

УДК 621.43

DOI:10.46960/62045_2021_2_37

С.А. Тихомиров, А.Н. Тихомиров
**АНАЛИЗ СОВРЕМЕННЫХ ТЕХНОЛОГИЙ СОКРАЩЕНИЯ
РАСХОДА ТОПЛИВА БЕНЗИНОВЫМИ ДВИГАТЕЛЯМИ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрены современные технологии сокращения расхода топлива бензиновыми двигателями путем уменьшения рабочего объема и введения турбонаддува. Дана теоретическая оценка потенциальных преимуществ такого подхода, указаны возможные причины достижения незначимого или отрицательного эффекта. Приведен метод упрощенного экспериментального способа замера расхода топлива в движении посредством использования диагностической информации с блока управления ДВС.

Ключевые слова: дизельный двигатель, бензиновый двигатель, *downsizing*, нагрузочная характеристика, удельный расход топлива, дросселирование, *LOAD*.

В 2020 г. доля зарегистрированных в Европейском Союзе легковых батарейных электромобилей (*BEV*) достигла 5,3 %. Продолжается рост продаж подзаряжаемых гибридных электромобилей (*PHEV*), достигших к этому времени доли в 5,2 % [1]. Курс, возможно, и правильный. Электрические автомобили в период ускоренного поиска виновного в изменении климата практически не имеют альтернативы. Возможно, они даже будут дешевле для клиентов, поскольку уже к 2025 г. производственные затраты могут стать ниже, чем у двигателей внутреннего сгорания. Стать мировым лидером на рынке электрической мобильности не позднее 2025 г. стремится группа «Фольксваген». Можно предположить, что такой шаг крупнейшего Европейского производителя автомобилей вынудил сделать, в том числе, и известный скандал 2015 г. Тогда вскрылось, что количество реально выбрасываемых оксидов азота (NO_x) было существенно выше, чем во время тестов. VW добавил в блоки управления своих автомобилей специальное программное обеспечение, маскирующее реальные цифры. Во Франции, с аналогичными подозрениями, недавно должны были отчитаться *Renault*, *Opel* и *Daimler*, в Германии подобные обвинения были предъявлены *Fiat*.

Общий элемент всех критикуемых моделей – дизельный двигатель. Наметилась явная европейская тенденция по сокращению доли дизельных автомобилей, замещаемых бензиновыми. Поско

разработке «альтернативных» конструкций с бензиновыми двигателями инженеры должны принять все меры к сокращению расхода бензина в эксплуатации. Понимание этих задач приво

объема с турбонаддувом. Характерная их черта – непосредственный впрыск бензина в камеру сгорания, в отличие от привычного распределенного впрыска во впускную трубу. Это требует новых конструкций бензиновых форсунок, топливных насосов высокого давления с механическим приво

. долю маленьких «стехиометрических» двигателей с турбонаддувом в области легковых и легких коммерческих автомобилей ожидают до 94 %.

Причины успеха и провала технологии *downsizing* можно проанализировать по фундаментальным принципам двигателестроения. Так, работа бензинового двигателя до сегодняшнего дня опиралась на создание однородной, близкой к стехиометрии смеси паров бензина и воздуха к моменту воспламенения их электрической искрой. На пути достижения экономичности, сравнимой с дизелем, можно выделить два главных препятствия.

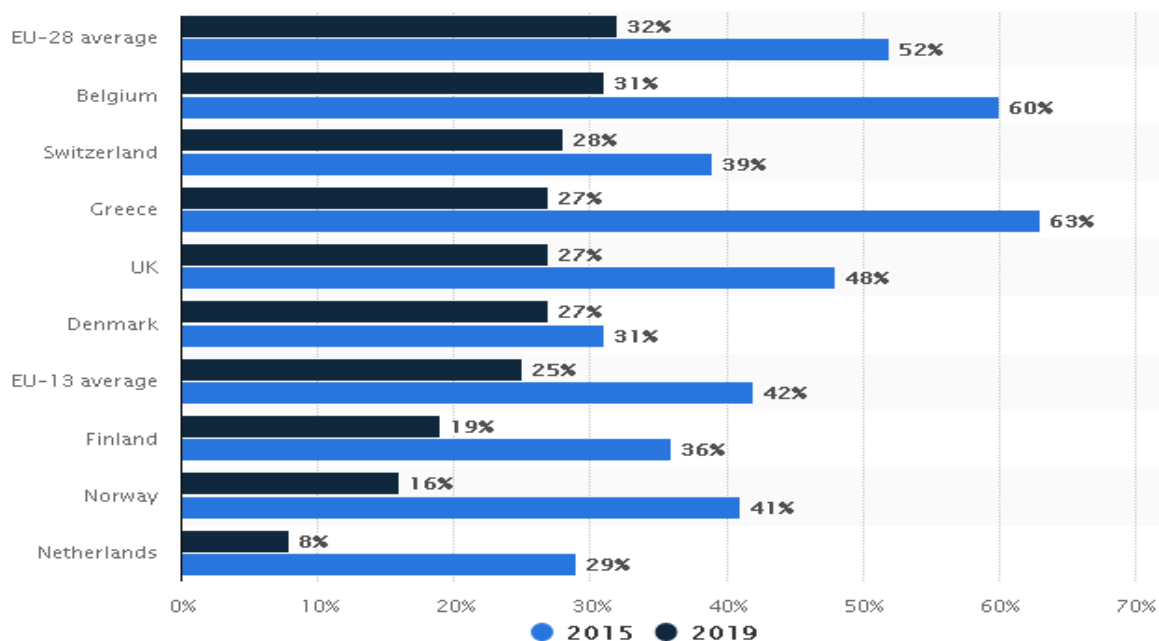


Рис. 1. Снижение доли дизельных легковых автомобилей, продаваемых в Европе [2]

По мере снижения нагрузки (расхода топлива) приходится дросселировать поток воздуха, что приводит к существенным насосным потерям (затратам энергии на перемещение свежего заряда), которых почти нет у дизелей. Чем меньше нагрузка двигателя, тем больше насосные потери и тем ниже падает КПД. Чем меньше литраж двигателя, тем чаще он работает на высоких нагрузках, тем меньше в целом потери и выше КПД.

Преимущество технологии *downsizing* отчетливо видно на нагрузочных характеристиках. Две такие характеристики представлены на рис. 2 [3]. Базовый атмосферный двигатель рабочим объемом 3,0 л обеспечивает максимальный крутящий момент 250 Н·м. Кривая удельного эффективного расхода топлива g_e монотонно поднимается по мере уменьшения нагрузки. Типичная для данного автомобиля зона эксплуатации (отмечена стрелкой) [8] соответствует увеличению g_e от минимума примерно в 240 г/кВт·ч до 300...320 г/кВт·ч, т.е. около 25 %.

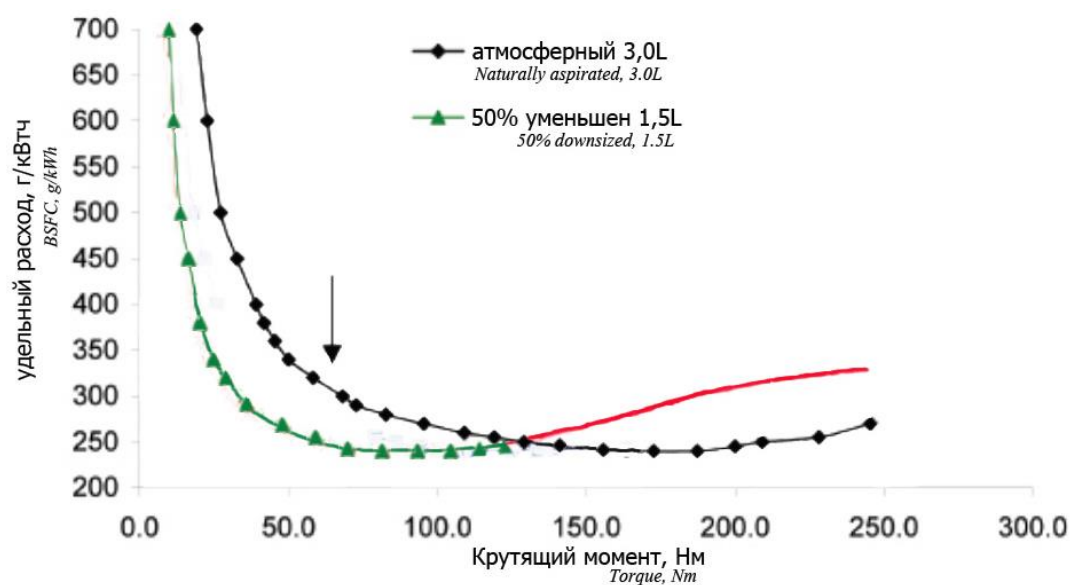


Рис. 2. Нагрузочная характеристика атмосферного полноразмерного бензинового двигателя по сравнению с уменьшенной версией

Снижение рабочего объема дает возможность двигателю работать с большими открытиями дросселя, соответственно снижая насосные потери. Второй двигатель, с уменьшенным вдвое рабочим объемом 1,5 л, на том же режиме будет иметь удельный расход на уровне 240...250 г/кВт·ч, отыгрывая назад те же 25 %. Дополнительно можно подчеркнуть, что линии g_e не просто масштабируются по горизонтальной оси. Можно заметить также снижение минимального уровня до 235 г/кВт·ч, что, несомненно, идет в плюс данной технологии. Причина – в сопутствующих технических решениях. Конструкторами предпринимаются шаги по снижению сил трения, неосуществимые в двигателях крупных. Уменьшение размеров, например, снижает массы и инерционные нагрузки, позволяет увеличить длину шатуна, сокращая требуемые площади трущихся поверхностей. Свой вклад дает и непосредственный впрыск. По сравнению с впрыском в трубу, он позволяет снизить расход топлива до 1,5 %, поскольку охлаждает свежий заряд за счет испарения топлива [3]. Холодный заряд менее подвержен детонации, в двигателе можно несколько повысить степень сжатия, что позволит добиться большей термодинамической эффективности.

Недостаток крутящего момента уменьшенного двигателя компенсируется введением наддува. В области полных нагрузок газотурбинный наддув повышает давление воздуха на входе в ДВС, увеличивает его плотность. В результате меньшие по объему цилиндры заполняются большими массами горючей смеси, вырабатывая количество энергии, сопоставимое с полноразмерными моделями. Это позволяет не гнаться за сверхвысокими частотами вращения, но многократно повышает нагрузку каждого рабочего цикла. При сегодняшнем уровне p_e типичного атмосферного двигателя в 10...12 бар появляются конструкции бензиновых двигателей с турбонаддувом обеспечивающие p_e 18, затем 24 и 27 бар. Сопутствующая этому высокая плотность и температура рабочего тела в цилиндре провоцируют разрушительную детонацию. Детонация всегда выступала в искровых двигателях ограничителем на пути повышения эффективности, препятствием, не дающим поднимать степень сжатия. Это – слабое звено всех моторов с технологией *downsizing*. Непосредственный впрыск со своим охлаждением заряда лишь в малой степени решает эту проблему. В результате на режимах полных нагрузок во избежание детонации приходится значительно переобогащать смесь и существенно сдвигать момент зажигания. Другого способа нет.

И тот, и другой шаг поднимают g_e . Точные количественные данные производители скрывают, поэтому на рис. 2 линия удельного расхода топлива для уменьшенного двигателя в зоне полных нагрузок (красная) проведена предположительно, основываясь на результатах экспериментальных замеров разных искровых двигателей, проведенных в лаборатории ДВС НГТУ в разные годы, а также других неподвижных аналитиков [4]. Итогом суммарного анализа кривых на рис. 2 становятся утверждения, все чаще звучащие в мире автомобилистов. Технология *downsizing* дает значительный выигрыш по топливной экономичности при работе двигателя в зоне малых нагрузок. По расчетам снижение расхода топлива ожидается в целом на 15...20 % [5]. Именно такие результаты показывают многочисленные представители семейства уменьшенных двигателей при тестовых испытаниях. Но преимущества небольших двигателей редко переносятся в реальный мир, особенно при использовании европейского испытательного цикла *NEDC*. Анализ более чем 500 автомобилей в реальном тестировании показал, что наибольшее отклонение от заявленных показателей потребления приходится на двигатели объемом менее 1,0 л. Настоящий шок вызвал тот факт, что даже 2,0...3,0-литровая линейка двигателей имела лучшую реальную экономию (5,3 л/100 км), чем автомобили с крохотными двигателями менее 1,0 л (6,1 л/100км) [6]. Слишком часто уменьшенные двигатели попадают в реальной жизни в «правую часть» нагрузочной характеристики.

Вывод хорошо иллюстрируется графиками на рис. 3. Они получены на стандартном автомобиле путем многократных замеров расхода топлива при обычном движении с разными средними скоростями (черные точки и линия) и при равномерном движении (красные точки и линия).

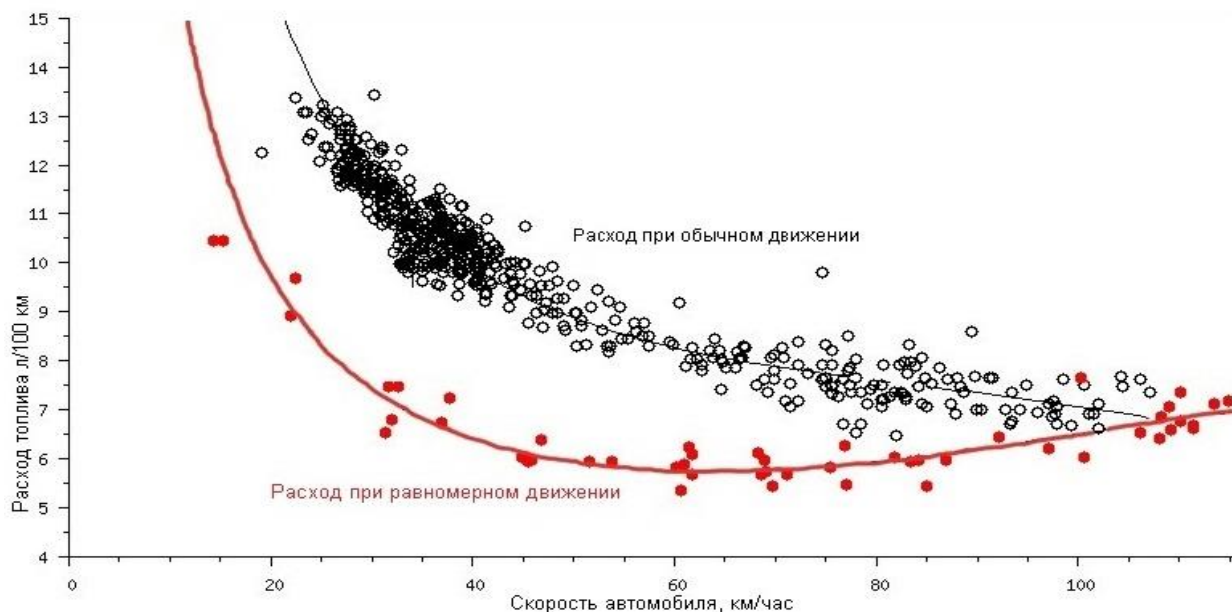


Рис. 3. Зависимость расхода топлива от скорости при разных характерах движения

Для получения таких зависимостей необходимо специальное оборудование, например, расходомер топлива [7]. Но с определенной погрешностью расход топлива можно рассчитать с помощью открытых данных, записанных с блока управления двигателем через диагностический разъем. Такой эксперимент был проведен на автомобиле *Dacia Logan* с уменьшенным бензиновым двигателем 1.3 TCE, с турбонаддувом, рабочим объемом 1,33 л, максимальной мощностью 130 л.с. Автомобиль двигался по автомагистрали без остановок со средней скоростью 42 км/ч (рис. 4). Был использован профессиональный сканер способный записывать массив данных, из которых наиболее значимыми являются частота вращения двигателя n и параметр нагрузки $LOAD$. Последний описан в стандарте SAE J/1979 для систем бортовой диагностики *OBDII*. Более удобным в нашем случае является вариация $LOAD_ABS$, абсолютное значение нагрузки ($PID\ 43$), представляющий собой отношение цикловой массы воздуха $q_{ци}$, поступившей в цилиндр за цикл [г/цикл], к максимальному количеству воздуха q_{max} [г/цикл], способному разместиться в рабочем объеме цилиндра при стандартных условиях и при 100 % коэффициенте наполнения, отображаемое в процентах.

$$LOAD_ABS = \frac{q_{ци}}{q_{max}} \cdot 100\%$$

$$q_{ци} = \frac{G_B \left[\frac{\Gamma}{\text{сек}} \right]}{n \left[\frac{\text{об}}{\text{мин}} \right] \cdot \frac{1}{60} \left[\frac{\text{мин}}{\text{сек}} \right] \cdot \frac{1}{2} \cdot i \left[\frac{\text{цил}}{\text{об}} \right]}; \quad q_{max} = \rho_B \cdot V_h = 1,184 \left[\frac{\Gamma}{\text{л}} \right] \cdot V_h \left[\frac{\text{л}}{\text{цил}} \right],$$

где:

G_B – массовый расход воздуха двигателя [г/сек];

n – частота вращения [об/мин];

$\frac{1}{2} \cdot i$ – число цилиндров, принимающих участие в работе за один оборот [цил/об] (четырёхтактный цикл совершается за два оборота);

ρ_B – плотность воздуха при стандартных условиях: 25°C, 101,3 кПа [г/л];

V_h – рабочий объем одного цилиндра [л];

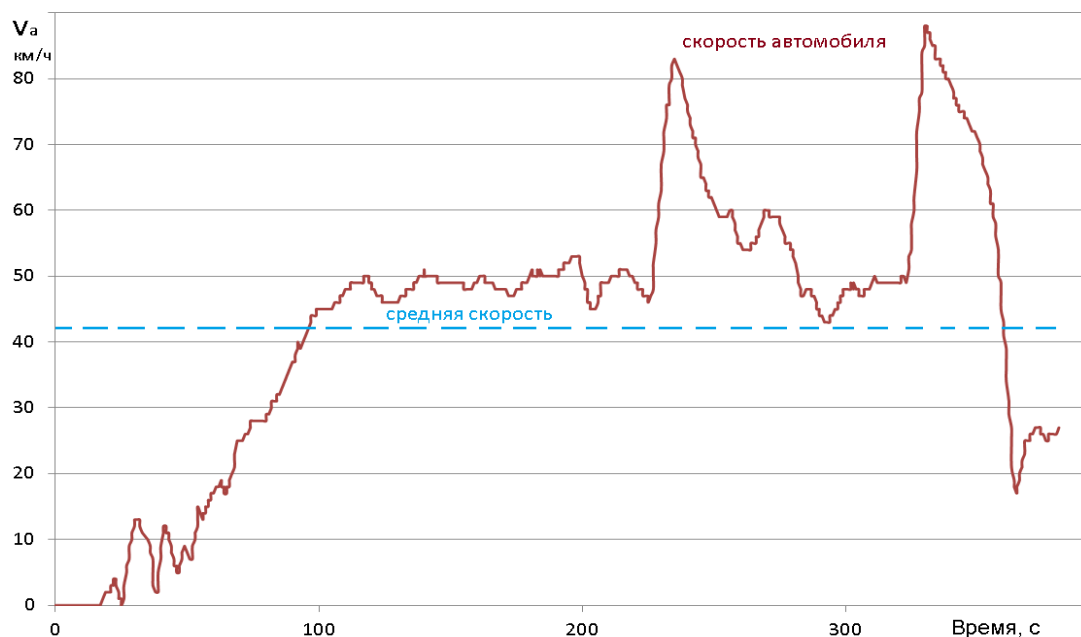


Рис. 4. График движения автомобиля в тестовом заезде

Характерные черты *LOAD_ABS* следующие:

- диапазон $0 \dots \approx 0,95$ для атмосферных двигателей, $0 \dots 4$ для двигателей с наддувом;
- пиковое (при данной частоте вращения) значение *LOAD_ABS* коррелирует с коэффициентом наполнения на полном дросселе при этой частоте.

Все двигатели с искровым зажиганием обязаны в своем протоколе *OBD II* поддерживать *PID 43*, по нему этим параметром всегда можно воспользоваться для подсчета суммарного расхода воздуха за определенное количество циклов. В нашем примере был выбран диапазон движения длительностью 380 с, за который двигатель совершил 4488 циклов, а автомобиль проехал 4522 м.

На следующем этапе – пересчете расхода топлива по расходу воздуха – принято определенное упрощение. Поскольку блок управления не передает данных по мгновенному составу смеси, принимаем его на всех режимах стехиометрическим. Это справедливо на подавляющей доле нагрузок за исключением самых полных. В нашем примере переход на полные нагрузки осуществлялся дважды, на $3 \dots 4$ с. Это позволяет пренебречь местным обогащением, и вносит определенную погрешность.

По известному стехиометрическому коэффициенту для бензина (14,7) можно вычислить суммарный расход топлива за интервал в 380 с и за 1 км пробега – 50,4 г – что соответствует 6,90 л/100 км. Для оценки погрешности в данном случае была возможность определить расход средствами, встроенными в систему диагностирования. Она показала расчетный расход топлива 6,98 л/100 км. Таким образом, простой и доступный способ определения расхода топлива дал погрешность в 1,16 % относительно объективного измерения.

Выводы неоднозначны. Во-первых, технологии *downsizing* работают, обеспечивая определенный выигрыш по расходу топлива. Но, конечно, абсолютные значения не производят впечатления супернизких. Для легкого автомобиля, двигающегося по трассе со средней скоростью 42 км/ч, можно ожидать и меньшего. Кроме того, европейские автомобили, оснащенные уменьшенными двигателями, как правило, имеют ручную механическую трансмиссию. Европейцы относятся к этому спокойно, в то время как в нашей стране с уважением относятся к автоматическим трансмиссиям. АКПП и CVT обеспечивают комфорт и легкость управления, но при этом значительно повышают расход в зоне холостого хода. По косвенным расчетам дополнительная потеря топлива на холостом ходу относительно варианта без гидротрансформатора около 7 %.

В итоге следует признать, что двигатели с технологиями *downsizing* позволяют уменьшить расход топлива относительно атмосферных искровых двигателей при условии правильного выбора режима эксплуатации. Выход за пределы оптимальной зоны в силу особенностей дорожного движения или желания водителя нивелирует или даже ликвидирует преимущества. Такие примеры наблюдаются все чаще при переходе на новые, более объективные ездовые циклы, а тенденция использования малоразмерных двигателей постепенно идет на спад.

Библиографический список

1. Vehicles & Road Traffic. Total market share of newly registered passenger electric vehicles in the European Union between 2015 and 2020 [Электронный ресурс] // URL: <https://www.statista.com/statistics/625010/electric-vehicle-market-share-in-eu-annual>.
2. Vehicles & Road Traffic. Percentage share of new passenger cars in Europe with diesel engines in 2015 and 2019, by country [Электронный ресурс] // URL: <https://www.statista.com/statistics/425113/eu-car-sales-share-of-diesel-engines-by-country>.
3. Technologies for Reducing Fuel Consumption in Spark-Ignition Engines. [Электронный ресурс] // URL: Режим доступа: <https://www.nap.edu/read/21744/chapter/4>.
4. Eine Bequeme Reise [Электронный ресурс] // URL: <http://glanze.sakura.ne.jp/index.html>.
5. Downsized, boosted gasoline engine // The International Council of Clean Transportation, Working paper 2016-22.
6. End of downsizing // Engine technology, #3 2017.
7. Блохин, А.Н. Сравнительный анализ определения расхода топлива автомобиля с использованием расходомера DFL3X-5BAR и расчетным методом с помощью диагностического протокола OBDII / А.Н. Блохин, Ю.И., Молев П.С. Мошков, А.Н. Тихомиров // Современные проблемы науки и образования. 2015. №1-1. С. 21.
8. Тихомиров, А.Н. Вопросы выбора мощности вспомогательной энергоустановки транспортной электроплатформы / А.Н. Тихомиров, В.В. Щербаков // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексева. 2018. №2 (121). С. 196-201.