

ПУТЬ ПЛАМЕНИ ВО ВТОРОМ КОНТУРЕ ИЛИ ПОЧЕМУ ФАКЕЛ ПЛАМЕНИ ЛУЧШЕ, ЧЕМ ТОПЛИВНЫЙ ФАКЕЛ И ВОЗДУШНЫЙ ВИХРЬ

Андрей Олегович Миллер, ведущий специалист ГУАП, Санкт-Петербург

В нашей стране были разработаны, изготовлены и испытаны двигатели внутреннего сгорания с новым двухконтурным рабочим процессом. Получены положительные результаты, подтверждающие перспективность новых двигателей. Новый рабочий процесс с послойным смесеобразованием и сгоранием в двух совместно работающих цилиндрах может быть использован для создания нового поршневого двигателя с существенно более высокими эффективными показателями и низкой токсичностью отработавших газов (ОГ).

Internal combustion engines with a new dual-circuit workflow have been developed, manufactured and tested in our country. Positive results have been obtained, confirming the prospects of the new engines. The new workflow with layered mixing and combustion in two co-operating cylinders can be used to create a new piston engine with significantly higher efficiency and low exhaust gas toxicity.

Ключевые слова: двухконтурный рабочий процесс, факельное зажигание, послойное смесеобразование, качественное регулирование мощности, малотоксичный процесс сгорания.

Keywords: dual-circuit workflow, flare ignition, layer-by-layer mixing, high-quality power control, low-toxic combustion process.

Улучшение эффективных показателей ДВС связано с возможностью управления процессами смесеобразования и сгорания, которые должны обеспечивать высокую эффективность рабочего процесса на всех возможных режимах работы двигателя.

Для решения этой задачи создаются опытные двигатели с изменяемой степенью сжатия и ходом поршня, с отключаемыми цилиндрами, с разделенными или добавленными тактами, с продолженным расширением; на практике широко применяется варьруемое газораспределение.

Однако для получения высокой экономичности необходимо обеспечить высокое качество самого главного процесса в рабочем цикле двигателя - процесса сгорания.

Техническое развитие ДВС пришло к тому, что в современных двигателях всех типов основным способом подачи топлива в цилиндры стал топливный факел из форсунки, установленной в камере сгорания. Однако такой способ подачи топлива имеет не только достоинства, но и недостатки.

Наибольшие проблемы имеются в дизельных ДВС. Изначально двигатель Дизеля создавался для работы на дешевых сортах топлива с низкими антидетонационными свойствами. Для рабочего процесса такого двигателя необходимо сильное сжатие чистого воздуха и поздний непосредственный впрыск топлива. Это позволяет избежать детонации топлива при высокой степени сжатия, но это происходит из-за ухудшения качества смесеобразования.

Поэтому в классическом двигателе Дизеля топливо впрыскивалось и распылялось в цилиндры посредством сжатого воздуха, который сжимался специальным компрессором. Однако сейчас применяется только гидравлический впрыск, одним из вариантов которого является топливная система аккумуляторного типа "common rail".

В ДВС с принудительным зажиганием применение топливного факела (прямого впрыска топлива - GDI) приводит к аналогичным результатам, несмотря на возможность использования более раннего впрыска и, следовательно, более качественного смесеобразования. Подобно дизельным двигателям, прямой впрыск топлива в двигателях с GDI создает богатые топливом карманы вблизи зоны впрыска, а особые условия сгорания в этих карманах способствуют образованию (в больших количествах, чем в двигателях с гомогенной смесью) углеродистых твердых частиц и особенно черного углерода (СН), негативное воздействие которого на окружающую среду значительно выше преимущества, полученного от снижения выбросов CO₂. Что было подтверждено лабораторными исследованиями [1].

Решением проблем может служить турбулизация заряда вихрем воздуха или бедной смеси в момент развитого горения и сгорания на линии расширения. Такой вихрь может быть получен от потока воздуха, поступающего на такте впуска через впускной клапан.

Однако, к моменту развитого горения и сгорания на линии расширения вихревое движение заряда, полученное в процессе впуска, сохранить не удаётся, так как от начальной кинетической энергии вихреобразования сохраняется лишь около 4 % [2].

Сам вихрь к этому моменту может быть загрязнен образующимися инертными газами и уже не содержать необходимого количество кислорода.

В ещё большей степени это может относиться к вихрям, которые генерируются вытеснителями на поршне или головке цилиндров.

Поэтому подобное вихревое движение в ряде случаев может не только улучшить показатели дизельного двигателя, но и привести к увеличению жёсткости работы из-за увеличения периода задержки самовоспламенения топлива, а в двигателе с принудительным зажиганием к увеличению задержки повышения давления.

Более эффективным было бы подавать вихрь чистого воздуха в зону топливного факела только в моменты развитого сгорания и сгорания на линии расширения. При этом сокращается время между созданием и использованием вихрей и, следовательно, могут быть уменьшены энергетические затраты на создание вихря.

Таким вариантом подачи воздушного вихря в зону топливного факела мог бы служить пневматический впрыск топлива, при котором, однако, будет необходимо применение компрессора, насос-форсунок или использование подпоршневых полостей цилиндров для сжатия воздуха до более высоких показателей давления, чем при обычном пневматическом впрыске. Это приводит к дополнительным затратам энергии и увеличивает массогабаритные характеристики двигателя и его стоимость.

В двигателе В.М. Кушуля (рис. 1) вихрь сжатого чистого воздуха

подаётся в момент развитого сгорания из цилиндра 2 в цилиндр 1, в котором осуществляется зажигание и сгорание всего топлива, предназначенного для обоих цилиндров. Это обеспечивается фазовым сдвигом движения поршней кривошипно-шатунного механизма на соответствующий угол [3].

В этом случае обеспечиваются качественное регулирование мощности в широких пределах даже при внешнем смесеобра-

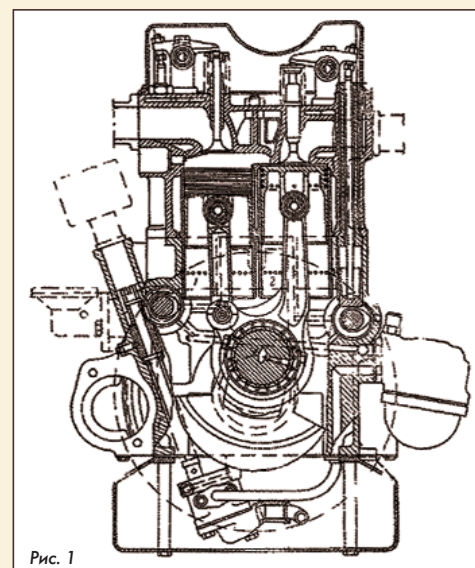


Рис. 1

зовании и работа без детонации на низкооктановом топливе при высокой степени сжатия. Поэтому почти все двигатели Кушуля были карбюраторными, где топливный факел отсутствует. Однако был построен двигатель Кушуля и с непосредственным впрыском топлива - дизельный двигатель ДК-9 (рис. 2), показавший низкую токсичность отработавших газов при высокой экономичности [4, 5].

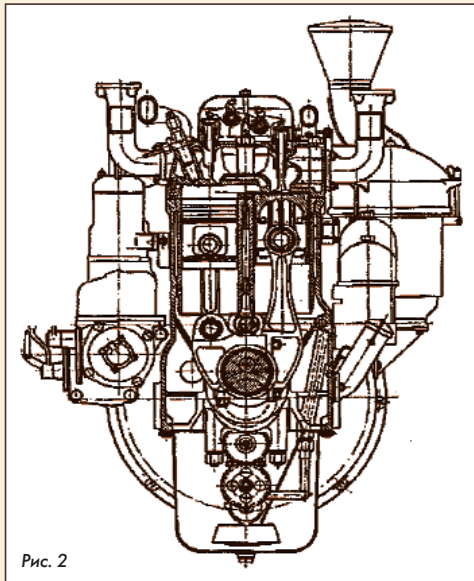


Рис. 2

Таким образом воздушный вихрь доказал свою эффективность и в двигателе с топливным факелом.

В отличие от пневматического впрыска цилиндр 2, используемый в двигателе Кушуля для сжатия воздуха, является рабочим цилиндром, в котором происходит такое же расширение рабочих газов, как и в цилиндре 1. Поэтому в двигателе Кушуля могут полностью отсутствовать

компрессоры и другие агрегаты подачи воздуха в камеру сгорания, которые используются только для сжатия воздуха.

Некоторые авторы относят двигатель Кушуля к двигателям с разделенными тактами. [6] Что не совсем верно. В двигателях с разделенными тактами (например, в двигателе "Scuderì Group", рис. 3) такты рабочего цикла, такие как сжатие и расширение рабочей смеси, осуществляются в разных цилиндрах, как правило, в двух. При этом такой двигатель, как и двигатель Кушуля, может состоять из двухцилиндровых модулей.

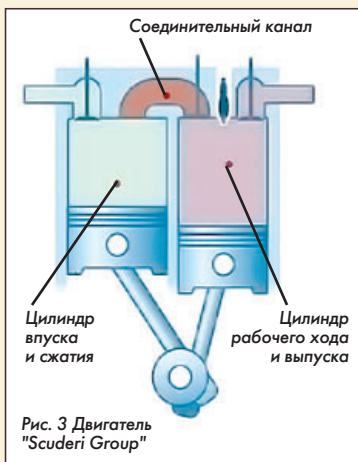


Рис. 3 Двигатель "Scuderì Group"

Разделение в пространстве тактов рабочего цикла усложняет конструкцию двигателя и, как правило, ухудшает его массогабаритные показатели. Потенциальный выигрыш от разделения процессов сгорания и расширения частично нивелируется дополнительными энергетическими потерями при перетекании газов между полостями, а также потерями теплоты в технических решениях с дополнительными

камерами, размещенными в головке цилиндра. По этой причине двигатели с разделенными тактами до настоящего времени не нашли промышленного применения [6].

В двигателе Кушуля все такты рабочего цикла (впуск - сжатие - расширение-выпуск) осуществляются одновременно в каждом из двух цилиндров модуля, и только зажигание и сгорание всего топлива происходит в одном из двух цилиндров. Поэтому потери теплоты в двигателе Кушуля меньше, чем в обычном двигателе и, тем более, чем в двигателе с разделенными тактами [7].

Однако потери на перетекание газов между цилиндрами двигателя Кушуля примерно равны потерям двигателей с разделенными тактами, так как на такте сжатия примерно половина заряда модуля (воздух цилиндра 2) вытесняется в цилиндр 1, а после сгорания топлива примерно половина объема рабочих газов поступает через канал в цилиндр 2 на такте расширения заряда.

В двигателе с разделенными тактами (например, в двигателе "Scuderì Group") весь заряд поступает сначала в один цилиндр, а потом после сжатия вытесняется через канал в другой цилиндр модуля. Поэтому полный рабочий цикл может происходить за

один оборот коленчатого вала несмотря на то, что двигатель четырехтактный.

Другие авторы полагают, что В.М. Кушуль "Свой цикл осуществил на П-образном двигателе Цоллера" [8]. Это тоже только внешнее сходство. В двухтактных двигателях Цоллера с П-образной продувкой (рис. 4) камера сгорания выполнена общей для двух цилиндров, а разделены по цилиндрам впускные и выпускные продувочные окна и каналы. В двигателе Кушуля П-образная продувка не эффективна из-за недостаточно большого сечения канала между цилиндрами.

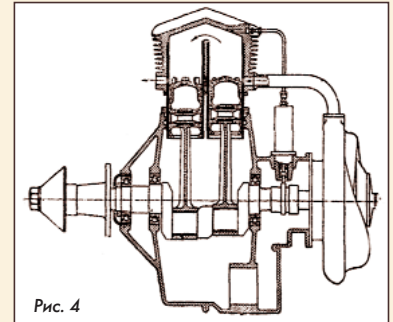


Рис. 4

Сам процесс сгорания топлива в двигателях Цоллера не имеет никаких отличий от обычного сгорания. Это объясняется тем, что газораспределение такого двигателя улучшает наполнение цилиндра на полных нагрузках, но не обеспечивает ни расслоения, ни турбулизации заряда на режимах частичных нагрузок. Разделение заряда в двигателе Цоллера, показанном на рис. 4 обеспечивается только впрыском топлива.

Двигатель Кушуля является первым в мире поршневым двухконтурным двигателем внутреннего сгорания (ДДВС), где каждый из двух цилиндров одного модуля является контуром, в процессе впуска может поступать топливо - воздушная смесь разного состава, включая чистый воздух, а рабочий процесс может происходить с разными степенями сжатия при полном или частичном смешении зарядов первого и второго цилиндров.

Второй контур впервые появился в авиационных турбореактивных двигателях (ТРД) и большинство современных турбореактивных моторов являются двухконтурными (ТРДД).

Смысл применения второго контура заключается в экономии энергии при сжатии воздуха второго контура, которое осуществляется за счёт энергии, вырабатываемой в первом. То есть во втором контуре протекает воздух, получивший ускорение от вентилятора, который приводится от турбины первого контура. Так как ТРДД являются двигателями прямого действия, то они могут создавать тягу как благодаря истечению газов из сопла первого контура, так и благодаря истечению (расширению) сжатого воздуха второго контура [9].

В ДВС весь воздух должен использоваться только для сгорания топлива. Поэтому в двигателе Кушуля работа, производимая в цилиндре 1, обеспечивает сжатие воздуха в цилиндре 2 (воздуха второго контура), который затем подается в камеру сгорания цилиндра 1 (первого контура).

Недостатком двигателя Кушуля является недоиспользование воздуха цилиндра 2 из-за обязательного наличия зазора между поршнем и головкой, а также выточек под клапаны. Это приводит к неполному вытеснению воздуха из цилиндра 2 в цилиндр 1 и к некоторому снижению удельных мощностных показателей [5].

Таким образом, вихрь воздуха является эффективным средством воздействия на процесс сгорания, но его получение в нужное время и с необходимой эффективностью сопряжено с определенными проблемами даже в двухконтурных ДВС.

Недоиспользование воздуха в двигателях с топливным факелом - в дизельных двигателях и не рациональное разделение заряда по составу в цилиндре в двигателях с GDI являются недостатками, требующими своего устранения. Однако ни факел топлива, ни вихрь воздуха сами по себе решить эти проблемы полностью не могут.

Однако известно, что подвижным факелом пламени достаточной интенсивности можно полностью сжечь смесь любого состава, находящуюся вне пределов воспламенения, включая чистый воздух [10]. Но для создания факела пламени в одном цилиндре необходима форкамера, то есть камера сгорания двигателя должна быть разделенной.

В 1936 году в СССР было предложено форкамерно-факельное зажигание (ФФЗ), в котором воспламенение рабочей смеси в цилиндре осуществляется факелом пламени, который образуется в форкамере, сообщающейся с основной камерой одним или несколькими каналами.

Факел пламени, выбрасываемый из форкамеры, является турбулентным очагом, как зажигания, так и горения, позволяющим осуществлять более быстрое (по сравнению с искровым зажиганием в 2,0...2,4 раза) сгорание обедненных смесей до $\alpha = 1,5...1,6$. При дальнейшем обеднении смеси было необходимо переходить к количественному регулированию [11, 12].

В форкамере расположены свеча зажигания (рис. 5) и небольшой дополнительный впускной клапан, открывающийся од-

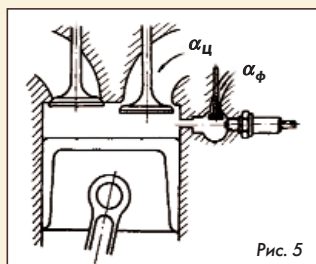


Рис. 5

новременно с основным впускным клапаном. Через дополнительную впускную систему, питаемую особой секцией карбюратора, форкамера продувается обогащенной смесью и при обеднении смеси в цилиндрах в форкамере поддерживается состав смеси, обеспечивающий воспламенение.

Недостатком ФФЗ является слож-

ная зависимость состава смеси в форкамере от состава смеси в цилиндре и в работе [13] даже исследуется вопрос о создании послойного смесеобразования в самой форкамере. В многоцилиндровом двигателе имеет место неравномерность состава смеси по цилиндрам, на которую накладывается неравномерность питания форкамер, коррекцию состава которых сложно обеспечить даже на современном уровне развития техники, так как объем форкамеры составляет всего 2...3% от объема камеры сжатия. Кроме этого, разделенные камеры сгорания имеют большие тепловые потери в развитые поверхности теплообмена и потери на перетекание газов.

Поэтому, в силу присущих им недостатков двигателя с ФФЗ почти не нашли применения в практике.

Между тем во время исследований ФФЗ было установлено, что бедную смесь в основной камере сгорания (рис. 5) быстрее воспламеняют не продукты сгорания, имеющие наиболее высокую температуру с $\alpha = 0,9...1$, а продукты сгорания с более низкой температурой, которые получаются при горении с большим недостатком воздуха (с $\alpha = 0,4...0,6$). Такие продукты содержат химические более активные вещества (Н, ОН и др.) и значительно быстрее инициируют воспламенение, чем более горячие, но не активные продукты [14].

Именно такие продукты сгорания получались в цилиндре 1 двигателя Кушуля (рис. 1) на режимах близких к максимальной мощности. Однако в двигателе Кушуля в качестве средства воздействия на процесс сгорания служил не факел пламени, а вихрь воздуха, воздух которого не мог быть полностью использован для сгорания топлива.

Рациональнее было бы использовать заряд цилиндра 1 для создания факела пламени, который бы мог воспламенять и сжигать весь заряд цилиндра 2, обедняемый в широких пределах вплоть до чистого воздуха по мере снижения нагрузки на двигатель.

Такое решение было реализовано в новом рабочем процессе двухконтурного двигателя. В работе [15] А.И. Костин показал, что при разделении заряда по составу в двух отдельных цилиндрах, соединенных каналом, факел пламени позволяет использо-

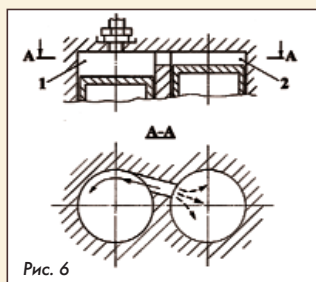


Рис. 6

вать весь воздух для сгорания топлива при последовательном воспламенении и сгорании зарядов обоих цилиндров. Схема факельного зажигания в двух совместно работающих цилиндрах представлена на рис. 6.

Камеры сгорания цилиндров 1 и 2 соединены каналом. В цилиндр 1 на всех нагрузках подается смесь стехиометрического состава ($\alpha \approx 1$), воспла-

меняемая свечой зажигания. В цилиндр 2 подается обедняемая по мере уменьшения нагрузки смесь в пределах от α максимальной мощности до чистого воздуха. После воспламенения заряда факел пламени из цилиндра 1 перетекает в цилиндр 2 через канал и воспламеняет смесь, находящуюся в данном цилиндре. В данном случае скорость горения заряда цилиндра 2 определяется не скоростью распространения фронта пламени в обедненной смеси, величина которой недостаточна, а скоростью движения факела пламени.

После сгорания заряда в цилиндре 2 имеет место обратное реактивное перетекание горящих газов в цилиндр 1 (рис. 6), способствующее лучшему догоранию топлива заряда цилиндра 1. Последнее условие полностью согласуется с требованием теории процесса сгорания о необходимости завихрения в конечной фазе сгорания, при этом это завихрение происходит без применения вытеснителей на поршне или головке цилиндров и разделенных камер сгорания.

Новый рабочий процесс отличается от ФФЗ тем, что форкамера малого объема заменена на камеру сгорания цилиндра 1 которая помимо основной функции выполняет дополнительную - служит источником факела пламени для турбулентного зажигания смеси соседнего цилиндра 2, а камера сгорания цилиндра 2 дополнительно служит источником факела горящих и/или инертных газов для реактивной турбулизации (завихрения) заряда в цилиндре 1.

Наличие индивидуальных органов газообмена - впуска и выпуска - в каждом цилиндре и собственных систем питания камер сгорания обоих цилиндров создает независимый и хорошо контролируемый состав смеси в каждом цилиндре модуля на всех тактах, при этом заряды обоих цилиндров могут иметь высокое качество внешнего смесеобразования на всех режимах работы двигателя.

Таким образом, отсутствуют трудности ФФЗ, связанные с созданием требуемого состава смеси в форкамере при перетекании заряда из форкамеры в цилиндр в процессе всасывания и из цилиндра в форкамеру в процессе сжатия.

К разделению заряда, которое достигается без применения факела топлива (непосредственного впрыска), прибавляется преимущество факельного зажигания, но при этом отсутствуют как разделенная камера сгорания, так и отдельная форкамера, а, следовательно, и их недостатки.

При этом все преимущества неразделенной камеры сгорания сохраняются, так как дополнительная поверхность теплообмена пары цилиндров обусловлена лишь поверхностью канала, которая очень мала и, в отличие от ФФЗ, где у каждого цилиндра есть своя форкамера, распределяется на два цилиндра. Получить такие преимущества при организации рабочего процесса в одном цилиндре невозможно.

По сравнению с двигателем Кушуля новый рабочий процесс обладает следующими преимуществами:

1. Отсутствует необходимость полного вытеснения воздуха из цилиндра 2 в цилиндр 1, так как сгорание происходит в обоих цилиндрах одного модуля и воздух цилиндра 2 полностью используется для сгорания топлива.

2. Синхронное движение обоих поршней устраняет потери на "холостой ход поршней" и может устранять потери на перетекание между цилиндрами до начала сгорания заряда, если степени сжатия равны.

3. На такте всасывания оба цилиндра наполняются свежим зарядом через собственные впускные клапаны, а перетекание воздуха из одного цилиндра в другой на такте сжатия отсутствует, что устраняет потери на перетекание газов.

4. На режиме максимальной мощности в обоих цилиндрах модуля сгорает примерно одинаковое количество топлива и расширение рабочего тела так же происходит в обоих цилиндрах. Отличие от обычного двигателя состоит только в факельном зажигании заряда цилиндра 2. Таким образом, отсутствует перетекание расширяющегося рабочего тела из одного цилиндра в другой и, тем самым, устраняются связанные с этим потери.

5. Устраняется переобогащение заряда цилиндра 1 на режи-

мах близких к максимальной мощности, поэтому отсутствуют трудности с организацией смесеобразования очень богатой смеси, характерной для заряда этого цилиндра двигателя Кушуля.

6. Возможное использование для создания факела пламени более бедной смеси цилиндра 1, чем в двигателе Кушуля, компенсируется тем, что воспламеняемая этим факелом пламени однородная смесь цилиндра 2 имеет стехиометрический состав на режиме максимальной мощности и её воспламеняемость лучше, чем у чистого воздуха воздушного вихря из цилиндра 2 двигателя Кушуля.

Для надежного и быстрого сгорания бедной смеси в цилиндре 2 скорость движения факела пламени должна быть больше скорости сгорания смеси в обычном бензиновом двигателе, что обеспечивается выбором сечения канала, угла опережения зажигания, составом смеси в цилиндре 1 и др. При испытаниях опытного ДДВС с новым рабочим процессом скорость распространения фронта пламени в канале превысила 300 м/с что в 4...8 раз больше, чем в обычном двигателе [16].

Очевидно, что такая высокая скорость является результатом сочетания скорости движения части заряда цилиндра 1 и скорости распространения фронта пламени по перетекающему в канале заряду смеси.

Интенсивность факела пламени, перетекающего из цилиндра 1 со свечой зажигания, должна увеличиваться по мере обеднения смеси в цилиндре 2. В рассматриваемом способе работы этот процесс является саморегулируемым, так как с обеднением смеси цилиндра 2 происходит увеличение доли перетекающего заряда из цилиндра 1, который достигает максимума при наличии в цилиндре 2 только воздуха.

Новый двигатель с искровым зажиганием обеспечивает более высокую экономичность, чем у дизеля. Это связано с тем, что новый двигатель, как и дизель, имеет качественное регулирование мощности в широких пределах коэффициентов избытка воздуха $\alpha = 1...2,4$, а у дизеля $\alpha = 1,4...4$. Кроме этого, благодаря использованию оптимальной степени сжатия ($\epsilon = 11...13$), его механический КПД выше, чем у дизеля при $\epsilon = 16...20$.

В результате эффективный КПД нового двигателя, а следовательно, и экономичность будет выше, чем у дизеля на 9 % из-за уменьшения величины механических потерь и сокращения продолжительности сгорания топлива по углу поворота коленчатого вала (механический КПД равен 0,83 вместо 0,78 у дизеля) при увеличении литровой мощности на 14 % [17].

Дополнительные преимущества нового двигателя с искровым зажиганием по сравнению с дизелем:

1. Снижение уровня шума из-за уменьшения максимального давления сгорания (в 1,5 раза) и снижения жёсткости 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. Себестоимость изготовления нового двигателя в 1,3...1,6 раза ниже дизеля (на уровне стоимости современного бензинового двигателя).
5. Стоимость используемого низкооктанового бензина А-80 на 20 % ниже стоимости дизельного топлива.

Однако в некоторых случаях применение принудительного зажигания в двигателе является неприемлемым по соображениям пожаробезопасности, наличия помех от системы зажигания и др.

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

Начальное воспламенение в дизеле носит многоочаговый характер, что обеспечивает большую скорость сгорания в этот период. В дальнейшем часть топлива, поступающего из форсунки в среду горящего топливного факела, воспламеняется почти мгновенно. Однако условия сгорания этого топлива менее благоприятны,

так как в процессе сгорания происходит постепенное загрязнение среды топливного факела образующимися инертными газами. Скорость сгорания при этом зависит от интенсивности подачи топлива в цилиндр и условий поступления кислорода в зону горения. Последняя часть подаваемого топлива обычно сгорает на линии расширения в условиях недостатка кислорода [18].

Возникает проблема не полного использования воздуха в цилиндрах - лучшие вихрекамерные дизели работают на режиме максимальной мощности с $\alpha \approx 1,2$, а в более экономичных двигателях с неразделенными камерами сгорания на максимальной мощности величина коэффициента избытка воздуха α не менее 1,3...1,4. Другие значения α не обеспечивают хороших мощностных и экономических показателей и нормальной работы дизельного двигателя.

Основным недостатком неразделенных камер является несогласование форм и размеров топливного факела и камеры сгорания, вихревого отношения и частоты вращения коленчатого вала при работе на нерасчетных режимах. Кроме того, жесткая связь условий смесеобразования с качеством топлива исключает использование в таких двигателях топлив различных сортов [19].

На режимах холостого хода с малым числом оборотов работа дизельного двигателя так же неудовлетворительна. Это связано с уменьшением стабильности работы топливного насоса при уменьшении подачи топлива, падением давления впрыска и возможным переобеднением смеси в отдельных зонах цилиндра исключаям её догорание.

В результате опытов с ФФЗ было установлено, что при факельном зажигании равномерно-распределенного топлива в объёме камеры сгорания обеспечивается бездымное сгорание вплоть до $\alpha = 1,05...1,1$ [20].

Таким образом, при факельном зажигании, в вихрекамерном дизельном рабочем процессе и в двухконтурном двигателе возможно улучшение использования воздушного заряда и форсирование мощности дизеля по α .

Однако, в двухконтурном двигателе Кушуля имеются потери на перетекание газов, а в разделенных камерах сгорания кроме потерь на перетекание газов еще имеются тепловые потери в развитые поверхности теплообмена. Но это не большие потери, по сравнению с тепловыми потерями от значительной задержки воспламенения в дизельных двигателях [21].

В новом двухконтурном рабочем процессе может отсутствовать перетекание воздуха на такте сжатия из одного цилиндра в другой и отсутствует перетекание рабочего тела на такте расширения из одного цилиндра в другой, что устраняет потери на перетекание газов. Меньше и тепловые потери по сравнению с разделенными камерами сгорания, так как дополнительная поверхность теплообмена пары цилиндров обусловлена лишь поверхностью канала, которая очень мала и распределяется на два цилиндра.

Таким образом, применение нового двухконтурного рабочего процесса целесообразно для дизельного двигателя. Схема совместно работающих цилиндров представлена на рис. 7.

В обоих цилиндрах камеры сгорания соединены каналом и в них установлены форсунки. Поршни в цилиндрах двигаются синхронно. Несмотря на наличие канала 4, перетекание через него не происходит, так как степени сжатия в цилиндрах одинаковые ($\epsilon_1 = \epsilon_2$) и равны степени сжатия существующих дизелей.

В предлагаемом способе работы дизеля используются два фактора, положительно влияющих на повышение литровой мощности, экономичности и снижения токсичности отработавших газов: факельное зажигание распыленного дизельного топлива и завихрение заряда в конечной фазе сгорания.

1. Факельное зажигание распыленного дизельного топлива.

После самовоспламенения от сжатия впрыснутого топлива в

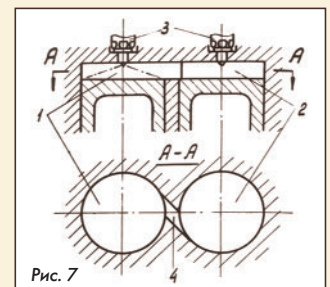


Рис. 7

цилиндре 1 горячие газы в виде факела пламени перетекают в цилиндр 2, способствуя воспламенению топлива с минимальной задержкой воспламенения; цилиндр 2 так же служит своеобразным демпфером, позволяющим уменьшить скорость нарастания давления. Топливо в цилиндре 2 впрыскивается с задержкой по сравнению с цилиндром 1.

Таким образом, реализуется известное преимущество двухфазного впрыска по снижению максимального давления сгорания P_z (примерно на 20 %) и жесткости рабочего процесса. Но, в отличие от известного двухфазного впрыска, в предлагаемом способе работы факелом пламени в цилиндре 2 формируется вихрь, который обеспечивает принудительное воспламенение, ускорение и более полное сгорание заряда этого цилиндра.

Замена взрывного многоочагового самовоспламенения в цилиндре 2 факельным зажиганием от постороннего источника позволяет в значительной мере устранить влияние фазы неуправляемого горения (уменьшить период задержки воспламенения). Появляется возможность получения управляемого вихря требуемой интенсивности (для каждого конкретного скоростного и нагрузочного режима) что позволяет создать полностью управляемый процесс сгорания (УПС) для дизельного двигателя, который определяется законом подачи топлива в цилиндр 2.

В современных условиях УПС проще всего реализуется при использовании системы топливоподачи "common rail" посредством перепрограммирования системы управления.

2. Завихрение заряда в конечной фазе сгорания.

По мере развития сгорания в цилиндре 2, газы перетекают обратно в цилиндр 1, где интенсивно турбулизуют догорающий заряд.

При испытаниях быстроходного дизеля с неразделенной камерой сгорания турбулизация горячей смеси в течение периода развитого сгорания обеспечивалась подачей завихряющего агента от отдельного агрегата, причем в качестве завихряющего агента выступали не только воздух, но и инертные газы.

Подобное завихрение уменьшило удельный расход топлива на 7...9 % в области малых коэффициентов избытка воздуха α и расширило пределы устойчивой и бездымной работы вплоть до $\alpha = 1,1...1,15$. Количество газа (безразлично воздуха или инертного газа), идущего на завихрение, составляло 5...6 % заряда цилиндра воздухом [22, 23, 24].

В предлагаемом способе работы расчётная 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 [15].

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. Поэтому управляемость нового процесса сгорания выше, чем в обычном дизеле.

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 [25].

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

Применение двухконтурного рабочего процесса с использованием факела пламени в качестве основного средства воздействия на процесс сгорания обеспечивает дальнейшее развитие рабочего процесса ДВС и поэтому необходимо активное прове-

дение НИОКР в этой области, в которой наша страна обладает неоспоримым приоритетом. □

Список источников

1. <https://naukatehnika.com/naskolko-ekologichen-zelenyj-motor.html-naukatehnika.com>
2. Чирков А.А. Проблемы управления турбулентностью при смесеобразовании и горении в дизелях // Энергомашиностроение. 1971. № 6.
3. Кушуль В.М. Новый тип двигателя внутреннего сгорания. Л.: Судостроение, 1965. 212 С.
4. Кушуль В.М., Костин А.И., Устименко Г.А. Токсичность отработавших газов двигателя нового типа. Выпуск 125. Л.: ЛИАП, 1978.
5. Миллер А.О. Двухконтурная организация рабочего процесса, как техническая основа создания нового класса поршневых ДВС // Двигатель. 2020. № 4-6. С. 82-95.
6. Тер-Мкртчян Г.Г. Двигатели внутреннего сгорания с нетрадиционными циклами. Учебное пособие. М.: МАДИ, 2015.
7. Кушуль В.М. Термодинамические основы и рабочий процесс двигателя внутреннего сгорания нового типа. Труды ЛИАП, выпуск № 38. Л.: ЛИАП, 1962.
8. Митрофанов С. О ДВС, его резервах и перспективах развития глазами специалиста // Моторевю. 2011. № 11 и № 12. <https://reaa.ru/threads/rabochii-protsess-dvs.18596/#post-969769> <https://reaa.ru/threads/rabochii-protsess-dvs.18596/#post-969770>
9. Миллер А.О. Некоторые особенности рабочего процесса в двухконтурных ДВС (ДДВС) // Двигатель. 2023. № 1-3. С. 48-54.
10. Рикардо Г.Р. Быстроходные двигатели внутреннего сгорания. М.: Mashiz, 1960. 409 с.
11. Кобайдзе В.Ш. Исследование теплонапряженности деталей двигателя при факельном и искровом зажигании. Труды, вып. 96. М.: НАМИ, 1968.
12. Гусак Л.А. Новый принцип воспламенения и горения в двигателях // Изв. АН СССР, Сер. Энергетика и транспорт. 1965. № 12. С. 3-5.
13. Кобайдзе В.Ш. Исследование газообмена между полостями камеры сгорания двигателя с факельным зажиганием в ходе сжатия. Труды, вып. 112. М.: НАМИ, 1969.
14. Л.А. Гусак. Диплом № 142 (СССР) Явление высокой химической активности продуктов неполного сгорания богатой горючей смеси // Открытия. Изобретения. 1974. № 38.
15. Костин А.И. Исследование некоторых особенностей осуществления рабочего процесса двигателей в двух сообщающихся цилиндрах при последовательном воспламенении их зарядов. Диссертация. Л.: ЛИАП, 1973. 137 с.
16. Герзон П.С. Улучшение экономических и токсических показателей двухтактного двигателя с кривошипно-камерной продувкой. Диссертация. М.: МАДИ, 1983. 168 с.
17. Костин А.И. ДВС с послойным смесеобразованием. Владимирский Гос. Университет. Материалы X Международной научно-практической конференции "Актуальные проблемы управления качеством производства и эксплуатации автотракторных средств", 2004. С. 254-256.
18. Артамонов М.Д., Морин М.М. Основы теории и конструирования автотракторных двигателей. М.: Высш. Школа, 1973. 207 с.
19. Еников Р.Д., Гарипов М.Д. Рабочий процесс перспективного поршневого ДВС, Вестник УГАТУ Т. 7, № 3 (16). Уфа: УГАТУ, 2006. С. 12-22.
20. Соколик А.Е., Карпов В.П. Форкамерно-факельное воспламенение как основа нового класса двигателя // Сб. Сгорание и смесеобразование в дизелях. АН СССР, 1960.
21. Дорохов А.Ф., Ханов Ш.М. Анализ тепловых потерь в охлаждающую воду судового вспомогательного дизеля // Двигатели внутреннего сгорания. Сер. 4. Вып. 10. М.: ЦНИИЭИТяжмаш, 1986. С. 4-6.
22. Ронинсон Л.С. Улучшение параметров дизелей при малых коэффициентах избытка воздуха путем завихрения рабочего тела // Энергомашиностроение. 1965. № 5.
23. Ронинсон Л.С., Болдырев И.В. Улучшение индикаторных параметров дизелей со струйным смесеобразованием при малых избытках воздуха путем завихрения рабочего тела // Энергомашиностроение. 1965 г. № 5.
24. Писчаненко В.В. Об особенностях смесеобразования в цилиндре тихоходного дизеля большой мощности, Автореферат диссертации, Труды Одесского института инженеров морского флота, 1955.
25. 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.