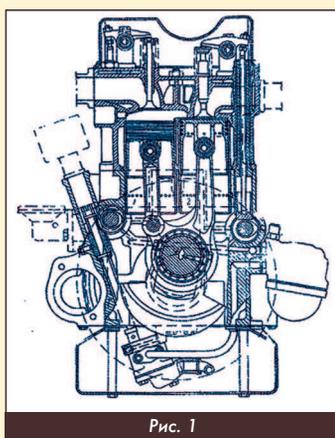


Рис. 1

Направление канала может быть тангенциально к окружности камеры сгорания для создания направленных вихревых движений газов при перетекании воздушного заряда из второго цилиндра.

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) обеспечивает двухтактный рабочий процесс в двух совместно работающих цилиндрах при фазовом сдвиге движения поршней в пределах 22...24° по углу поворота коленчатого вала (ПКВ). Конструктивная степень сжатия в первом цилиндре выбирается такая же, как в обычных бензиновых двигателях. Общая степень сжатия по двум цилиндрам является степенью сжатия всего двигателя.

В первый цилиндр подается обогащенная смесь со значением коэффициента избытка воздуха на полной нагрузке $\alpha \approx 0,5$, во второй цилиндр подается чистый воздух. Сжатие в обоих цилиндрах происходит одновременно. Воспламенение рабочей смеси в первом цилиндре осуществляется электрической искрой; а после прихода поршня второго цилиндра в ВМТ, в сгорании топлива в первом цилиндре принимает участие сжатый воздух, вытесняемый из второго цилиндра. Оба цилиндра в одинаковой степени являются рабочими цилиндрами; после окончания процесса сгорания в цилиндре № 1, в них происходит расширение рабочего тела.

Перетекание половины рабочего заряда из одного цилиндра в другой не вызывает сколь-нибудь ощутимых потерь. Как показывают расчеты, эти потери составляют не более 0,3 % от работы цикла.

Повышение КПД происходит за счет главного термодинамического фактора - повышения используемого термодинамического перепада температур в цикле, который увеличивается при росте степени сжатия. При этом повышение степени сжатия в обычном двигателе с циклом Отто достигается при применении высокооктанового топлива, а двигатель с циклом Кушуля обладает практической нечувствительностью к детонационной стойкости применяемого топлива [12].

Детонация в двигателе Кушуля возникнуть не может, так как начало сгорания происходит при невысокой степени сжатия и недостатке кислорода, а последующее сгорание происходит по мере поступления сжатого воздуха из второго цилиндра, без сколь-нибудь продолжительного контакта между топливом и кислородом в условиях высоких температур и давления. Свежий воздушный заряд, поступая в камеру сгорания во втором периоде сгорания, локализует детонацию - размывает возможные очаги детонационного сгорания, так же, как и очаги возникновения окислов азота NO_x и CO .

Результаты испытаний двигателя ДК-6, проведенных в ЛИАП, были рассмотрены межведомственной комиссией, которую возглавляли В.М. Яковлев, Н.Х. Дьяченко, В.А. Ваншейдт и специалисты ЦНИДИ. Комиссия пришла к следующему заключению [13]:

"Предложенный принцип осуществления рабочего процесса двигателей является новым и оригинальным и удачно сочетает основные преимущества карбюраторного двигателя и дизеля.

Рабочий процесс в стендовых условиях в основном доведен и характеризуется высокой степенью сжатия (11,5), высоким давлением сгорания (70 атм.), относительно низким удельным расходом топлива (190 г/э.л.с.ч), возможностью работать на топливах с низким октановым числом без детонации и иметь более чистый выхлоп, что уменьшает загрязнение воздуха в условиях городской эксплуатации (величина коэффициента избытка воздуха от 1 до 2,4). В сравнении с двигателем "М-21" удельный расход топлива ниже на 20 %.

Комиссия считает, что опытный двигатель ЛИАП, работающий по новому циклу, имеет ценные достоинства перед дизелями и карбюраторными двигателями. Последние заключаются в том, что двигатель ЛИАП не является компромиссным решением. Относительно высокая экономичность в широком диапазоне оборотов, компактность конструкции и возможность создания двигателя с небольшим удельным весом.

Двигатель в данный момент находится в такой стадии, когда по его конструктивной подготовке и доводке должен работать большой производственный коллектив специалистов".

Двигатель Кушуля был замечен за рубежом. Англия официально купила книгу В.М. Кушуля [14], и в 1975 году в Крэнфилде (Великобритания), без участия автора, был построен прототип двигателя Кушуля на базе двигателя "Rover Leyland" ($V_{\text{цил.}} = 1,98$ л), работавшего на высокооктановом бензине и имевшего высокую степень сжатия $\epsilon = 10$.

Эффективный удельный расход топлива экспериментального прототипа двигателя Кушуля оказался на 14 % меньше удельного расхода обычного двигателя, несмотря на то, что преимущества в степени сжатия у двигателя Кушуля почти не было (10 и 11,5).

Минимальный эффективный удельный расход топлива был получен при $\alpha = 1,6$. Максимальный α , обеспечивающий устойчивую работу ДВС составил 3,25. С полностью открытым дросселем двигатель устойчиво работал при $\alpha = 2,4$. Особо была отмечена практическая нечувствительность двигателя Кушуля к октановому числу бензина [15].

Публиковались статьи по двигателю Кушуля и во Франции [16].

На рис. 2 показан опытный двигатель Кушуля - ДК-14, работающий на стенде в ЛИАП на 4200 об/мин.

Двигатель ДК-14 был спроектирован и изготовлен по техническому заданию, которое было выдано управлением конструкторских и экспериментальных работ Министерства автомобильной промышленности СССР при участии машиностроительного завода имени Климова.

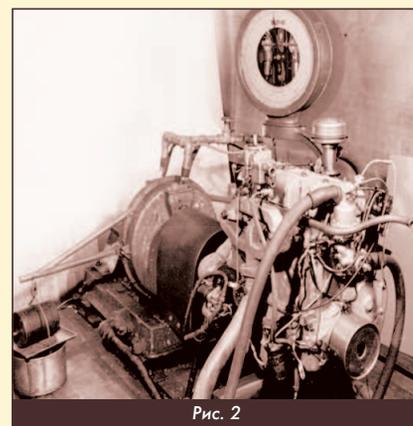


Рис. 2

Основные сведения о двигателе ДК-14:

- 4-тактный, карбюраторный, число цилиндров - 8;
- степень сжатия - $\varepsilon = 11,3$;
- топливо - бензин А-72;
- размерность цилиндров - 82 x 88 мм;
- максимальные обороты - 4200 об/мин.;
- максимальный крутящий момент - 24 кгм (237 Нм);
- мощность, максимальная - 120 л.с.

Так как в двигателе Кушуля все топливо, предназначенное для двух цилиндров на всех режимах работы подается в один цилиндр, то на режимах, близких к максимальной мощности в цилиндре №1 было необходимо создание заряда с очень богатой смесью.

В процессе испытаний и доводки выяснилось, что получить высокое качество распыления очень богатой смеси с $\alpha = 0,45$ с помощью существовавших в то время карбюраторов не удастся. Они создавались для работы с более бедной смесью. Из-за плохого смесеобразования на некоторых режимах в отработавших газах увеличивалось содержание углеводородов СН (или черного углерода).

Несмотря на это, показатели ДК-14 были высокими: минимальное значение удельного расхода топлива по нагрузочной характеристике составило 185...190 г/л.с.ч (251...258 г/кВт.ч) [17].

У нового серийного карбюраторного двигателя ВАЗ-2108, который примерно в это же время разрабатывался и доводился с широким участием зарубежных специалистов, этот показатель составлял 202 г/л.с.ч (275 г/кВт.ч) [18].

Обычные карбюраторные двигатели (например, ВАЗ-2108) используют количественное регулирование мощности, что по мере снижения нагрузки требует обогащения заряда до $\alpha = 0,7$ в целях поддержания устойчивости рабочего процесса. В условиях городской езды эти двигатели работали в основном на частичных нагрузках, то есть на обогащенной смеси с $\alpha < 1$. Это приводит к значительному возрастанию выбросов токсичных веществ и снижению экономичности.

Особенностью работы карбюраторного двигателя Кушуля является значительное расширение пределов качественного регулирования мощности и обеднения смеси до $\alpha = 2,4$ по мере снижения нагрузки. Таким образом, двигатель ДК-14 на наиболее часто используемых эксплуатационных режимах работал на бедных смесях с $\alpha = 1,5...2,0$.

В июле 1978 г. двигатель ДК-14 был установлен на автомобиль "Волга" ГАЗ-24 для проведения дорожных испытаний. За время их проведения замечаний по работе двигателя не было, за исключением жесткой работы двигателя на режиме холостого хода, на котором двигатель устойчиво работал с $n = 380$ об/мин.

В дорожных испытаниях участвовали два одинаковых автомобиля "Волга" с обычным двигателем и с двигателем Кушуля. Автомобиль с двигателем Кушуля расходовал на 15...20 % меньше топлива за один и тот же пройденный маршрут с одинаковыми скоростями и ускорениями.

Наиболее объективную характеристику двигателя по токсичности можно получить при испытании двигателя в условиях ездового цикла, имитирующего типичные условия городского движения транспорта - режимы холостого хода, разгоны, замедления.

В странах Европы применялась методика, рекомендованная Европейской экономической комиссией (ЕЭК) ООН. Испытания двигателя ДК-14 по ездовому циклу ЕЭК проводились на барабанах специального стенда "HORIBA" в Центральном научно-исследовательском и конструкторском институте топливной аппаратуры автотракторных и стационарных двигателей (ЦНИТА).

На режимах холостого хода, в условиях ездового цикла, содержание СО не превышало 0,2...0,5 объемных %, что было в 7...10 раз ниже показателей, установленных советским ГОСТ 16533-70.

В сравнении с существующими тогда двигателями в отработавших газах за одно испытание (цикл) у опытного двигателя вредных выбросов было значительно меньше:

- по содержанию СО - в 3,5...4,5 раза;
- по содержанию окислов азота NO_x - в 2 раза [17, 19].

Из-за плохого смесеобразования содержание СН в отработавших газах было выше, чем у обычного карбюраторного двигателя примерно в 2 раза.

Общий параметр токсичности отработавших газов был лучше, чем у обычного двигателя в 2 раза, так как СО и NO_x существенно токсичнее, чем СН.

Тема токсичности отработавших газов обычного двигателя не исчерпывается только эмиссией продуктов сгорания самого топлива. Бензин, на котором работают обычные двигатели, должен быть устойчивым к детонации, иметь стабильный химический и фракционный состав. Для повышения детонационной стойкости бензинов в их состав вводят антидетонаторы. Наиболее эффективным антидетонатором, широко применявшимся в производстве бензина в то время, был тетраэтилсвинец (ТЭС). Данное вещество крайне токсично и в настоящее время к использованию запрещено. Однако до 1985 года этилированный бензин использовался везде кроме крупных городов, а автор статьи встречал такой бензин на заправках еще в середине 1990-х годов.

Сейчас применяются так называемые малотоксичные присадки к бензину. Однако токсическое воздействие отработавших газов на людей растет из-за увеличения количества автомобилей и роста мощностей их моторов. Применение двигателя Кушуля успешно решало эту проблему, так как делало ненужным применение антидетонаторов при производстве бензина.

Недостатком двигателя Кушуля являлись относительно низкие показатели среднего эффективного давления P_e и литровой мощности. Снижение литровой мощности на 15...20 %, в сравнении с традиционными бензиновыми двигателями, происходило из-за недоиспользования воздушного заряда второго цилиндра двигателя Кушуля.

Последнее было связано с тем, что данный цилиндр на всех режимах заполняется воздухом, который должен в процессе сгорания полностью вытесняться в соседний цилиндр. При этом обязательное наличие остаточного объема в цилиндре исключает перетекание 10...15 % воздуха, а, следовательно, и возможность полного использования массового заряда цилиндра.

Однако в применявшихся в СССР вихрекамерных дизелях недоиспользование воздушного заряда было почти таким же (вихрекамерные дизели работают на режиме максимальной мощности с $\alpha = 1,2$). При этом двигатель Кушуля имел преимущество, так как мог работать на оборотах до 6000 об/мин, а обороты дизеля ограничены 4000 об/мин.

Применение рабочего процесса, осуществляемого в двух цилиндрах, так же приводит к ухудшению такого параметра динамики двигателя, как "равномерность распределения крутящего момента". Так как один рабочий цикл осуществляется в двух цилиндрах, то двухцилиндровый двигатель с таким рабочим процессом по равномерности крутящего момента работает как одноцилиндровый; четырехцилиндровый - как двухцилиндровый и т.д.

Однако равномерность распределения крутящего момента шестицилиндрового двигателя Кушуля ДК-6 равна аналогичному показателю трехцилиндрового рядного четырехтактного двигателя, который массово применяется на малолитражных автомобилях, а двигатель ДК-14 по этому показателю не уступает двигателю ВАЗ 2108. Кроме этого на малолитражных автомобилях с успехом применяются двух- и даже одноцилиндровые четырехтактные двигатели, где этот параметр хуже, чем у ДК-6 и ДК-14.

Таким образом, это вполне адекватная "цена" за существенное улучшение всех остальных параметров двигателя.

Не внедрение в серию двигателя Кушуля можно было бы принять, если бы отечественное автомобилестроение обладало высоким техническим уровнем серийных двигателей и перспективных разработок.

Однако отечественный двигатель для автомобиля "Волга" с форкамерно-факельным зажиганием был изготовлен в количестве 27 000 штук, но затем был снят с серийного производства. ГАЗ

в итоге остался с устаревшим двигателем обычной конструкции.

Поэтому первым силовым агрегатом для появившейся в начале 90-х годов "Газели", стал карбюраторный двигатель ЗМЗ-402, мощность которого (90 л.с.) была недостаточна для легкого грузовика.

В 2003 году, на второе поколение "Газелей" стали устанавливать двигатель ЗМЗ-406 с 16-клапанной головкой цилиндров, мощность увеличилась, но он остался тем же, карбюраторным.

Двигатель ЗМЗ-405 с инжекторным впрыском при своем появлении стоил на рынке дороже, чем серийные V-образные восьмицилиндровые бензиновые двигатели отечественного производства.

Если бы советская автомобильная промышленность создала автомобильный серийный двигатель, на основе технологий двигателя ДК-14, то "Газель" могла бы оснащаться отечественным двигателем с уникальными коммерческими свойствами:

- эффективная эксплуатация на дешевом топливе любого качества при низкой токсичности отработавших газов;
- солидный запас мощности (120 л.с.) с возможностью дальнейшего форсирования восьмицилиндрового двигателя;
- практически дизельная экономичность;
- стоимость двигателя была бы равна стоимости отечественного бензинового двигателя - ниже стоимости дизеля в 1,3-1,5 раза;
- отсутствие необходимости оснащения системой нейтрализации отработавших газов до уровня Евро 3 включительно.

Проблема с плохим смесеобразованием была бы решена, так как в СССР работали отраслевая наука и карбюраторные заводы. И был бы обеспечен высокий уровень локализации производства и отсутствие лицензионных и авторских платежей. Автомобили с такими свойствами были бы востребованы не только на отечественном, но и на зарубежном рынке.

Современный уровень развития бензиновых двигателей (таких, как ЗМЗ-405) - это работа на стехиометрическом составе смеси, применение системы нейтрализации отработавших газов с обратной связью и распределенного инжекторного впрыска в канал впускного клапана.

При этом, как и в карбюраторных бензиновых двигателях не используется обеднение смеси для повышения экономичности на частичных нагрузках. Кроме того, работа с $\alpha \approx 1$ на всех режимах работы означает необходимость дросселирования двигателя, т.е. существенное снижение экономичности на частичных нагрузках.

Бедные смеси используются только в двигателях с GDI и дизелях и в настоящий момент времени в автомобилестроении происходит переход на эти типы двигателей.

Двухтактные двигатели

Широкое распространение двухтактного двигателя в период его расцвета объясняется рядом его неоспоримых преимуществ перед двигателями других типов, прежде всего, четырехтактными. Это более простая и надежная конструкция, меньшие габаритные размеры, лучшее отношение массы к мощности, меньшая трудоемкость изготовления и др.

Наиболее перспективными направлениями совершенствования параметров двухтактных двигателей с кривошипно-камерной продувкой являются: сокращение потерь прямого выброса топлива с продувочным воздухом, расширение пределов качественно-регулируемого регулирования, ускорение процесса сгорания и увеличение его полноты.

Высокая степень перемешивания свежего заряда и отработавших газов в процессе газообмена и применение в качестве продувочного насоса кривошипной камеры, делают практически невозможным расслоение заряда в двухтактных двигателях традиционных схем.

Применение впрыска топлива в двухтактных двигателях в описываемый период времени было невозможно, прежде всего, по экономическим причинам.

Однако и попытка реализации цикла Кушуля в двухтактном

карбюраторном двигателе, привела к неудаче [20].

К уже отмеченным недостаткам, имеющимся в четырехтактных двигателях Кушуля, прибавился новый - фазовый сдвиг в перемещении поршней, составляющий 20...24° ПКВ, нарушал фазы газораспределения каждого из совместно работающих цилиндров, что приводило к ухудшению экономичности и снижению литровой мощности двухтактного двигателя.

С целью дальнейшего развития рабочего процесса А.И. Костин провел исследование двухтактного двигателя с новым рабочим процессом [21]. Изменения рабочего процесса двигателя Кушуля заключались в следующем:

1. Исключался фазовый сдвиг в движении поршней, они стали работать синхронно, в одной фазе. Это привело к возможности использования оптимальных фаз газораспределения в обоих цилиндрах и к исключению потерь на так называемый "холостой ход поршней".

2. В цилиндре № 2 появилась своя камера сгорания, что позволило избавиться от недоиспользования воздушного заряда второго цилиндра и применить для его воспламенения факельное зажигание. Исчезла необходимость минимизации остаточного объема камеры сжатия во втором цилиндре при изготовлении двигателя.

3. Новый двигатель работает с питанием обоих цилиндров смесью различного состава, то есть топливо, предназначенное для пары цилиндров, подается в оба цилиндра, за исключением режима холостого хода. Это исключило необходимость организации смесеобразования очень богатой смеси.

Схема нового рабочего процесса с искровым зажиганием представлена на рис. 3.

Новый рабочий процесс осуществляется следующим образом. При синхронном движении поршней в обоих цилиндрах, в процессе сжатия, часть заряда второго цилиндра перетекает через канал в первый цилиндр из-за разности объемов камер сжатия.

Заряд первого цилиндра, после воспламенения от свечи, интенсивно турбулизуется перетекающим зарядом, что обеспечивает быстрое и полное его сгорание. С развитием сгорания пламя, в виде факела горячей богатой смеси выбрасывается через канал в камеру сгорания второго цилиндра и обеспечивает сгорание бедных смесей с высокими скоростями. После сгорания бедной смеси второго цилиндра, пламя в виде факела перетекает обратно в первый цилиндр и обеспечивает турбулизацию смеси на последней стадии сгорания и полное ее дожигание.

Таким образом, активное направленное воздействие на рабочий процесс (турбулизация и факельное зажигание) в новом рабочем процессе обеспечивается на всех стадиях рабочего процесса - на такте сжатия топливной смеси, развития сгорания, сгорания бедных слоев смеси с высокой скоростью во втором цилиндре и дожигания богатой смеси после сгорания за фронтом пламени в первом цилиндре.

Активное направленное воздействие на рабочий процесс обеспечивается в новом двигателе не только сжатым в цилиндре воздухом, как в двигателе Кушуля, но и благодаря газодинамическим процессам, обладающих значительно большей энергией, а, следовательно, и возможностями.

Исследования показали, что объем перетекающих газов в новом двигателе составляет до 25...35 % заряда цилиндра. У двигателя с форкамерно-факельным зажиганием до 8...12 %.

Следовательно, степень активного направленного воздействия на рабочий процесс у нового двигателя больше, чем у форкамерно-факельного двигателя и двигателя Кушуля не только по

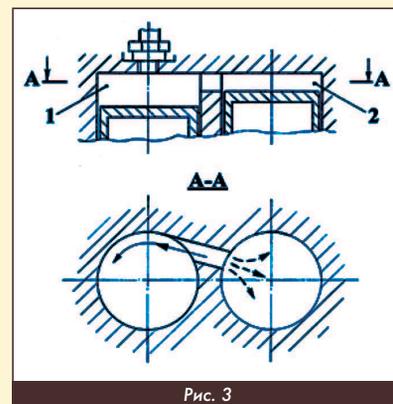


Рис. 3

числу активных стадий, но и по своей абсолютной величине, что позволяет решать самые сложные задачи двигателестроения.

При этом осуществление рабочего процесса в двух сообщающихся цилиндрах не приводит к значительному усложнению конструкции двигателя, так как изготовление всех необходимых деталей возможно по технологии, традиционной для производства обычных двигателей.

Один из первых двигателей с новым рабочим процессом прошел полный цикл испытаний в ВНИИМотопроме (Серпухов) в 1976-1982 годах.

Основой оценки эффективности любого нового способа работы двигателя, является сравнение его параметров с параметрами существующих двигателей. При этом наибольшую достоверность имеют результаты, полученные при исследовании различных способов организации рабочего процесса на одном и том же двигателе с сохранением идентичности условий проведения испытаний.

Конструкция опытного двигателя предусматривала возможность организации рабочего процесса, как в двух совместно работающих цилиндрах, так и в каждом цилиндре отдельно. В последнем случае двигатель работал как обычный двухтактный двухцилиндровый двигатель, и его параметры использовались при сравнительном анализе как базовые.

Изменение организации рабочего процесса осуществлялось заменой головки цилиндров, изменением расположения кривошипов 0 градусов (вместо 180 градусов) и регулировкой системы питания при неизменности основных деталей двигателя: блока цилиндров, картера, деталей поршневой и кривошипно-шатунной групп, систем глушения шума впуска и выпуска.

В обоих вариантах для питания цилиндров использовались отдельные карбюраторы.

В качестве базового двигателя, на котором проводились испытания, был использован двухцилиндровый двухтактный двигатель с кривошипно-камерной продувкой ВНИИ-3.101 (рис. 4, 5), размерностью $D/S = 43/43$ мм ($V_h = 125$ см³).

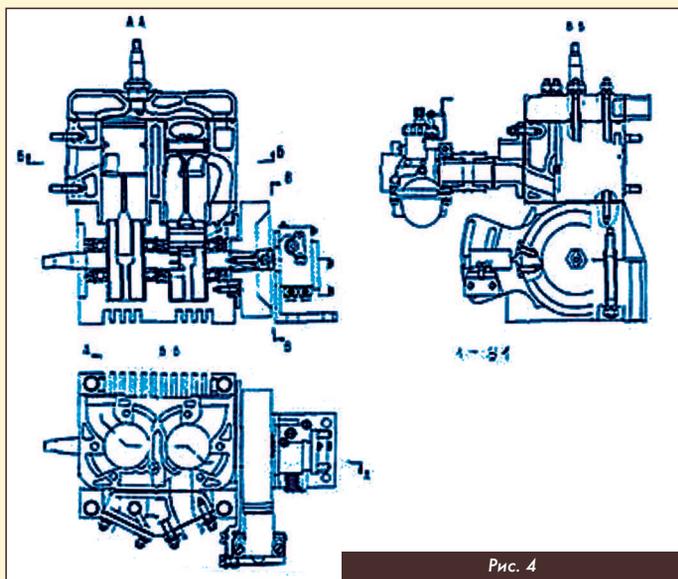


Рис. 4

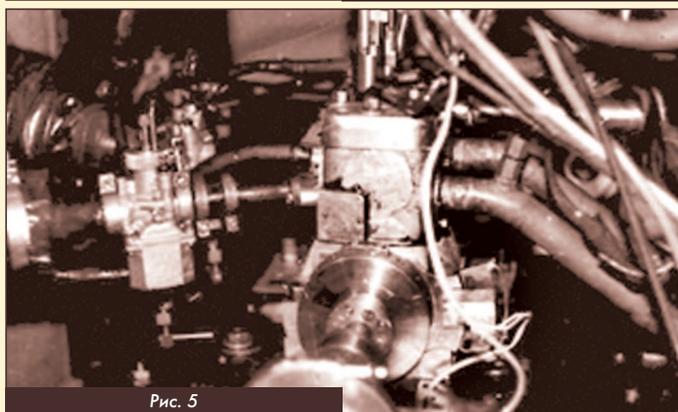


Рис. 5

На режиме максимальной мощности при $n = 6900$ об/мин удельный расход топлива обоих двигателей одинаков - 435 г/кВт·ч. Максимальная мощность базового двигателя - 9,3 кВт, двигателя с послойным смесеобразованием (ДПС) - 9,2 кВт.

Минимальный удельный расход топлива ДПС - 354 г/кВт·ч (260 г/л.с.ч), базового - 370 г/кВт·ч (272 г/л.с.ч) [22].

Базовый двигатель и ДПС имели одинаковую геометрическую степень сжатия $\varepsilon = 13$ и работали на бензине А-76, что допустимо для обычного двигателя малой размерности. Таким образом, ДПС не имел преимуществ перед базовым двигателем из-за главного термодинамического фактора - повышения используемого термодинамического перепада температур в цикле, который увеличивается при росте степени сжатия.

Поэтому главная причина лучших показателей двигателя ДПС - более полное и быстрое сгорание заряда и работа на бедных смесях.

Состав смеси на ДПС изменялся в пределах $\alpha = 0,95...2,25$, а на базовом двигателе - $\alpha = 0,7...1,1$.

Измерение концентрации СО и СН в отработавших газах производилось инфракрасным газоанализатором МЕКСА-322 (Япония) [22]:

В базовом двигателе содержание СО составляло - 6,0...0,2 %, содержание СН - 5000...3000 млн⁻¹. В ДПС содержание СО - от 0,2 % и менее, содержание СН - 2000...1500 млн⁻¹.

Наиболее полное сравнение экономичности двух двигателей можно провести по их многопараметровым характеристикам, представленным на рис. 6.



Рис. 6: а - двигатель ДПС; б - базовый двигатель

Из характеристик следует, что при новом способе работы сохраняются эффективные показатели на режиме полной мощности, но при этом существенно улучшается экономичность на режимах частичных нагрузок [23].

На двигателе ДПС, зона максимальной экономичности сдвигается в сторону больших нагрузок (зона режимов, при которых удельный расход топлива не превышает 410 г/кВт·ч на графике выделена) и охватывает для двигателя ДПС практически всю область эксплуатационных нагрузок, а для базового двигателя с разделенными цилиндрами - лишь область средних нагрузок.

Велико и различие удельных расходов топлива в области малых нагрузок - при $P_e < 0,2$ МПа.

Настолько значительное повышение экономичности двигателя ДПС объясняется рядом причин, главные из которых, как показали проведенные испытания, являются следующие:

1. Повышение стабильности последовательных циклов на всех режимах работы двигателя благодаря надежному воспламенению и сгоранию с высокой скоростью части заряда, расположенной вблизи свечи зажигания, а также его нечувствительность к изменению угла опережения зажигания в широких пределах, что существенно повышает надежность нового двигателя [24].

Двухтактный двигатель с кривошипно-камерной продувкой в режиме холостого хода работает при коэффициенте остаточных газов - 0,3...0,4 и более. Это приводит к ухудшению воспламеняемости заряда, снижению интенсивности сгорания и скорости распространения фронта пламени [10].

В итоге двигатель начинает работать как четырехтактный с воспламенением заряда через цикл.

Отметим, что по опубликованным данным степень неравно-

мерности рабочего процесса многоцилиндровых четырехтактных карбюраторных двигателей на полной нагрузке при коэффициенте остаточных газов 0,85...0,90 достигает 30 % и более и только применение впрыска уменьшает эту величину до 6...7 % [24].

Уменьшение расхода топлива в режиме холостого хода и высокая стабильность рабочих циклов благоприятно влияют на результаты испытаний двигателя по ездовым циклам, на выброс токсичных веществ с отработавшими газами на всех режимах работы и др. [25].

2. Сокращение потерь прямого выброса, особенно на режимах малых нагрузок, связанное с возможностью значительного обеднения смеси в цилиндре без свечи зажигания вплоть до подачи в этот цилиндр только воздуха.

При подаче в цилиндры двигателя смеси различного состава возможно применение различных значений фазы начала выпуска в сочетании с индивидуальной настройкой акустических систем выпуска каждого цилиндра. При этом, увеличив фазу выпуска цилиндра без свечи и соответственно уменьшив ее в цилиндре со свечой зажигания, можно добиться на частичных нагрузках уменьшения прямого выброса из последнего цилиндра (прямого выброса богатой смеси; путём увеличения прямого выброса обедненной смеси из первого цилиндра) [26].

Возможно применение расслоения заряда ТВС при продувке и непосредственного впрыска.

3. Описанная организация рабочего процесса позволяет значительно расширить пределы качественного регулирования и обеспечить связанное с ним повышение термического КПД рабочих циклов.

Проведенные исследования показывают, что в двигателе ДПС достигается глубокое расслоение топливного заряда, которое и позволяет осуществлять сжигание настолько обедненных смесей.

Причем это расслоение "правильное" - если в цилиндр со свечой зажигания подается смесь с большим содержанием топлива, чем в цилиндр без свечи, то, в результате частичного смешения зарядов цилиндров в процессе сжатия, в целом по камере сгорания топливо распределяется в смеси по закону, близкому к "направленному расслоению" [27].

На режиме максимальной мощности в оба цилиндра подается смесь мощностного состава (например, с $\alpha = 1,0...0,9$). По мере снижения мощности смесь в цилиндре со свечой зажигания обедняется до экономичного состава (например, с $\alpha = 1,1...1,2$), а в цилиндре без свечи - вплоть до чистого воздуха. Дальнейшее снижение мощности требует перехода к дросселированию.

При одинаковых размерах цилиндров с $\alpha = 1,1...1,2$, качественное регулирование мощности возможно до $\alpha = 2,2...2,4$.

Возможно качественное регулирование двигателя и во всем диапазоне рабочих режимов, но в этом случае рабочий объем цилиндра со свечой зажигания должен быть меньше, чем в цилиндре без свечи (примерно в отношении 1:4). Однако такая конструкция двигателя представляла бы меньший интерес для промышленности, так как отсутствие унификации деталей шатунно-кривошипного механизма и поршневой группы усложнила бы производство [28].

4. Повышение степени сжатия, при которой двигатель способен работать без признаков детонации. Наиболее важными эксплуатационными режимами работы транспортного двигателя являются режимы частичных нагрузок [29].

При этом степень сжатия оказывает значительное влияние на эффективные показатели двигателя. Наиболее существенно это влияние проявляется при увеличении ε от 8 до 13, дальнейшее повышение ε приводит лишь к росту механических потерь.

Степень сжатия двигателя ДПС в исследовательских целях была доведена до $\varepsilon = 16,7$ при этом признаков детонации при работе на бензине А-76 не отмечено.

Это оказалось возможным благодаря интенсивной турбулизации заряда в период видимого сгорания, что ускоряло сгорание заряда в полости цилиндра без свечи зажигания и препятствовало возникновению детонации.

Базовый двигатель с разделенными цилиндрами устойчиво работал лишь до $\varepsilon = 13$. Дальнейшее увеличение ε базового двигателя приводило при $n = 5500$ об/мин к калильному зажиганию, устранить которое не удалось, даже применяя свечу с высоким калильным числом (Bosch 400) [22].

5. Ускорение процесса сгорания искусственным генерированием турбулентных пульсаций заряда, что приводит к более выгодному, с точки зрения термодинамики, выделению тепла по углу поворота коленчатого вала. Улучшение параметров двигателя возможно ускоренным дожиганием частей заряда, расположенных в наиболее отдаленных от свечи зажигания зонах камеры сгорания и сгорающих в последнюю очередь, что обеспечивает завершение сгорания ближе к ВМТ и повышает действительную степень расширения рабочего тела.

Высокие скорости струйных течений газа в процессе сгорания разрушают слои заряда, расположенные у стенок камеры сгорания в зоне интенсивного теплоотвода, где их турбулизация недостаточна, вовлекают их в процесс сгорания, что способствует повышению экономичности и снижению токсичности отработавших газов, прежде всего на режимах средних и высоких нагрузок. Это является важнейшим фактором улучшения экономичности двигателя на всех режимах его работы и снижения требований двигателя к октановому числу применяемого топлива. Ускорение процесса сгорания двигателя ДПС путём обеспечения турбулизации заряда было подтверждено индицированием и уменьшением оптимальных значений угла опережения зажигания.

Оценить влияние турбулизации заряда в двигателе на режиме холостого хода позволяет питание обоих цилиндров смесью с $\alpha_1 = \alpha_2 = 0,7...0,75$. При этом расход топлива снижался на 22...26 % в сравнении с традиционным двигателем.

Положительное влияние турбулизации заряда в процессе сгорания двигателя ДПС было отмечено на всех режимах, кроме режима максимальной мощности, когда при максимальных оборотах высокий уровень турбулизации отмечается и на обычном двигателе.

В двухтактном двигателе ускорение процесса сгорания приобретает особую важность, так как коэффициент остаточных газов в нем достигает больших величин, чем в четырехтактном двигателе. Это приводит к замедлению процесса сгорания и увеличению отвода тепла в стенки камеры сгорания, в частности, в днище поршня [7]. Поэтому при нагрузках близких к номинальным, в большинстве двухтактных двигателей смесь обогащается до $\alpha = 0,80...0,85$, чтобы обеспечить отвод тепла от поршня благодаря испарению топлива и сокращению времени контакта поршня с горячими газами, что уменьшает опасность его перегрева и заклинивания [30].

Наличие соединительного канала с достаточной площадью поперечного сечения создают струйные течения заряда в процессе сгорания, вполне аналогичные тем, которые генерируются в камерах сгорания при наличии вытеснителя на поршне или головке цилиндра.

Но в отличие от вытеснителей расположение и площадь поперечного сечения соединительного канала остаются неизменными в течение всего процесса, что способствует созданию более интенсивных и направленных вихрей, которые могут обеспечить лучшее перемешивание зарядов цилиндров, а значит и более полное сгорание топлива.

На создание такой турбулентности затрачивается минимальное количество энергии, так как турбулентность создается непосредственно вблизи ВМТ, то есть именно в тот момент, когда она необходима для интенсификации процесса сгорания.

Для определения факторов, влияющих на скорость перемещения фронта пламени в камере сгорания двигателя ДПС, были проведены исследования динамики сгорания с помощью ионизационных датчиков. Головка цилиндров, подготовленная для регистрации скорости прохождения фронта пламени, с установленными ионизационными датчиками показана на рис. 7.

В двигателях, конструкции которых не предусмотрены специ-

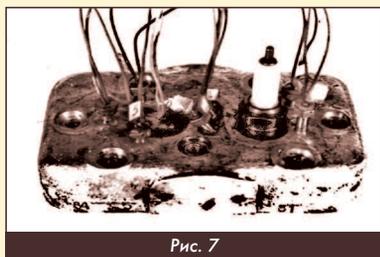


Рис. 7

альные меры по усилению турбулентных пульсаций заряда, скорость фронта пламени не превышает 30...35 м/с [7]. Применение вытеснителей повышает значение этой скорости до 40...50 м/с [10].

Организация рабочего процесса с двухстадийным сгоранием заряда способствует повышению скорости фронта пламени до 200...250 м/с [31].

Такие высокие скорости в двигателе с обычной камерой сгорания возможны лишь при значительном форсировании двигателя по частоте вращения коленчатого вала. Так фирмой Honda на четырехтактном мотоциклетном двигателе при $n = 16\,000$ об/мин зарегистрирована скорость 180 м/с [32].

Двигатель ДПС испытывался с максимальными оборотами до 7200 об/мин и при установке позднего угла опережения зажигания скорость фронта пламени в соединительном канале превысила 300 м/с [23]. Таким образом, скорость распространения фронта пламени в двигателе ДПС в 4...8 раз больше, чем в обычном двигателе.

Важное место в проведении НИОКР занимали расчетно-теоретические исследования. Был разработан метод анализа теоретического цикла в двух сообщающихся цилиндрах, учитывающий различие начального состава рабочих тел в цилиндрах с различными степенями сжатия [33].

Была разработана математическая модель, состоящая из алгоритма и программы для ЭВМ, позволяющая расчетным путем определять параметры зарядов в каждом из совместно работающих цилиндров с учетом изменения массы зарядов, их теплоемкости, подвода тепла от сгорания топлива и теплопередачи.

Расчеты теоретического цикла двигателя с двумя сообщающимися цилиндрами при подаче в каждый цилиндр независимого состава смеси были осуществлены на ЭЦВМ "Наири К". Сравнение термического КПД цикла Отто и цикла, осуществляемого в двух сообщающихся цилиндрах, показывает, что при равных степенях сжатия термический КПД, исследуемого цикла на 11 % выше, чем цикла Отто [23].

В публикации советской технической литературы указывалось, что данный двухтактный двигатель при дальнейшем развитии может выйти на уровень эффективных параметров четырехтактного двигателя без применения впрыска топлива, катализаторов и других устройств повышения экономичности и снижения токсичности отработавших газов [35]. Конструкция двигателя ВНИИ-3.101 решением НТО ВНИИмотопрома была утверждена,

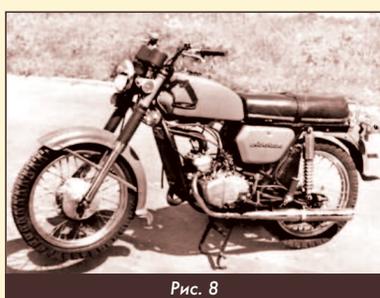


Рис. 8

как основа силового агрегата перспективного мотоцикла для Минского мотоциклетного завода (рис. 8).

Расчет народнохозяйственного экономического эффекта от внедрения на Минском мотовелозаводе такого двигателя, показал, что годовой народнохозяйственный экономический эффект составил 227,7 тыс. руб. в ценах 1978 года. При этом годовая экономия топлива составила бы 3920 тыс. литров [23].

Серийного производства экологически чистого двухтактного двигателя организовано не было. Минский мотоциклетный завод выпускал хорошие легкие мотоциклы, которые удостоились похвалы даже такой популярной телепрограммы, как Top Gir (в цикле передач про Вьетнам). Однако отсутствие на ММЗ производства собственного двигателя с необходимыми экологическими показателями, а также запрет на использование двухтактных двигателей довели предприятие до состояния нерентабельности и в итоге к его закрытию.

Четырехтактный двигатель с новым рабочим процессом

После получения положительных результатов испытания двухтактного двигателя ВНИИ-3.101 был сделан вывод о перспективности нового рабочего процесса для четырехтактных двигателей.

Новый двигатель при полном открытии дроссельной заслонки может работать, как и дизель, с коэффициентом избытка воздуха $\alpha = 1,4$. Поэтому появилась возможность сравнить показатели этих двигателей с одинаковыми значениями $\alpha = 1,4$ с помощью расчета по методике И.И. Вибе.

По расчету эффективный КПД нового четырехтактного двигателя при $\varepsilon = 11$ и $\alpha = 1,4$ равен 0,383.

У дизеля без наддува с неразделенной камерой сгорания при $\varepsilon = 17$ и $\alpha = 1,4$ эффективный КПД равен 0,351. При этом максимальное давление сгорания дизеля $P_z = 8,9$ МПа, а у нового двигателя $P_z = 6,0$ МПа [22].

В результате экономичность нового двигателя будет выше, чем у дизеля на 9 % из-за уменьшения механических потерь и сокращения продолжительности сгорания топлива по углу поворота коленчатого вала (механический КПД равен 0,83 вместо 0,78) при увеличении литровой мощности на 14 %.

Дополнительные преимущества предлагаемого двигателя по сравнению с дизелем:

1. Снижение уровня шума из-за уменьшения максимального давления сгорания в 1,5 раза и снижение жесткости рабочего процесса;

2. Уменьшение массы двигателя при одинаковой мощности примерно в 2 раза;

3. Возможность увеличения мощности увеличением частоты вращения до $n = 6000$ об/мин., тогда как нормальная работа дизеля ограничена $n = 4000$ об/мин.;

4. Первоначальная стоимость предлагаемого двигателя в 1,3...1,6 раза ниже (на уровне стоимости современного бензинового двигателя);

5. Многотопливность, т.е. способность работы без детонации на низкооктановых сортах топлива и, в связи с этим, более низкая стоимость топлива. Например, стоимость бензина А-80 на 20 % ниже стоимости дизельного топлива;

6. В связи с наличием активного направленного воздействия на процесс сгорания на всех его стадиях, токсичность отработавших газов снижается в три - пять раз на частичных нагрузках по сравнению с традиционными двигателями.

Для дополнительного снижения токсичности могут быть использованы средства по снижению токсичности отработавших газов, применяемые в современном двигателестроении.

Первые шаги экспериментального исследования 4-тактного ДПС были сделаны на опытных образцах 4-цилиндровых двигателей - Каспий-65 и ДНБ-4.

Разработка проектов двигателей проводилась под руководством В.М. Кушуля и А.И. Костина. На двигатели были оформлены патенты РФ № 2008478, № 2117790, № 2117791 [35].

Из-за отсутствия условий для работы, полного цикла испытаний и исследований по этим проектам провести не удалось. Однако предварительные результаты, полученные при доводке опытных образцов, показывают перспективность применения нового рабочего процесса в четырехтактных двигателях [36].

Четырехтактные двигатели с новым рабочим процессом имели не кривошипно-шатунный, а бесшатунный силовой механизм (БСМ), который так же требовал изучения, что увеличивало объемы доводочных работ.

Первый проект четырехтактного двигателя с новым рабочим процессом - "Каспий-65" разрабатывался в качестве двигателя для спасательной шлюпки, опытный образец был изготовлен на ПО "Дагдизель" (Каспийск), и там же в 1990 году начались первые испытания. Шлюпочный двигатель должен обладать малыми размерами, возможностью ручного запуска и при этом работать на дизельном топливе, что сложно обеспечить при степени сжатия $\varepsilon = 17$.

Двигатель "Каспий-65" имел $\varepsilon = 11,5$, мог работать на дизель-

ном топливе с искровым зажиганием и имел БСМ, который обеспечивал более высокий механический КПД, полную уравновешенность сил и моментов инерции, а так же компактность конструкции.

БСМ двигателя "Каспий-65" был спроектирован так, чтобы в одном двигателе можно было бы получить как рабочий процесс двигателя Кушуля, так и новый рабочий процесс. Это достигалось установкой двух линий валов либо в одну фазу, либо обеспечивался фазовый сдвиг в движении поршней.

Фотография двигателя "Каспий-65" представлена на рис. 9.

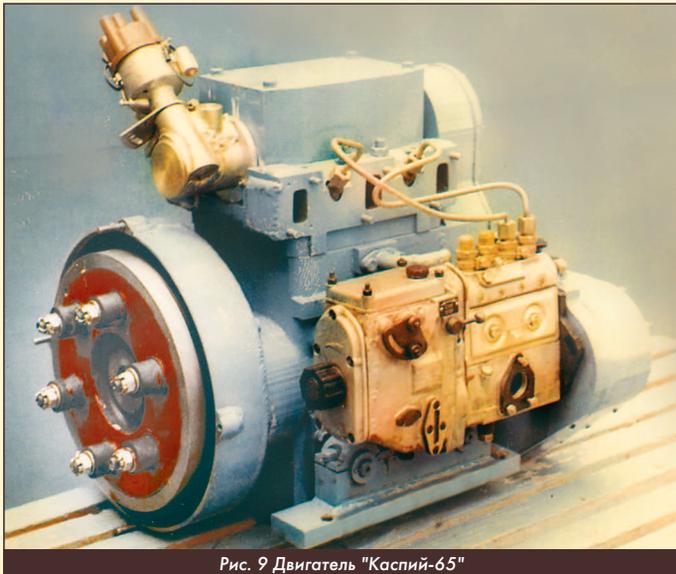


Рис. 9 Двигатель "Каспий-65"

Главный вопрос по БСМ - величина механических потерь (N_m). При прокрутке двигателя при $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ и температуре масла $t_m = 70 \text{ }^\circ\text{C}$ величина механических потерь составила: $N_{m1} = 1,32 \text{ кВт}$.

Для двигателя близкой размерности МЗМА-407 (4ч 7,6/7,5) при $t_m = 70 \text{ }^\circ\text{C}$, по опубликованным данным, $N_{m2} = 1,44 \text{ кВт}$, т. е. на 9 % больше, чем у двигателя с БСМ - (отношение величин механических потерь):

$$N_{m\text{-отн}} = N_{m2} / N_{m1} = 1,44 / 1,32 = 1,09.$$

Если же учесть большие значения хода поршня S (8,8 вместо 7,5 см) и степени сжатия ε (11,5 вместо 7,0), то снижение N_m составляет 52 % [37]:

$$N_{m\text{-отн}} = 1,09 \cdot 1,08 \cdot 1,29 = 1,52.$$

По новому рабочему процессу была продемонстрирована устойчивая работа на стенде под нагрузкой до 4200 об/мин четырехтактного двигателя с диаметром цилиндра 76 мм на бедной смеси с $\alpha = 2$ и со степенью сжатия $\varepsilon = 11,5$ на бензине А-76.

Из-за отсутствия финансирования работ, завершить работу по доводке и, тем более по исследованию двигателя, не удалось.

Однако этот двигатель привлек внимание частных инвесторов, и в 1996 году группа авторов-разработчиков получила финансирование на продолжение работы, но уже по другим проектам. В проекте двигателя ДНБ-4 (автомобильная модификация) был учтен опыт "Каспия-65". В результате была использована конструктивно более простая схема БСМ с уменьшенным числом трущихся пар, уменьшены размеры и масса двигателя (рис. 10).

Упрощение конструкции

достигнуто использованием одновальной схемы БСМ. На рабочую шейку коленчатого вала действуют одновременно два поршня, а нижняя часть штоков объединена в общий ползун. Основная часть деталей была изготовлена на ТМЗ (ПО "Турбомоторный завод", Екатеринбург). Там же были проведены холодная обкатка и горячая на режиме холостого хода до $n = 3000 \text{ мин}^{-1}$.

Временный стенд позволял осуществлять прокрутку и запуск двигателя при отсутствии нагрузочного устройства. После первой сборки и обкатки, величина механических потерь оказалась выше, чем у двигателя близкой размерности МЗМА-407. Вместе с тем, двигатель устойчиво работал на режиме холостого хода в диапазоне $n = 800 \dots 3000 \text{ об/мин}$. Расход топлива, замеренный при $n = 2400 \text{ об/мин}$, оказался на 10 % ниже, чем у МЗМА-407.

В данном случае преимущества нового рабочего процесса (более высокая степень сжатия, высокая полнота сгорания топлива, работа на режиме холостого хода с $\alpha > 1$) превалировали над ростом механических потерь. Двигатель работал при степени сжатия $\varepsilon = 11,5$ на бензине А-76.

В ходе разборки двигателя никаких следов наработки или заедания в парах трения обнаружено не было. После проведения ряда конструктивных и технологических мероприятий двигатель снова прошел холодную и горячую обкатку при $n = 800 \dots 3000 \text{ об/мин}$. Величина механических потерь была снижена до нормального уровня [36]. Конструктивные и технологические мероприятия заключались в изменении параметров системы смазки, исправления недостатков изготовления деталей и их конструкции и т.д.

Был создан новый научно-технический задел и в области двухтактных двигателей.

Двигатель мотоциклетного типа 2Д-200 (рис. 11) разрабатывался по инициативе СКБ ЗИД (Ковров), профинансировавшего эскизный проект двигателя и рабочий проект системы непосредственного впрыскивания бензина. В дальнейшем, благодаря спонсорской поддержке, был разработан технический проект и изготовлены опытные образцы.



Рис. 11 Двигатель 2Д-200

Опытный образец 2Д-200 испытывался на стенде [37]. Проведены холодная и горячая обкатки двигателя. Характеристика механических потерь после 15-часовой обкатки при температуре масла $t_m = 45 \text{ }^\circ\text{C}$ приведена на рис. 12, при наличии масляного и водяного насосов, а также приводного продувочного насоса.



Рис. 12 Характеристика механических потерь двигателя 2Д-200

На первом этапе испытаний (горячая обкатка и под нагрузкой) двигатель работал в диапазоне $n = 1400 \dots 5000 \text{ мин}^{-1}$.

Данные по N_m не являются окончательными. Необходимо провести испытания при $t_m = 70 \dots 80 \text{ }^\circ\text{C}$, что в обычном ДВС (в сравнении с $t_m = 45 \text{ }^\circ\text{C}$) снижает N_m приблизительно на 20 %. Кро-

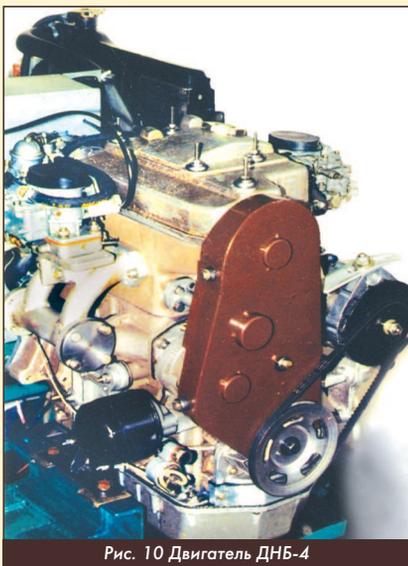


Рис. 10 Двигатель ДНБ-4

ме того, в отличие от двигателя Баландина, в парах ползун-направляющая не были использованы специальные антифрикционные материалы (подшипниковые сплавы). Следующий этап испытаний должен был быть проведен после нанесения на поверхности ползунов антифрикционного слоя и при замене карбюратора системой впрыскивания топлива [38].

Было проведено динамическое моделирование БСМ. При динамическом моделировании производились измерения с исполь-

зованием малогабаритного датчика Analog Devices EVAL-ADXL377Z фирмы "Брюль и Кьер", установленном на поршне силового механизма бесшатунного двигателя 2Д-200; результаты измерений сравнивались с результатами, полученными при расчете механизма в пакете ANSYS [39].

Технические характеристики ряда созданных новых двигателей приведены в таблице №1.

Технические характеристики двигателей							
Модель двигателя	ВНИИ 3.101 2-тактный	Каспий-65 4-тактный	ДНБ-4 4-тактный	2Д-200 2-тактный	ДН-2 4-тактный	БК-93 4-тактный	АИК.97 2-тактный
Число цилиндров	2	4	4	2	2	4	2
Диаметр цилиндров, мм	43	76	76	52	76	76	54
Ход поршня, мм	43	88	76	47	71	76	54
Степень сжатия	13	11,5	11,5	12,5	11,5	11,5	12,5
Мощность, кВт (л.с.)	9,6 (13)	47,8 (65)	30 (40,8)	16,5 (22,4)	11 (14,9)	59 (80)	16,9 (23)
Частота вращения, об/мин	7200	4000	3000	6000	3000	5800	6000
Минимальный удельный расход топлива, г/кВт·ч (г/л.с.·ч)	354(260)	224(165)	217(160)	270(200)	245(180)	224(165)	340(250)
Масса	13	75	70	18	36	75	18
Силовой механизм	КШМ	БСМ	БСМ	БСМ	КШМ	БСМ	КШМ
Примечание	-	-	-	С впрыскиванием топлива	С воздушным охлаждением	-	-
Назначение двигателя	Мотоциклы, ультралегкие летательные аппараты	Спасательная шлюпка, катер, привод генератора	Коммунальная техника, погрузчики, привод генераторов	Мотоциклы, ультралегкие летательные аппараты, привод генераторов, лодочные моторы	Мотоблоки	Автомобили	Мотоциклы, лодочные моторы, привод генераторов

Таблица 1

Двигатели с воспламенением от сжатия (дизели)

Современный дизельный двигатель является наиболее используемым поршневым двигателем в морском и наземном транспорте и имеет качественное регулирование мощности и непосредственный впрыск топлива.

В нашей стране и за рубежом введены нормы токсичности отработавших газов, которые постоянно ужесточаются. Однако и раньше особенно жесткие требования по содержанию токсичных компонентов, главными из которых являются окись углерода СО и окислы азота NO_x, предъявлялись к двигателям, работающим в условиях шахтных и открытых карьерных разработок.

Поэтому в этих условиях используются только дизели, обладающие более высокими экологическими характеристиками в сравнении с бензиновыми двигателями. Вместе с тем обычные дизели выделяют значительно большее количество токсичных веществ, чем допускается специальными нормами для подземных горных выработок.

Для снижения токсичности отработавших газов используются дорогостоящие и неудобные в использовании нейтрализаторы, рециркуляция отработавших газов, термореакторы (дожигатели) отработавших газов, которые ухудшают эффективные характеристики дизельного двигателя, повышают тепловую напряженность, ведут к его усложнению и удорожанию эксплуатации [40].

Поэтому, задача создания малотоксичного дизеля в рабочем процессе которого, наряду с высокими эффективными показателями, уже содержались бы условия уменьшенного выхода токсичных веществ была актуальной всегда.

В середине 1970-х годов был изготовлен на базе тракторного двигателя харьковского завода "Серп и молот" дизельный двигатель Кушуля - ДК-9 (рис. 13).

Показатели ДК-9 заинтересовали институт геотехнической механики АН Украины (ИГТМ), который в СССР занимался реше-

нием экологических проблем при проведении горных работ.

Выход NO_x в двигателе в основном определяется тремя факторами: максимальной температурой цикла, скоростью охлаждения продуктов сгорания в диапазоне температур свыше 1900...2100 К и концентрацией свободного кислорода. В обычном двигателе скорость охлаждения заряда связана лишь с теплоотдачей путем лучеиспускания. В двигателе Кушуля, при двухстадийном сгорании, скорость охлаждения горящих газов будет определяться и скоростью поступления высокосжатого воздуха в камеру сгорания. Кроме того, интенсивная турбулизация заряда в процессе сгорания приводит к устранению местных зон с повышенной температурой - источников образования окислов азота.

Опытный четырехтактный дизель ДК-9 испытывался по нагрузочным характеристикам в диапазоне n = 800...1400 об/мин.

Учитывая, что сведения о токсичности однотипных двигателей являются весьма разноречивыми и неполными, в качестве базы для сравнения был принят двигатель Д-12А, устанавливаемый на автосамосвале БелАЗ-540, по которому имеются данные Института геотехнической механики АН УССР по испытаниям в производственных условиях. Результаты испытаний двигателя ДК-9 приведены в табл. 2, двигателя Д-12А - в табл. 3.

Оценивая полученные результаты, необходимо отметить, что предельное содержание токсичных компонентов опытного двигателя значительно ниже, чем у двигателя Д-12А.

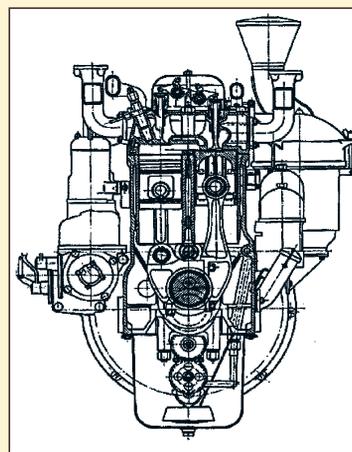


Рис. 13

Таблица 2

Двигатель ДК-9				
Мощность Ne, кВт	n, об/мин	Ge, г/кВт·ч	CO, мг/м ³	NO _x , мг/м ³
16,9		295	1000	121
24,6	800	260	492	127
34,2		245	249	172
42,3		269	876	226
0		-	720	85
16,5		378	725	136
30,9	1000	265	372	274
51,5		234	1270	296
0		-	1210	17,7
17,8		498	1129	51,5
38,1	1200	290	1190	172
55,9		248	825	177
0		-	1250	18,5
22,6		390	1370	100,5
43	1400	283	1200	172
72,4		261	1730	203

Таблица 3

Двигатель Д-12А				
Режим	Ne, кВт	n, об/мин	CO, мг/м ³	NO _x , мг/м ³
Холостой ход	0	707,5	1650	120
Горизонт, участок	80,6	1082	1140	576
Подъем	141,2	1963	1550	990
M _{кр. макс}	282	1918	3200	1170
Разгрузка	0	2080	1000	268

У опытного двигателя ДК-9:

- содержание CO в пределах 249...1730 мг/м³,
- содержание NO_x в пределах 18,5...296 мг/м³.

На серийном двигателе Д-12А, соответственно:

- содержание CO - 1000...3200 мг/м³,
- содержание NO_x - 120...1170 мг/м³.

Весьма существенным является низкий уровень предельного азота. Для сравнения можно привести пределы содержания NO_x других дизелей: 4С-10,5×13 - 680...3152 мг/м³, ЯМЗ-236 - 600...3100 мг/м³, ЯМЗ-204 - 425...3025 мг/м³.

Отбор проб газов в мешки и их анализ на газохроматографе проводился сотрудниками ИГТМ АН УССР.

По комплексной оценке, проведенной специалистами данного института, учитывающей наряду с CO и NO_x содержание альдегидов, токсичность двигателя ДК-9 существенно ниже токсичности существующих дизелей и в связи с этим, было рекомендовано на базе ДК-9 создание опытной партии двигателей для промышленных испытаний в карьере и шахте [19].

Для более объективной оценки актуальности экологических показателей ДК-9 можно привести современный уровень содержания NO_x в воздухе некоторых городов Германии (табл. 4).

Таблица 4

Уровень содержания NO _x	
Место замера	Уровень выбросов, мг/м ³
Stuttgard Am Neckartor (S)	82
Munchen / Landshuter Allee	80
Stuttgard Hohenheimer Strabe (S)	76
Reutlingen Lederstrabe Ost (S)	66
Kiel-Theodor-Heuss-Ring	65
Koln Clevischer Ring3	63
Hamburg Habichtstrabe	62

Из сравнения видно, что некоторые показатели эмиссии NO_x в отработавших газах двигателя ДК-9 сопоставимы или даже лучше, чем показатели содержания NO_x в воздухе некоторых городов Германии. При этом надо отметить, что двигатель ДК-9 не оснащался системами нейтрализации отработавших газов, в отличие от современных дизелей.

Работа по созданию малотоксичных дизелей продолжилась и привела к созданию новых конструкций дизельных двигателей Кушуля. На рис. 14 и 15 представлен компактный малотоксичный дизель ДК-15, который создавался для Луганского локомотивостроительного завода.

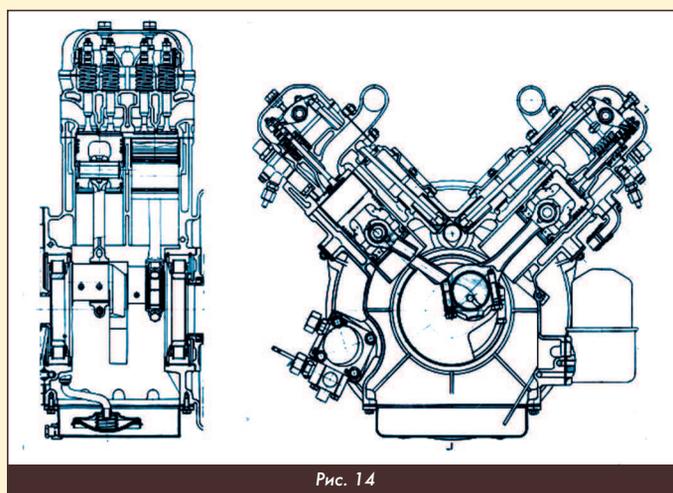


Рис. 14

Недостатком двигателя Кушуля, как в дизельном, так и в бензиновом вариантах, является недоиспользование воздушного заряда цилиндра высокого сжатия и снижение литровой мощности на 15...20 % в сравнении с традиционными двигателями.

Вместе с тем, условия взаимодействия зарядов совместно работающих цилиндров могут быть столь разнообразны, что представляется возможным найти новые способы организации рабочего процесса дизельного двигателя.

Предпочтительное применение дизельного двигателя в оборонных отраслях и во взрыво- и пожароопасных условиях диктовалось возможным отсутствием у последнего электронных и электрических систем, необходимых для работы двигателя с искровым зажиганием. Поэтому обеспечивалась большая пожаробезопасность и отсутствовала уязвимость силовой установки (СУ) дизеля от средств радиоэлектронной борьбы и ЭМИ-оружия (генератор электромагнитных импульсов).

Однако современный дизельный двигатель насыщен электронными и электрическими системами и в этом смысле почти не уступает двигателю с искровым зажиганием, при этом прирост эффективных характеристик современного дизеля полностью определяется наличием и характеристиками этих систем. Поэтому весьма актуальной задачей остается создание дизеля, высокие эффективные показатели которого достигались бы совершенством рабочего процесса, а не только наличием периферийных систем и агрегатов.

К основным эффективным показателям дизеля относятся - литровая мощность и экономичность. Литровая мощность дизеля ниже, чем у бензинового двигателя из-за невозможности работы с коэффициентом избытка воздуха $\alpha < 1,4...1,5$, связанного с неполнотой сгорания топлива и дымлением.

Что же касается экономичности, то она у дизеля выше, чем у бензинового двигателя (работающего с $\alpha \approx 1$) не только из-за повышенной степени сжатия, но и, главным образом, благодаря использованию бедных смесей ($\alpha > 1,4...1,5$). Проблемы с повышением экономичности дизеля связаны с ухудшением смесеобразования как на полной нагрузке (при малых α), так и на малых нагрузках при низкой частоте вращения вала.

Лучшие результаты по экономичности получены на двигателях с неразделенными камерами сгорания, но и они не обеспечивают достаточно полного сгорания при $\alpha < 1,4...1,5$ и отличаются высокой жесткостью рабочего процесса.

В дизеле процесс смесеобразования протекает в 20...40 раз быстрее, чем в двигателе с искровым зажиганием. Топливо подается методом прямого позднего впрыска в камеру сгорания благодаря чему в дизеле возможно использование топлива с низкими

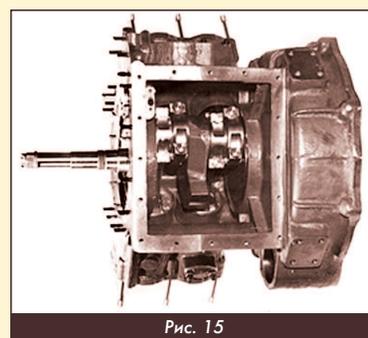


Рис. 15

антидетонационными свойствами, так как сильному сжатию подвергается чистый воздух, а образующаяся по мере впрыска ТВС, имеет разные значения α по объему камеры сгорания (от капель топлива до чистого воздуха), что позволяет воспламениться только части топлива, избегая тем самым детонации, и обеспечивая зажигание всего заряда.

Эта неоднородность (плохое смешение) может использоваться для достижения более мягкой работы дизеля, так как вследствие многоочагового воспламенения скорость нарастания давления в камере сгорания дизеля значительно выше, чем у двигателей с принудительным зажиганием, где распространение фронта пламени идет из одной точки - от электродов свечи зажигания.

Главной проблемой смесеобразования и сгорания в дизелях является нахождение компромисса между желательности плохого смешения для подавления "стука" и желательности хорошего смешения для достижения полного сгорания при наименее возможном α [41].

Отсутствие равномерного распределения топлива по всему пространству камеры сгорания (гетерогенная смесь) приводит к неполному сгоранию в зонах, где концентрация топлива высока, вследствие местного недостатка воздуха. Поэтому, не смотря на большое количество воздуха, подаваемого в дизель, выпуск его может быть дымным. Сажа (СН, черный углерод или твердые частицы), образовавшаяся в местах с богатой смесью попадает в смесь с большим содержанием кислорода только на более поздней стадии цикла, когда уже оставшиеся время и температура недостаточны для ее окисления.

Следовательно, на всех стадиях процесса смесеобразования и сгорания в камере сгорания дизеля необходимо "организованное" движение воздушного заряда, то есть турбулизация. Теоретическими исследованиями ряда ученых доказано, что создание управляемой турбулентности в период развитого горения является предпосылкой решения ряда проблем дизеля, связанных с улучшением использования воздушного заряда и улучшением экономичности на всех режимах. Однако практически такое завихрение в неразделенной камере не используется из-за отсутствия достаточно простого конструктивного решения.

В изложенном в данной статье новом способе работы двигателя с искровым зажиганием после последовательного воспламенения в обоих цилиндрах имело место завихрение заряда, которое было обязано своим появлением задержке воспламенения во втором цилиндре.

В дизеле аналогичная задержка может быть обеспечена относительной задержкой начала впрыска во второй цилиндр. Таким образом, схему нового рабочего процесса можно представить следующим образом.

В обоих цилиндрах - 1 и 2 - (рис. 16) установлены форсунки 3.

Камеры сгорания соединены каналом и имеют одинаковые степени сжатия. Поршни в цилиндрах двигаются синхронно. Несмотря на наличие канала 4, перетекания через него не происходит, так как степени сжатия в цилиндрах одинаковые ($\epsilon_1 = \epsilon_2$) и равны степени сжатия существующих дизелей.

Сгорание начинается в первом цилиндре, и горящие газы частично перетекают во второй цилиндр, который в этот момент служит своеобразным демпфером, позволяющим уменьшить скорость нарастания давления.

Таким образом, реализуется известное преимущество двухфазного впрыска по снижению максимального давления сгорания P_z (примерно на 20 %) и жесткости рабочего процесса. Но, в от-

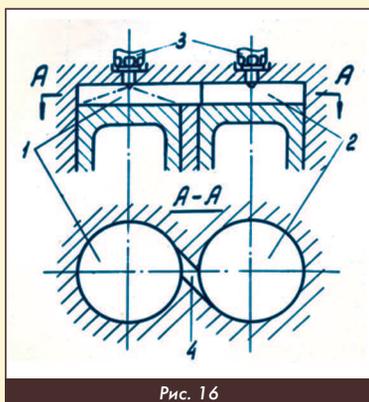


Рис. 16

личие от известного двухфазного впрыска, в предлагаемом способе работы струей газа в цилиндре 2 формируется вихрь, способствующий улучшению смесеобразования, ускорению и более полному сгоранию топлива.

В предлагаемом способе работы дизеля используются два фактора, положительно влияющих на повышение литровой мощности, экономичности и снижения токсичности отработавших газов:

1. Факельное зажигание распыленного дизельного топлива.
2. Завихрение заряда в конечной фазе сгорания.

Из работ советского ученого А.С. Соколика [42] известно, что воспламенение горящими газами дизельного топлива, распыленного в камере сгорания, позволяет обеспечить бездымное сгорание вплоть до $\alpha = 1,05...1,1$.

Достижения подобной величины α следует ожидать и в цилиндре 2, где перетекающие газы одновременно являются источником турбулизации, способствующей догоранию топлива. По мере развития сгорания в цилиндре 2, газы перетекают обратно в цилиндр 1, где интенсивно турбулизируют догорающий заряд.

Последнее условие, подтвержденное рядом экспериментальных работ, обеспечивает бездымную работу с $\alpha = 1,1...1,15$ и уменьшает удельный расход топлива на 7...9 %. Количество газа, идущего на завихрение в этих экспериментах, составляло 5...6 % общего заряда [43].

В предлагаемом способе работы расчетная величина перетекающего заряда составляет около 9 % общего заряда цилиндров. Потери энергии на завихрение заряда составляют по расчетам 22 % от аналогичных потерь на перетекание заряда вихрекамерного двигателя [21].

Таким образом, разделение впрыска по цилиндрам и воспламенение части заряда горящими газами позволяет существенно воздействовать на динамику процесса сгорания и осуществить бездымное сгорание при $\alpha = 1,15$. Кроме того, имеется возможность управлять интенсивностью вихря, оптимального для конкретного скоростного и нагрузочного режима.

В каждом из цилиндров нового двигателя используется неразделенная камера сгорания, обеспечивающая лучшую экономичность. В предлагаемом способе работы, при работе с $\alpha = 1,15$ литровая мощность будет выше в 1,2...1,3 раза, чем в обычном дизеле с $\alpha = 1,4...1,5$.

При работе предлагаемого дизеля при тех же значениях α , что и в обычном дизеле, его экономичность будет выше на номинальном режиме на 5...8 %, на режимах малых нагрузок при низкой частоте вращения коленчатого вала примерно на 10 %, а токсичность отработавших газов будет соответствовать нормам Евро 5 [44].

Для дополнительного снижения токсичности могут быть использованы средства по снижению токсичности отработавших газов, применяемые в современном дизелестроении.

Опытная проверка предлагаемого способа работы дизеля еще не проведена. Но основные факторы, положительно влияющие на улучшение процессов смесеобразования и сгорания (воспламенение части заряда горящими газами и завихрение части заряда в конечной фазе сгорания) прошли опытную проверку на опытных образцах двигателей с искровым зажиганием, о которых было рассказано выше.

Заключение

В нашей стране действует фактический запрет на освоение в серийном производстве техники мирового уровня и тем более техники, превосходящей мировой.

В СССР была модель "догоняющего развития" и "неуклонной модернизации" по уровню западных стран. Отраслевые институты выполняли и выполняют свою роль именно в этом качестве. Особенно это было заметно по советскому автомобилестроению- и двигателестроению.

Однако существовала принципиальная возможность создания и проведения исследований новых оригинальных разработок на основе отечественных идей и изобретений. На предприятиях существовали "фонды по новой технике", которые не могли быть

использованы на другие нужды. Иногда это приводило к созданию прорывных технических решений, которые показывали альтернативный путь развития в соответствующих областях техники. Что само по себе является весьма ценным результатом.

С начала 1990-х годов проведение исследований в нашей стране в данных областях техники стало невозможным. Заявки на проведение НИОКР и исследований на период более трех лет не принимаются, а тематика разработок в области поршневых ДВС не считается приоритетной. Однако охрана окружающей среды остается одной из самых актуальных проблем. Одним из существенных источников загрязнения атмосферы городов являются двигатели внутреннего сгорания.

Так как наша страна не является субъектом в технической политике в данной области, мы вынуждены двигаться в едином направлении с развитыми странами. Однако и у этих стран нет ответов на все вопросы.

В конце 2015 года было заключено Парижское соглашение по климату, предусматривающее снижение вредных выбросов в атмосферу. В это время дизельные машины занимали половину рынка новых автомобилей в Европе, так как считалось, что лучшая экономичность дизеля снижает эмиссию CO₂.

Были проведены несколько исследований, результаты которых показали, что дизельные двигатели, выбрасывающие в атмосферу больше NO_x, чем бензиновые аналоги, оказывают прямое влияние на развитие аллергии, инфарктов, инсультов и раковых заболеваний среди населения.

В сентябре 2015 года выяснилось, что концерн Volkswagen оснащал свои автомобили программным обеспечением, которое помогало в десятки раз занижать уровень вредных веществ в выбросах во время сертификационных испытаний. Таким образом, оказалось, что применение топливной системы Common Rail с электронным управлением и высоким давлением впрыска, системы рециркуляции (EGR) с последующим охлаждением отработавших газов, двухступенчатого турбонаддува, повышающего наполнение цилиндров, системы избирательной каталитической нейтрализации (SCR) с применением реагента AdBlue, не может обеспечить заявленных показателей токсичности отработавших газов на всех возможных режимах работы двигателя.

С 1 сентября 2020 года в Европе вступил в силу новый стандарт проверки уровня вредных выбросов автомобилей (WLTP), который предусматривает тестирование автомобилей на предмет вредных выбросов в реальных условиях. Кроме того, ранее власти ЕС приняли решение о резком сокращении к 2030 году выбросов углекислого газа автомобилями - на 35 %, постепенном запрете дизельных машин и увеличении числа электрокаров.

Однако есть и другие примеры: корпорация Weichai (Китай) объявила, что сумела создать дизельный двигатель с эффективным КПД более 50 % в среднем мощностном диапазоне [45].

Специалисты из немецкой TUV SUD (Международная организация по инспектированию и сертификации) и "Китайского исследовательского центра автомобильных технологий" подтвердили, что КПД нового дизельного двигателя компании составил 50,26 %. В связи с этим, представителям корпорации Weichai был вручен подтверждающий сертификат.

За 10 лет корпорация привлекла к своим разработкам около 200 докторов наук, более 300 высококвалифицированных специалистов, свыше 3000 исследователей со всего мира и инвестировала \$4,5 млрд. Эта группа ученых, осуществлявшая огромное количество моделирований и стендовых испытаний, изучила и проанализировала тысячи разных проектов, постоянно пробовала и совершенствовала существующие решения, фиксировала повышение КПД на каждые 0,1 %, пока, наконец, не добилась исторического прорыва. Всё это и позволило создать двигатель с реальным КПД выше 50 %.

Чтобы достичь такого результата были отобраны различные технологии и сгруппированы в пяти направлениях:

1. Повышение скорости сгорания на (30 %) путем оптимизации процессов газообмена, впрыска топлива и формы камеры сгорания;

2. Повышение жесткости всего двигателя (на 60 %) для обеспечения устойчивости к высокому давлению сгорания изменением конструкции отдельных деталей;

3. Обеспечение точности определения размеров выбросов загрязняющих веществ при их снижении из-за усовершенствования процессов сгорания;

4. Снижение потерь на трение в двигателе (на 20 %) благодаря индивидуальному подбору смазки к трущимся парам;

5. Повышение эффективности работы дизельного двигателя благодаря более точному моделированию рабочих процессов, их прогнозированию и разработке соответствующих программ электронного блока управления.

Специалисты отрасли указывают на то, что повышение КПД с уровня 46 % до 50 %, позволит снизить расход дизельного топлива на 8 % и соответственно снизить уровень выбросов CO₂ на 8 %. Это станет огромным вкладом в решение экологических проблем.

В ходе проекта по разработке своего силового агрегата Weichai пользовалась поддержкой немецкой корпорации Bosch и других ведущих мировых организаций. На пресс-конференции корпорация Weichai объявила, что будет открыта к сотрудничеству и партнерству с компаниями со всего мира для движения к новой цели - создания дизельных двигателей с реальным КПД 55 %! [45]

Достижение показателя эффективного КПД более 50 %, а тем более 55 % дизельного двигателя делает не состоятельными экологические расчеты эффективности электромобилей по сравнению с дизельными.

Если сравнить достижения китайской компании с представленными в данной статье отечественными разработками, то получатся следующие результаты:

1. Корпорация Weichai удалось повысить скорость сгорания на 30 %. Скорость сгорания в двигателе ДПС ВНИИ 3.101 больше скорости сгорания в базовом двигателе до 8 раз.

2. Корпорация Weichai пошла по пути повышения устойчивости системы к повышенному давлению сгорания. При применении нового рабочего процесса максимальное давление сгорания P₂ меньше в 1,5 раза, чем в обычном дизеле при прочих равных условиях.

3. Корпорация Weichai для обеспечения контроля выбросов загрязняющих веществ пошла по пути усложнения системы контроля, а при внедрении нового рабочего процесса нет необходимости в усложнении системы контроля поскольку величина выбросов у этого рабочего процесса ниже.

4. Корпорация Weichai потери на трение снизила на 20 % путем введения зонирования смазки. В двигателе "Каспий-65" снижение величины механических потерь на 52 % достигнуто благодаря применению БСМ.

5. Корпорация Weichai пошла по пути разработки собственного электронного блока управления, соответствующих моделей и программ. В варианте нового рабочего процесса с самовоспламенением от сжатия, управляемость нового процесса сгорания выше, чем в обычном дизеле благодаря возможности управления интенсивностью вихря, оптимальной для конкретного скоростного и нагрузочного режимов.

Использование имеющегося научно-технического, конструкторского и технологического заделов по двигателям с двухконтурной организацией рабочего процесса, представленным в таблице № 1, позволит создать и организовать производство двигателей с управляемым процессом сгорания (УПС), в диапазоне мощности от 30 до 200 л.с., уровнем шумности не более 90 дБ и не допускающих дымность.

Предлагаемые двигатели с искровым зажиганием сочетают преимущества бензиновых двигателей (высокая литровая мощность, малая удельная масса, высокая частота вращения) и дизелей (высокая экономичность). Преимущества достигаются совокупностью оптимальных параметров рабочего процесса:

- степени сжатия $\varepsilon = 11...13$;
- количественно-качественному регулированию заряда, допускающему обеднение смеси на частичных нагрузках до коэффи-

циента избытка воздуха $\alpha = 2,5$.

В связи с наличием активного направленного воздействия на процесс сгорания, токсичность отработавших газов снижается в три - пять раз на частичных нагрузках по сравнению с традиционными двигателями.

Дополнительное преимущество предлагаемых двигателей - многотопливность, то есть способность работы без детонации на низкооктановых сортах топлива, включая бензин А-80, керосин и других при указанном выше значении ϵ .

В сравнении с традиционными бензиновыми двигателями со степенью сжатия, равной 10 (топливо - бензин А-95), литровая мощность предлагаемого двигателя на 10 процентов выше, а удельный расход топлива ниже:

- на режиме максимальной мощности - на 12...15 %,
- в условиях городской езды - на 20...25 %, **П**
- на режимах близких к холостому ходу - на 35...40 %.

Литература

1. Морозов К.А. Повышение экономичности двигателя с искровым зажиганием путем расслоения заряда // Труды ЦНИТА, выпуск № 32, 1967, с. 42-53.
2. https://www.eurekalert.org/pub_releases/2020-01/uog-fet012320.php
3. Date T., Jagi S., Jshi Zuge A. M3) Fujii J. Research MD Development of the Honda CVCC Engine. Paper N 740605 Presented at the West Coast Meeting. Anaheim, California, August 12-16, 1974.
4. Двигатель VTЭС-Е с послойным смесеобразованием фирмы Honda, Автомобильная промышленность США, 1993, № 7, стр. 13.
5. https://quto.ru/journal/articles/kak-nemcy-realizovali-skrutyi-potencial-benzinovykh-motorov.htm?utm_referrer=https%3A%2F%2Fzen.yandex.com
6. Соколик А.С., Свиридов Ю.Б., Воинов А.Н. Влияние химических и турбулентных факторов на процесс сгорания в двигателях. Известия АН СССР, ОТН № 12, 1959, с. 1848.
7. Воинов А.Н. Сгорание в быстроходных двигателях. Москва, Машиностроение, 1977, - 278 с.
8. Чирков А.А. Проблемы управления турбулентностью при смесеобразовании и горении в дизелях. Энергомашиностроение, А 6, 1971.
9. Вахошин Л.И., Маркова И.В. Повышение показателей двигателя с искровым зажиганием. Труды НАМИ, вып. III, - Москва, 1969.
10. Третьяков Н.П. Комплекс методов аналитического исследования основных процессов автомобильных карбюраторных двигателей. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. - Усть-Каменогорск, 1982, - 447 с.
11. Свиридов Ю.Б., Глушков В.В. Автомобильные двигатели с искровым зажиганием и послойным сгоранием рабочей смеси - Москва, НИИН - автопром, 1969.
12. Экспресс-информация "Поршневые и газотурбинные двигатели" № 40, 1978, Москва.
13. В.М. Кушуль. Прогрессивный двигатель, или печальная судьба изобретения. Катера и яхты, № 5, 1986 г. Стр. 30.
14. Кушуль В.М. Новый тип двигателя внутреннего сгорания, 1965, Ленинград.
15. Beal N.R., Hodgetts D., The Cranfield - Kushul Engine. Combust. Engines. London - New-York, 1976, 87-99.
16. Arques Ph., Evolution thermodinamique et aerodinamique de la masse gazeuse dans un moteur a transvasement a allumage commande. "Entropie", 1977, № 74.
17. Теоретические и экспериментальные исследования по разработке новых термодинамических циклов и созданию новых конструктивных схем двигателей с высоким КПД и малотоксичным выхлопом, а также средств автоматического управления его процессами. Отчет по НИР Ленинград, ЛИАП, 1979. Рег. номер ВИНТИ 77073355, - стр. 37.
18. Орлин А.С., Крулова М.Г. Двигатели внутреннего сгорания. Москва, Машиностроение, 1990 год, стр. 212.
19. Кушуль В.М., Костин А.И., Устищенко Г.А. Токсичность отработавших газов двигателя нового типа, ЛИАП, Выпуск 125, 1978 г.
20. Исследование и экспериментальное уточнение основных параметров рабочего процесса и конструкции опытного двигателя, работающего по новому циклу, для перспективного мотоцикла Ковровского завода, Отчет по НИР Л 538, Ленинград, ЛИАП, 1971. Рег. номер ВИНТИ 68027956, - с.54.
21. Костин А.И. Исследование некоторых особенностей осуществления рабочего процесса двигателей в двух сообщающихся

цилиндрах при последовательном воспламенении их зарядов, Диссертация, Ленинград, ЛИАП, 1973, - 137 с.

22. Костин А.И. ДВС с послойным смесеобразованием, Материалы X Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотракторных средств", Владимирского Гос. Университета, 2004 г., с.254-256.

23. Герзон П.С. Улучшение экономических и токсических показателей двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой, диссертация, Москва, МАДИ, 1983 - С 168.

24. Стефановский В.С. и др. Испытания двигателей внутреннего сгорания. Москва, Машиностроение, 1972, - 368 с.

25. Демочка О.И. Пути уменьшения вредности отработавших газов карбюраторных двигателей. Москва, НИИНавтопром, 1968, - 64 с.

26. Герзон П.С., Панин В.И., Костин А.И., Кушуль В.М. Двухтактный двигатель внутреннего сгорания. Заявка 1 3244605/25-06 от 17.12.1980 г., Положительное решение от 20.08.1981 г.

27. Морозов К.А., Свиридов Ю.Б., Синельников Н.И. Повышение экономичности двигателей с искровым зажиганием путем качественного регулирования нагрузки при расслоении заряда. Труды ЦНИТА, вып. 32, 1967.

28. Костин А.И., Кушуль В.М., Герзон П.С., Панин В.И. Двухтактный двигатель внутреннего сгорания. Заявка № 2723552/25-06 от 19.02.1979, Положительное решение от 17.10.1979.

29. Варнацкий В.И. Исследование режимов работы автомобильного двигателя в эксплуатационных условиях. Сборник трудов Института двигателей АН СССР, "Вопросы экономичности транспортных двигателей", Москва, 1961.

30. Исследование работы двухтактного мотоциклетного двигателя на обедненных смесях. ВНИИМотопром, технический отчет № 1501, Серпухов, 1976, - 10 с.

31. Соболев Л.М. Повышение эксплуатационных качеств автомобилей, тракторов и стационарных двигателей сельскохозяйственного назначения в связи с характером протекания процесса смесеобразования. Докторская диссертация, Кострома, 1974, - 477 с.

32. Nakamura Josito. Better Breathing and Burning Boost Small Engine Pover. SAE. I. V. 1965, № 10, 44.

33. Костин А.И., Герзон П.С. К анализу теоретического цикла двигателя с двумя сообщающимися цилиндрами. Автомобильная промышленность, № 6, 1985 г.

34. Кондрашев В.М., Григорьев Ю.С, Тупов В.В. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания. Москва, Машиностроение, 1990 г. Стр. 51.

35. Миллер А.О. По следам забытых вариантов ДВС, Двигатель, 2004 год, №6.

36. Лашманов В.В., Костин А.И. Первые результаты испытаний макетного образца двигателя. Двигателестроение, 2003 г., № 2, стр. 34 - 36

37. <https://www.youtube.com/watch?v=gEqzV9iRxtY>

38. Костин А.И., Куколев М.И. Опытные образцы бесшатунных двигателей. Материалы XII Международной научно-практической конференции Владимирского гос. Университета, - Владимир, 2010, с.194-198.

39. Дворцов В.С. Динамическое моделирование бесшатунного силового механизма. Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета, 3(226), 2015.

40. Смайлис В.И. Малотоксичные дизели. Ленинград, Машиностроение, 1972.

41. Брозе Д.Д. Сгорание в поршневых двигателях. Москва, Машиностроение, 1969 г.

42. Соколик А.С. Форкамерно-факельное воспламенение, как основа нового класса двигателя. Сборник "Сгорание и смесеобразование в дизелях", АН СССР, 1960 г.

43. Ронинсон Л.С. Улучшение параметров дизелей при малых коэффициентах избытка воздуха путем завихрения рабочего тела. Энергомашиностроение, 1965 г., № 5.

44. Костин А.И., Миллер А.О. Повышение эффективных показателей и снижение токсичности отработавших газов судовых дизелей. стр. 102, Материалы V Всероссийской межотраслевой научно-технической конференции "Актуальные проблемы морской энергетики", Санкт-Петербургского гос. Морского Технического Университета, 2016 г.

45. <http://www.gruzovikpress.ru/article/25616-korporatsiya-weichai-sozdala-perviy-v-mire-dizelnyy-dvigatel-s-kpd-vyshe-50/>

Связь с автором: miller_amida@mail.ru