

Горизонты и призраки

О тенденциях развития двигателей малых судов без откровений

С. М.

Речь здесь пойдет только о поршневых двигателях внутреннего сгорания, поскольку все остальные типы силовых установок (СУ)

для малых судов трудно рассматривать в качестве практически полезных, и тем более – все-речь обсуждать их популярность. Тут нужно заметить, что в обозримой перспективе нет предпосылок для появления неких революционных типов СУ, никаких чудесных радикальных изменений, в общем – никаких сенсаций: будет идти скучная для обывателя оптимизация, сложные и дорогие технические решения будут все так же постепенно распространяться на более простые и массовые модели двигателей, параметры – улучшаться на считанные проценты... Такова реальность. Улучшать доведенные до высокой степени совершенства современные двигатели сложно и, что хуже всего, дорого. Ужесточение норм токсичности выбросов и без того уже привело к значительному удорожанию судовых СУ.

Двигатели с искровым зажиганием

Бензиновые двигатели находятся в двусмысленной ситуации: с одной стороны, снизить токсичность выбросов и расход топлива на режимах, близких к максимальной мощности, очень трудно, с другой – на режимах частичных нагрузок резервы для улучшения достаточно заметны. Потому развитие будет идти именно в этом направлении – интересном для автомобилей, но представляющим ограниченный интерес для водномоторников.

Режимы работы двигателя на малых судах, тем более

прогулочных, где в основном и устанавливаются бензиновые силовые установки, подразумевают работу далеко

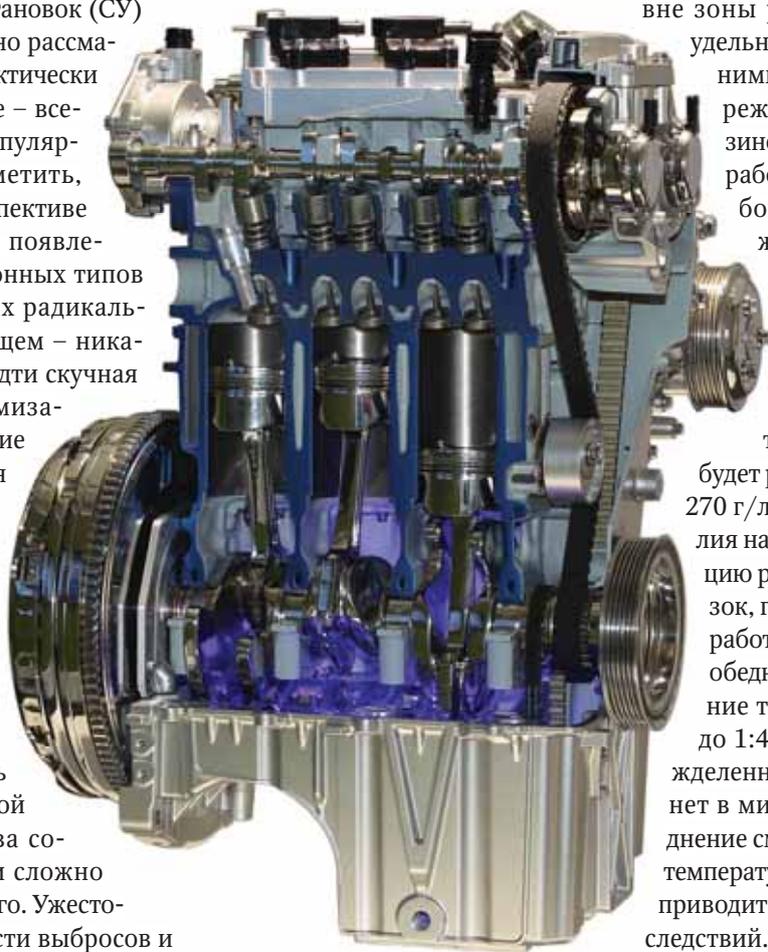
вне зоны режимов минимальных удельных расходов топлива, ценных автомобилистами. На

режиме «полного газа» бензиновый двигатель вынужден работать на несколько переобогащенной смеси для снижения тепловой нагрузки, потому расход топлива на таких режимах работы является, по сути, константой: на максимальной мощности четырехтактный двигатель

будет расходовать порядка 260–270 г/л.с.ч. Следовательно, усилия направляются на оптимизацию режимов частичных нагрузок, где становится возможной работа на обедненных и сильно обедненных смесях (соотношение топлива к воздуху от 1:20 до 1:40 по массе), что дает

возможное снижение расхода. Но нет в мире совершенства! – обеднение смеси влечет за собой рост температуры сгорания топлива, что приводит к ряду далеко идущих последствий. Снижение надежности и ресурса некоторых современных бензиновых двигателей отмечено многими, рост рабочих температур таких двигателей в эксплуатационных режимах – тоже. Зато так достигаются минимальные удельные расходы бензина на уровне порядка 180 г/л.с.ч!

На совершенно серийных двигателях, кстати, хотя и дорогих. Этот результат достигнут целым комплексом мер: высокая степень сжатия, непосредственный впрыск топлива, изменяемые фазы газораспределения и высоты подъема клапанов, бездрессельное управление двигателем за счет управления открытием клапанов, настроенные системы впуска и выпуска с изменяемой частотой настройки, система зажигания с высокой энергией, турбонаддув умеренного давления



Реальность сегодняшнего дня: массовый 3-цилиндровый бензиновый двигатель объемом 1 л с турбонаддувом высокого давления, непосредственным впрыском топлива, изменяемыми фазами газораспределения и увеличенным отношением ход поршня / диаметр цилиндра. Ford EcoBoost

с высокой энергией, турбонаддув умеренного давления

(0.5–0.7 бар) с промежуточным охлаждением. Снижено потребление энергии навесным оборудованием – генератор включается только при торможениях, насосы системы смазки изменяют производительность, разделены потоки в системе охлаждения для головки и блока цилиндров – для снижения потерь тепла и приближения режима работы двигателя к адиабатическому (без отвода тепла в идеале), повышенная температура теплоносителя... Все это очень красиво, но когда температура га-

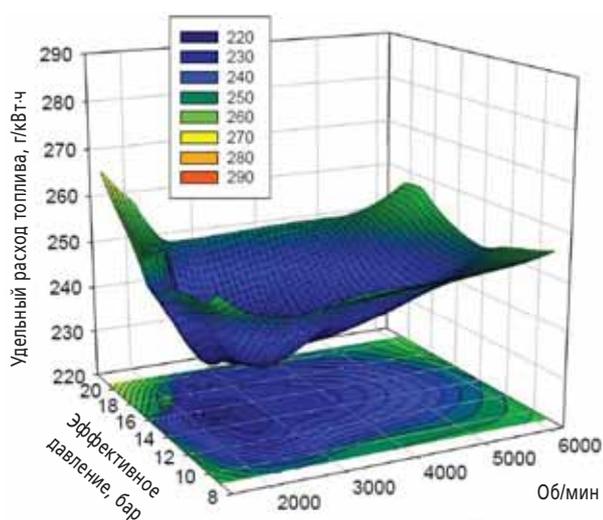


Диаграмма удельного расхода топлива двигателя Volkswagen TSI объемом 1.4 л. Видна «автомобильная» оптимизация под средние нагрузки и частоты 2500–3000 об/мин

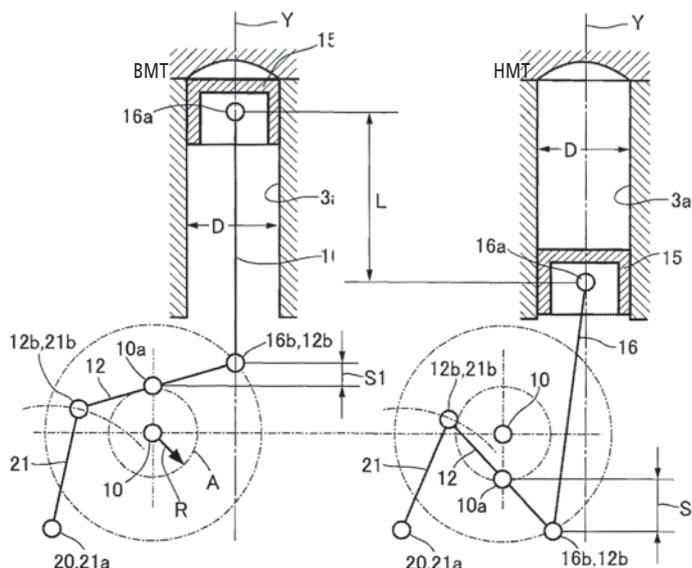
зов на входе в турбокомпрессор достигает 1050–1100°C, все это благолепие приходится переводить на привычные режимы с работой на нормальной смеси, и расход топлива возвращается к прежним значениям.

В принципе, все вышесказанное продолжит распространение на бензиновых двигателях – иного пути пока нет. Несколько в стороне от торной дороги останутся только самые недорогие и простые двигатели – например, ПЛМ малой мощности, «портативные», где большая часть решений просто не востребована. Остальные бензиновые двигатели будут развиваться в следующих направлениях:

- массовое применение непосредственного впрыска топлива, в том числе в комбинации с впрыском в зону впускных клапанов («комбинированный впрыск»);
- увеличение фактической степени сжатия и распространение рабочих циклов с так называемой «увеличенной степенью расширения» (для упрощения принято, что степени сжатия и расширения равны, на самом деле это не так; эффективность ДВС зависит именно от степени расширения). Следовательно, раз уж степень сжатия ограничена по условиям возникновения детонации – а современные двигатели работают буквально на границе детонационных явлений – были предприняты попытки увеличить степень расширения при сохранении приемлемой степени сжатия. Здесь можно выделить два пути: первый – это специальные циклы, названные по именам

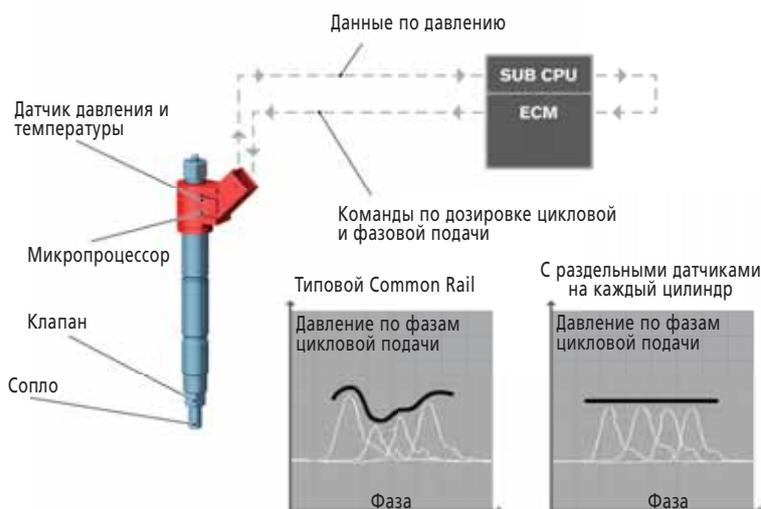
их разработчиков. Применяются цикл Аткинсона (это двигатели Toyota и Mazda) и цикл Миллера (VW-Audi и вроде бы Nissan для внутреннего рынка), где путем частичного вытеснения рабочей смеси во впускную систему, или напротив, за счет затянутого начала впуска, достигается увеличение степени расширения при неизменной степени сжатия. Второй путь – «механический», когда за счет введения в кривошипно-шатунный механизм дополнительных звеньев изменяется соотношение рабочего хода и хода сжатия. По этому перспективному пути идут многие, например Honda, и он может получить массовое распространение;

- увеличение глубины форсировки двигателей – в этом году появились серийные двигатели с удельной мощностью до 185 л.с./л и удельным моментом порядка 200 Нм/л при среднем эффективном давлении 25 бар, которое реально довести до 30–32 бар, хотя это потребует применения более дорогих комплектующих и мощных систем управления;
- применение турбонаддува для более полной утилизации энергии отработавших газов, отказ от нагнетателей с приводом от коленвала;
- более широкое применение варьируемых фаз газораспределения, геометрии впуска/выпуска, сложных моделей управления впрыском и зажиганием;



Один из вариантов кинематической схемы кривошипно-шатунного механизма для увеличения степени расширения без роста степени сжатия, патент Honda

- рост вычислительных мощностей массовых систем управления, как того требует предыдущий пункт;
- тенденция к сокращению рабочего объема двигателей проявит умеренность, возможно, и вовсе сойдет на нет;
- в более отдаленной перспективе вероятно снижение быстроходности бензиновых двигателей и осторожный переход к агрегатам с увеличенным объемом и более высоким соотношением ход поршня/диаметр цилиндра, но более тихоходным – 3000–4000 об/мин вместо привычных



Блок-схема накопительной системы впрыска (разработка Denso, используется в новых 4-цилиндровых дизелях Volvo Cars под названием i-Art) с отдельными для каждого цилиндра датчиками, что позволяет заметно точнее дозировать цикловые и фазовые дозы топлива и избежать падения давления впрыска промежуточных фаз

сегодня 6000–7000 об/мин. Такой двигатель с турбонаддувом высокого давления и системой рекуперации энергии, возможно, частичной утилизацией тепловой энергии в электрическую, может стать образцом для будущего;

- сокращение числа цилиндров. Эта тенденция связана в первую очередь с унификацией «оптимизированных» двигателей (сейчас принято считать, что оптимальный объем одного цилиндра составляет 0.45–0.55 л) по конструкции основных узлов, широкое распространение получают уравнивающие системы: балансирные валы, «квазипоршни», противовесы, системы с гидравлическими и «активными» опорами силового агрегата;

- двигатели продолжают снижать массу, например, достигнутые в 2014 г. 120 кг для двухлитрового 4-цилиндрового двигателя (без учета системы выпуска и маховика), станут вскоре типовым значением;

- продолжают развитие новые технологии износостойких покрытий зеркала цилиндров, например Nanoslide от Mercedes-AMG – покрытие цилиндров алюминиевого блока составом на основе железа в плазменной среде, дающее редкое сочетание высокой износостойкости с хорошим удержанием смазки;

- продолжится практика широкой унификации – на базе общих деталей блока/картера и т. п. будут создаваться и бензиновые, и дизельные двигатели, поэтому часть тенденций можно считать общими для обоих типов.

Производители ПЛМ, похоже, забросили развитие двухтактных двигателей, и если ситуация с дешевыми карбюраторными двухтактниками в целом понятна – эту продукцию для бедных регионов будут выпускать до полного износа оборудования – то перспективы двух тактов с непосредственным впрыском просто туманны: их совершенствование возможно, но о работах в этой области почти не слышно.

Дизельные двигатели

Здесь основная тенденция – дальнейший рост удельных показателей, осложненный ужесточением норм по токсичности выпуска. Достигнутые показатели по «чистоте» дизелей привели к однообразию решений в области организации рабочего процесса: текущие нормы, известные как «Евро-6», сильно сузили диапазон возможных решений – с ростом температуры реакции топлива растет количество оксидов азота, NO_x , снижение температуры приводит к росту содержания твердых веществ («сажи»). Пространства для маневра не осталось, и ряд специалистов высказывается в духе «разумный предел достигнут». Дальнейшее снижение расхода топлива, шумности и т.п. улучшения все еще возможны, но только в рамках достигнутых показателей по токсичности. В нашей «водной» области сейчас происходит переход на новые и более жесткие нормы, известные как Tier 4, «по-европейски» – Stage IV, потому продолжится процесс смены поколений дизелей, старые моторы разработки 90-х будут вытесняться.

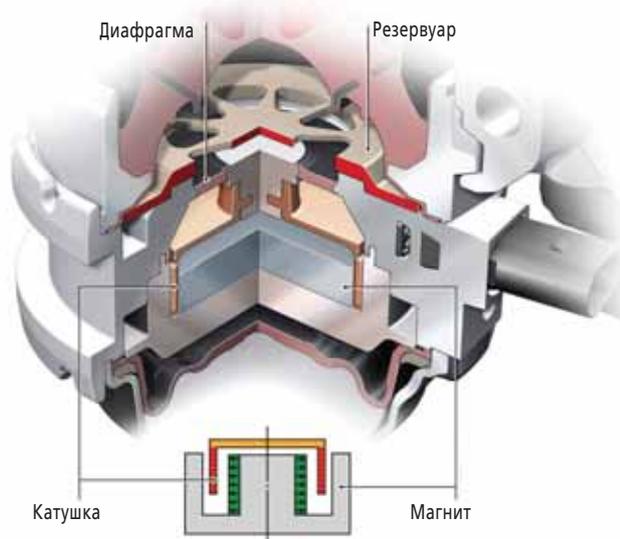
Продолжится рост удельных показателей, мощность будет возрастать умеренно – ее уже более чем достаточно, но крутящий момент увеличится, расширится диапазон оборотов, в котором момент близок к максималь-



Турбокомпрессоры с двухпоточной турбинной частью обладают более широким диапазоном эффективной работы по сравнению с однопоточными

ному. Расход топлива будет медленно снижаться, причем скорее эксплуатационный, удельный же расход снижаться если будет, то незначительно.

Среднее эффективное давление в цилиндре имеет потенциал роста на 15–20% для наиболее форсированных версий – с 30 бар до 35–37 бар; на массовых версиях типовые значения останутся на уровне 20–25 бар, промежуточные значения чаще будут достигать 30 бар; иными словами, с одного литра рабочего объема будет получен момент не 235–240, а 275–295 Нм. Характерно, что «легкий» трехлитровый высокофорсированный дизель и «тяжелый» 13-литровый могут иметь очень близкую степень



Активные опоры двигателя гасят вибрации, совершая компенсирующие движения, подобно диффузору громкоговорителя

форсировки – различия в литровой мощности зависят только от оборотов максимальной мощности, среднее эффективное давление одинаково. Для примера выберем BMW N57S и Volvo Penta D13-900, которые характеризуются значениями среднего эффективного давления порядка 30 бар. Недалеко от них и 2.1-литровый Daimler OM651 в наиболее форсированной версии. Дизели с такой форсировкой становятся популярными.

Расход топлива для дизелей в классе 1–6 л стабилизировался сегодня на отметке 160–170 г/л.с.ч на режимах максимальной мощности, которые для судового использования имеют большее значение, чем режимы минимальных удельных расходов. В классе 6–20 л – расход 150–155 г/л.с.ч, «большие и настоящие» судовые дизели еще более эффективны, но используемые в них решения крайне специфичны и неприменимы к компактным двигателям с их широким рабочим диапазоном оборотов. В принципе, удельные расходы снизятся, но ожидать более 5–10% не придется – уже достигнута очень высокая степень совершенства.

Рост параметров будет получен без радикальных изменений в идеологии проектирования, скорее за счет распространения сложных технических решений (сегодня они почти все известны по экстремальным разработкам), прототипы дизелей 2020 г. уже на моторных стендах, хоть мы этого и не видим.

Основные решения, за счет которых будут «приращать» дизели:

- массовое распространение систем накопительного впрыска топлива (Common Rail) с отдельными датчиками на каждый цилиндр, установленными на форсунках, что позволяет намного точнее корректировать параметры многофазового впрыска и быстрее реагировать на изменение нагрузки на двигатель; сегодня такие системы управления применяются Volvo Cars и Toyota – это, пожалуй, один из главных резервов улучшения показателей;
- турбокомпрессоры с двухпоточной турбинной ча-

стью, с изменяемой геометрией, системы, состоящие из нескольких турбокомпрессоров разного диаметра, системы комбинированного наддува из турбокомпрессора и центробежного нагнетателя с приводом от мощного электродвигателя, широкое распространение быстродействующих электрических приводов перепускных клапанов перед турбинной частью, жидкостное охлаждение подшипников компрессоров – то есть решения известные, но пока не массовые;

- более смелое применение турбокомпаунда, то есть установка после турбокомпрессора дополнительной турбины с отбором мощности на коленвал, что приносит свои 1–2% снижения расхода за счет более полной утилизации энергии отработанных газов;

- в некоторых вариантах дизелей имеет ограниченные перспективы утилизация остаточной теплоты отработанных газов через преобразование в электроэнергию, это как альтернатива турбокомпаунду, преимущества такого решения – снижение вибраций и шумности комплекса;

- дальнейшее увеличение жесткости силовых схем для безопасной с точки зрения ресурса реализации высоких значений давления в цилиндрах;

- использование для ненагруженных и слабо нагруженных деталей пластиков и сложных композитов для выигрыша в массе;

- расширение практики перехода на стальные поршни во всех типоразмерах дизельных двигателей – для роста стойкости к нагрузкам и температурам с одновременными мерами по снижению массы;

- рост популярности поршневых колец уменьшенной толщины, что в сочетании со стальными поршнями даст дополнительный эффект (упрочнение зоны поршневых канавок, например, и уменьшение высоты поршня);

- вероятен новый виток роста вычислительных мощностей и усложнение программного обеспечения в системах управления двигателем, в чем наметилось некоторое снижение темпа.

Изложенные подходы к развитию дизельных двигателей постепенно распространяются на самые малые типоразмеры: в 2014 г. индийская Hero Moto Corp. показала мотороллер с дизельным двигателем объемом 150 см³. Заявленные 13 л.с. при 4000 об/мин и 35 Нм выглядят очень привлекательно. Такого рода малые дизели могут работать даже на маломощных ПЛМ, а в качестве стационарных установок выглядят интереснее, чем маломощные и тяжелые старомодные дизели на основе промышленных двигателей и двигателей широкого назначения. Это тоже важная тенденция 



Система уменьшения вибраций рядного 2-цилиндрового 4-тактного двигателя с равномерным чередованием вспышек в цилиндрах, используется на мотоциклетном агрегате BMW F800. Системы такого типа могут использоваться на одно- и двухцилиндровых массовых ПЛМ, в данном случае полностью уравновешиваются силы инерции первого порядка, силы инерции второго порядка – свободны