

## **НОВЫЕ ВОЗМОЖНОСТИ СВЕЧИ ЗАЖИГАНИЯ**

---

*Свеча зажигания - неотъемлемый атрибут двигателя внутреннего сгорания с легким топливом. Свеча появилась на свет более 160 лет назад сначала в первом двигателе (без сжатия) француза Лемуара, а затем в более эффективном двигателе со сжатием немца Отто.*

*Свеча служит для воспламенения топливоздушнoй смеси в камере сгорания двигателя. Классическая свеча, знакомая всем автолюбителям, содержит стальной корпус с резьбой и шестигранником, изолятор с центральным электродом, образующий искровой зазор с боковым электродом. Свеча по-прежнему является одним из самых напряженных узлов двигателя. Причина - в тяжелейших условиях эксплуатации: циклические воздействия высоких напряжений, температуры, давления, широкий диапазон режимов двигателя, отложения продуктов сгорания, электроэрозия и др. На совершенствование свечи тратились и до сих пор тратятся большие ресурсы. За последние пять лет в Патентном фонде США зарегистрировано более 7 тысяч "свечных" патентов.*

*Бытует мнение, что свеча и система зажигания достигли определенного совершенства, что от них мало что зависит, лишь бы были исправны. А главное - "железо" и объем двигателя. Так ли это?*

Оценим, какая часть электрической энергии высоковольтного импульса выделяется в искре свечи. Как известно, основная доля энергии искры в современных двигателях выделяется на этапе индуктивной фазы разряда. Источником высоковольтной электрической энергии является катушка зажигания. Количество накапливаемой энергии пропорционально величине индуктивности катушки, поэтому последняя получается весьма тяжелой и материалоемкой. Суммарное сопротивление высоковольтной цепи системы зажигания составляет около 20 кОм. Оценим сопротивление искрового зазора. Учитывая, что напряжение между электродами после пробоя падает до 300 В, а ток разряда в среднем равен 300 мА, то сопротивление искрового зазора примерно равно 1 кОм. Отсюда следует, что электрический к.п.д. искры составляет около 5 %.

Рассмотрим тепловой к.п.д. Ток разряда в искре превращается в джоулево тепло, которое и осуществляет поджигание воздушно-топливной смеси. Расчет возникающих потерь далеко не прост, поэтому согласимся с мнением других авторов, которые оценили потери тепла на разогрев электродов величиной около 70 %.

Но электроды - не единственные паразиты, пожирающие драгоценное тепло искры. Сам вихрь, бушующий в камере сгорания, уносит тепло. Скорость вихря максимальна именно у стенок камеры сгорания, где расположен искровой зазор свечи. С учетом этого к.п.д. искры осторожно оценим величиной порядка 15 %.

Приходится только удивляться, как двигатель с такими потерями еще работает. Но самое удивительное впереди. Из-за асимметрии горения возникают механические потери. Свеча является пассивным точечным источником тепла. Конфигурация фронта пламени при развитии горения воздушно-топливной смеси определяется вихревыми потоками. На первом этапе пламя от искры распространяется в виде постоянно расширяющейся трехмерной спиральной поверхности вдоль стенки в один из углов камеры, а оттуда в центр. Центром камеры сгорания является центр дна поршня в положении верхней мертвой точки (ВМТ). На втором этапе фронт пламени начинает распространяться практически равномерно во все стороны. Возникшая на первом этапе "спираль" продолжает поддерживаться от искры, поэтому горение завершается в другом углу камеры сгорания, противоположном "спирали".

Горение происходит в замкнутом, практически неизменном по объему пространстве. Поэтому по мере сгорания топлива давление в камере увеличивается, а это дает прогрессивный рост скорости распространения пламени. Из-за быстротечности процессов в камере фактически нарушается закон Паскаля, поскольку в области завершения горения кратковременно давление будет заметно превосходить давление в других областях камеры сгорания. Другими словами, высокое давление генерируется со скоростью большей, чем скорость выравнивания давления в замкнутом объеме.

Напомню читателям об эффекте, открытом австрийским физиком Махом: "При завершении горения воздушно-топливной смеси в замкнутой камере температура сгоревших газов в зоне источника зажигания наибольшая и уменьшается к границам зоны горения". Опираясь на выполненные автором исследования, можно сформулировать положение, дуальное эффекту Маха: "В момент завершения в замкнутой камере горения воздушно-топливной смеси со скоростью, близкой к скорости звука, давление сгоревших газов в зоне завершения горения наибольшее и уменьшается по мере удаления от нее". Чем выше скорость завершения горения, тем больше указанная разница в давлениях.

К чему это приводит? Посмотрите внимательно на поршень, находящийся в области ВМТ. По сути, это балансирующая система с точкой опоры практически в центре поршня. По мере увеличения реакции нагрузки данная балансирующая система приближается к стационарной. Между тем, балансирующие системы обладают очень важным свойством: малая асимметрия может привести к большим последствиям.

Аналогично, когда через  $15^\circ$  поворота коленвала, после прохода ВМТ завершается горение воздушно-топливной смеси, поршень, наряду с равномерным давлением на все дно, получает импульс по одному краю. Ему "ничего не остается", как повернуться относительно точки опоры, что приведет к кратковременному заклиниванию поршня в цилиндре. Двигатель перед тем, как заглохнуть, может "козлить". Это объясняется тем, что поршни по очереди "проскакивают" через заклиненное состояние. У холодного двигателя заклинивающий эффект максимален.

В мировой практике с этим явлением начали бороться не сразу. Когда в авиации из соображений надежности стали применять две симметричные

свечи на цилиндр, то это повысило мощность двигателя на 5 %. Такое решение в автомобильной практике первой использовала HONDA, так как убедилась в значительном повышении крутящего момента на "низах". Далее к такому же решению прибегла Alfa-Romeo. И совсем недавно - Daimler-Chrysler. Однако внедрение дублированной системы зажигания - недешевое удовольствие и, кроме того, оно фактически означает необходимость разработки нового двигателя. А что делать с сотнями миллионов автомобилей, которые уже колесят по всему свету?

Кроме того, применение двух свеч на цилиндр не устраняет другой недостаток. Длина пути распространения фронта пламени в реальных камерах сгорания составляет не менее трех радиусов поршня. Большая протяженность пути фронта пламени приводила к тому, что при высокой частоте вращения вала приходилось поджигать воздушно-топливную смесь задолго до ВМТ (увеличивать угол опережения зажигания), а фаза сжатия заканчивалась уже после зажигания воздушно-топливной смеси. Если рассматривать индикаторную диаграмму, то при этом тепловая энергия нарастает в фазе сжатия и, естественно, уменьшается в фазе расширения. Таким образом, с ростом частоты вращения вала крутящий момент падает "с удвоенной скоростью". Затем наступает момент, когда двигатель "визжит, но тянуть уже не может", так как способен обслуживать только сам себя. И все это, в основном, из-за долгого горения или неверного способа зажигания.

В итоге мы можем сделать вывод, что системы зажигания современных двигателей грешат принципиальными недостатками.

Все недостатки, рассмотренные выше, устраняются, если горение воздушно-топливной смеси начать в центре камеры сгорания.

И сделать это разумнее всего с помощью факельного зажигания по аналогии с лучшими форкамерными двигателями. Первый форкамерный двигатель был предложен Рикардо в 1918 г., а последний был снят с производства в начале 80-х. И это удивительно, так как форкамерные двигатели были лучше обычных по всем показателям, кроме одного - они были сложнее, особенно в отношении системы питания и газораспределения. Вероятно, последнее и перевесило в извечном компромиссе: цена - качество.

Главное достоинство факельного зажигания - активность. Факел способен преодолеть заметные расстояния как поперек, так и навстречу вихрю.

В 1994 г. автором и его коллегами были начаты исследования по созданию системы зажигания и свечи с факельным эффектом.

Мы остановились на принципиально новом решении. У нашей свечи центральный искровой зазор окружен симметричной усеченной конусной поверхностью, выполненной в виде насадки, которая закреплена на резьбовом торце корпуса и содержит канал для бокового электрода. Насадка изготовлена из тонкостенного особо жаростойкого сплава, обладающего антикалийными свойствами.

В чем неочевидность решения? Конструкция свечи полукрытая, но при

этом свеча обладает факельным эффектом. Академик А.Е. Акимов назвал нашу свечу "торсионным генератором". Но главное все же не в том, как назвать, а в том, какими качествами обладает новая свеча.

Важным достоинством нашей свечи является возможность организации ее производства на базе стандартных свечей лучших фирм-производителей, например, NGK. Это позволяет без больших инвестиций получить высокое качество изделия.

Именно благодаря "полуоткрытости" свечи ей не страшны проблемы вентиляции и засорения продуктами неполного сгорания.

Она работает лучше обычной свечи, лучше форкамерной свечи на всех режимах двигателя, так как формирует более мощный расходящийся факел.

В ходе одного из экспериментов проверялась приемистость двигателя со штатной и новой свечой без нагрузки. Двигатель со штатной системой зажигания набирал максимальную частоту вращения вала в течение примерно 3 с. После замены свечи на новую мотор без видимой задержки буквально "взрывается", при этом частота вращения вала "зашкаливает".

В процессе экспериментов были установлены зависимости к.п.д. новой свечи от ряда характеристик: формы камеры сгорания, положения, энергии и длительности искры, качества воздушно-топливной смеси.

Наиболее выгодной оказалась установка разработанной свечи на двигатель устаревшей конструкции с двумя клапанами на цилиндр; при этом свеча располагалась сбоку, ее ось проходила через центр камеры сгорания.

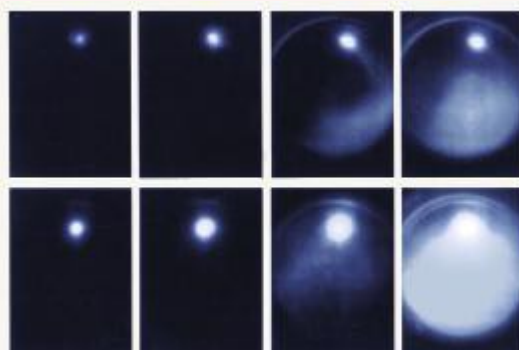
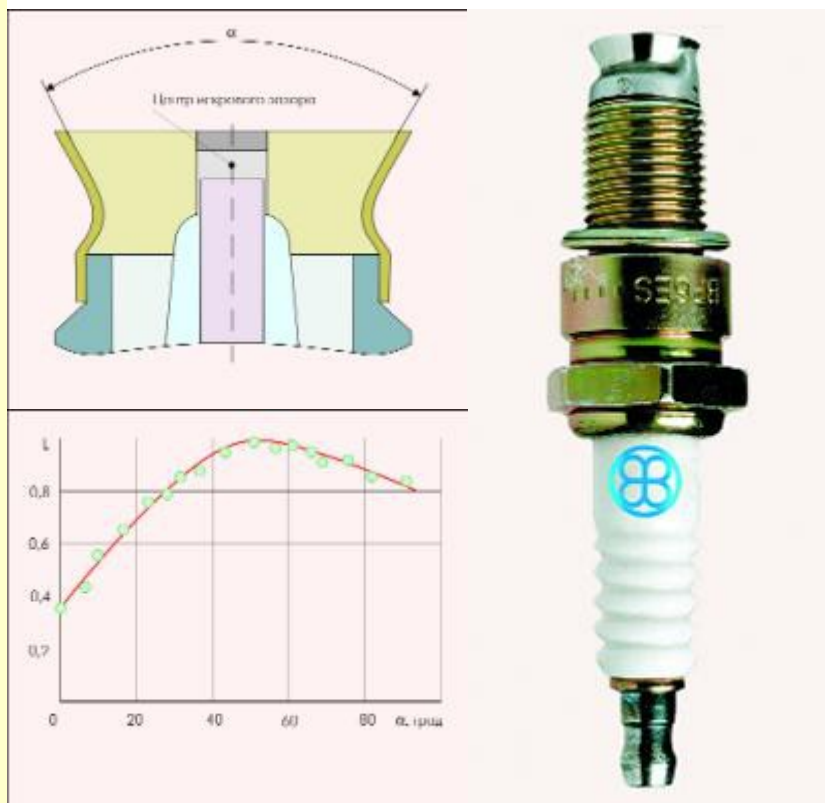
В современных двигателях (четыре клапана на цилиндр, свеча вертикальная) наблюдается обратная картина. Воздушно-топливная смесь, выжатая поршнем в ВМТ, мешает факелу достичь центра камеры сгорания. Замена свеч дает эффект только для двигателей с малым объемом, работающих при большой частоте вращения вала (3000 об/мин и выше). Для кардинального решения данной проблемы, требуется повышать энергию высоковольтного импульса до 150 мДж.

Наши исследования позволяют констатировать, что факельное зажигание улучшает одновременно все параметры двигателя и автомобиля: скорость, приемистость, экономичность, экологичность. Особенно важным достижением представляется снижение уровня выбросов окислов азота. Резко уменьшилась тепловая нагруженность двигателя, появилась возможность осуществлять разгон с переходом от 1-й на 5-ю передачу. Машина "не замечает" подъемов, т.е. не снижает скорости на подъеме. Расход топлива сокращается и перестает зависеть от скорости, поэтому при поездках со скоростью 120 км/ч экономия нередко достигает 30 %.

Замечено, для автомобилей с большей массой и двигателей с увеличенным диаметром поршней выигрыш увеличивается.

Многое еще предстоит исследовать, эволюция новой свечи только начинается. Надеюсь, что новинка заинтересует и автопром, и настоящих

автомобилей (более подробная информация находится на сайте в Интернет <http://fire.ziby.net>). В заключение автор выражает особую благодарность и признательность российскому изобретателю Г.Н. Березовскому, который первый предложил использовать свечу с конической поверхностью.



Динамика развития области горения :  
верхний ряд - при штатной системе зажигания  
нижний ряд - со свечой, обеспечивающей факельное зажигание

### NEW ABILITIES OF A SPARK PLUG

A new spark plug was developed. Its central spark gap is surrounded by symmetric truncated cone produced from special superalloy. The spark plug design is semi-opened and it provides a "torch" effect. An important advantage is an opportunity to arrange its manufacturing on the basis of standard spark plugs. Experiments made possible to find out some relationships between its efficiency and the combustion chamber configuration, sparking time, etc. The replacement of spark plugs would be especially useful for small engines. The principle improvement of their operation calls for an increase in pulse energy up to 150 MJ. Pilot-flame ignition simultaneously improves all parameters of the engine and the motor-car: speed, acceleration capability, efficiency, ecological

compatibility by decreasing NOx emission. Fuel consumption is decreased and overall saving can reach 30 %.

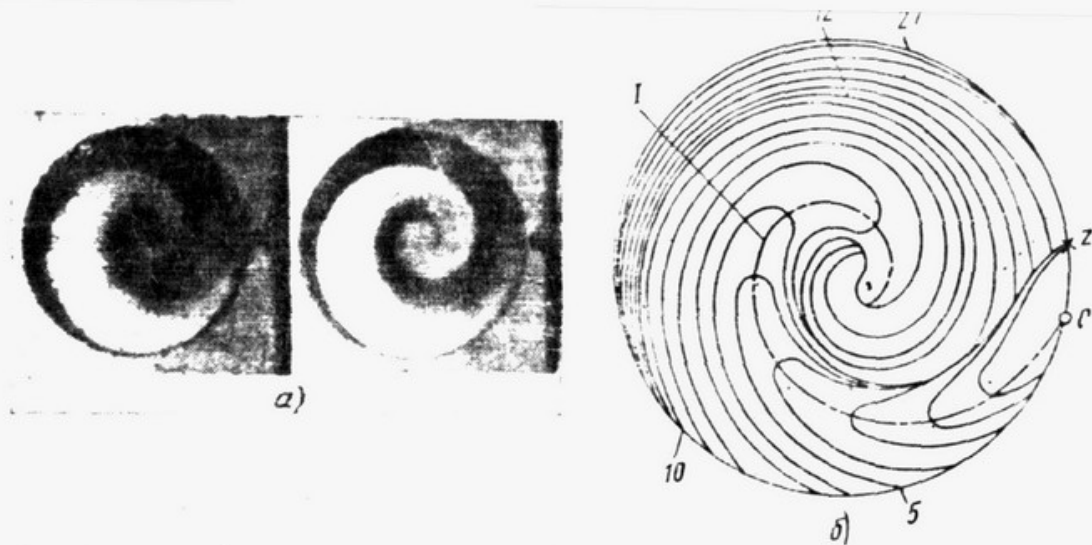


Рис. 131. ... распространение пламени в плоской цилиндрической камере сгорания при окружной скорости вихря 75 м/с:  
*a* — примеры кинорегистраций; *b* — мгновенные положения фронта пламени через интервалы времени  $10^{-4}$  с; *I* — примерный путь пламени от точки зажигания; *z* — точка зажигания [101]