

Формула топливного баланса автомобиля

М.Н. Гуров,
зав. лабораторией МГУПИ,
В.В. Московкин,
проф., главный научный сотрудник НАМИ, д.т.н.

Показан механизм построения топливного баланса автомобиля, на основе которого можно решать вопросы, имеющие важное научное и практическое значение при создании нового автомобиля или модернизации существующего. Среди них: поэтапный сопоставительный анализ разрабатываемого автомобиля с аналогами, оценка эффективности установки на него различных агрегатов, определение приоритетных направлений работ.

Ключевые слова: топливный и энергетический балансы автомобиля, сопротивление движению автомобиля, механическая работа, тепловые потери.

Formula of fuel balance of the car

M.N. Gurov, V.V. Moskovkin

The gear of creation of fuel balance of the car on the basis of which it is possible to solve the questions having important scientific and practical value at creation of the new car or modernization of the existing is shown. Among them: the bit-by-bit comparative analysis of the developed car with analogs, an assessment of efficiency of installation on it various units, definition of the priority directions of works.

Keywords: fuel and power balances of the car, resistance to car movement, mechanical work, thermal losses.

Топливный баланс автомобиля имеет важное научное и практическое значение, так как на его основе определяются приоритетные направления работ и оценивается эффективность различных мероприятий.

Проиллюстрируем теоретические основы составления топливных балансов, разработанных различными авторами, на примере автомобиля Volvo (6×4) с дизелем, движущегося по горизонтальному шоссе со скоростью 60 км/ч.

Выбор данного автомобиля обусловлен тем, что он проходил испытания в НАМИ. Эта модель занимает промежуточное положение по массе между одиночными грузовиками и автопоездами, а по колесной формуле – между наиболее распространенными вариантами 4×2 и 6×6.

Так, на основе теории проф. Н.В. Дивакова (МАМИ) можно установить, что у данного автомобиля на аэродинамику расходуется 10 % топлива. Аналогичные результаты дают разработки д.т.н. А.А. Токарева (МАДИ) [1], д.т.н. Г.Б. Безбородовой (Киевский автодорожный институт) [2], специалистов завода ИФА (Германия) и фирмы Тойота [3]. Мнения других исследователей по данному вопросу не совпадают с выводами перечисленных авторов. Так, Э.И. Наркевич, В.А. Резниченко и Н.С. Киселев (Дмитровский Автополигон) [4] и д.т.н. В.А. Петрушов (НАМИ) [5] считают, что затраты топлива на аэродинамическое сопротивление должны составлять 21 %, к.т.н. Ю.В. Медовщиков (МАДИ) [6] и специалисты исследовательских лабораторий компаний «Дженерал Моторс» [7] и «Мицубиси» – 31 %, исследователи большинства фирм, входящих в ЕС («Мерседес», ДАФ, «Рено» и др.) [8, 9], – 50 %.

Еще более удивительные данные приводит проф. А.И. Гришкевич [10], который утверждает, что при снижении аэродинамического сопротивления магистрального автопоезда на 12,5 % расход его топлива уменьшится на 25 %. Такое соотношение можно получить только в том случае, если удельный вес аэродинамического сопротивления в топливном балансе данного автопоезда составит 200 %.

Примерно о таком же соотношении между расходом топлива и аэродинамическим сопротивлением заявляют специалисты фирмы Kenworth [Автомобильная промышленность США]. Рекламируя свои автомобили, они утверждают, что их компоновка (кабина за двигателем) по сравнению с распространенной в Европе компоновкой (кабина над двигателем) позволяет сэкономить 22 % топлива, хотя аэродинамическое сопротивление из-за такой формы снижается только на 10...12 %.

Нередко авторы топливных балансов противоречат сами себе. Например, в работе [11] приведено мнение, что на преодоление сопротивления воздуха может быть израсходовано до 8 % топлива, а также показан автопоезд, у которого на сопротивление воздуха расходуется более 40 % топлива, что в 5 раз превышает установленный автором теоретический предел.

Широко разрекламированный аэродинамический обтекатель ТОПЕК-Р позволяет, по данным его разработчиков, при эксплуатации сэкономить больше топлива,



чем его заложено на аэродинамическое сопротивление в топливном балансе.

Возникшие противоречия можно было бы разрешить на основе составления корректного топливного баланса. Однако никто из авторов теории автомобиля не решился провести их анализ и определить, какой из имеющихся топливных балансов корректен, в связи с этим в теории автомобиля его просто нет.

В результате в различных источниках появляются сообщения о значительной экономии топлива (десятки процентов) за счет аэродинамических обтекателей, присадок к моторным и трансмиссионным маслам, распылителей топливно-воздушной смеси, микропроцессорных систем для управления двигателем и трансмиссией и т.п.

Рассмотрим суть разработанного нами топливного баланса автомобиля.

Расход топлива в России и многих странах мира определяется при прохождении расстояния в 100 км, поэтому в расчетах были использованы: расход топлива Q_s (г), путь $S = 100 \text{ км} = 100\,000 \text{ м}$.

При сгорании топлива в цилиндрах двигателя автомобиля, который преодолел путь $S = 100 \text{ км}$, выделялась тепловая энергия E_s (Дж). Одна ее часть преобразуется в механическую работу

$$A = P_i S,$$

где P_i – суммарная сила сопротивления движению, Н.

Другая ΔE_s – через систему охлаждения двигателя, с выхлопными газами и т.п., рассеивается в окружающей среде. Данный энергетический баланс описывается следующим уравнением

$$E_s = A + \Delta E_s. \quad (1)$$

Суть каждой составляющей данного уравнения и методу их определения покажем на примере простейшего режима движения автомобиля с постоянной скоростью на горизонтальном участке шоссе.

Сначала замеряем расход топлива Q_s , затем суммарную силу P_i , которая близка к фактическому значению. Ее можно определить при замере усилия, необходимого для буксировки автомобиля на той же скорости с включенной передачей и выключенной подачей топлива.

С помощью найденных значений Q_s и P_i определяем энергию, которая образуется при сгорании топлива $E_s = Q_s H_u$ (H_u – низшая теплота сгорания топлива, Дж/г), и полученную при этом механическую работу A .

Найденные величины позволяют вычислить по формуле (1) ΔE_s – энергию, затраченную на преобразование энергии, заключенной в топливе, в механическую работу.

Таким образом, уравнение (1) отражает суть разработанного энергетического баланса автомобиля. Теперь выполним некоторые преобразования, которые не влияют на данный баланс, а направлены на упрощение расчетов топливной экономичности автомобиля и оценки эффективности различных мероприятий.

Если каждую составляющую энергетического баланса разделить на H_u – получим топливный баланс автомобиля

$$Q_s = \frac{A}{H_u} + \Delta Q_s, \quad (2)$$

где $\frac{A}{H_u}$ – топливо, преобразованное в механическую работу, г; ΔQ_s – топливо, потерянное при преобразовании энергии в механическую работу, г.

Для определения взаимосвязи между расходом топлива и произведенной при его сгорании в цилиндрах двигателя механической работой был разработан новый параметр g_s , который используется вместо g_e – удельного эффективного расхода топлива (г/кВт·ч). Различие этих показателей, по сути, отражено индексами i и e : индикаторный вместо эффективного. Индекс S (путь) обозначает изменение масштабного фактора. Поскольку путь у нас всегда 100 000 м, мы приняли для параметра g_s размерность $\frac{\text{г}}{\text{Н} \cdot 100 \text{ км}}$, удобную для расчетов и анализа топливной экономичности автомобиля.

Таким образом g_s определяет затраты топлива (г), необходимого для получения механической работы в 100 000 Дж. Это эквивалентно работе, которая затрачивается на преодоление силы в 1 Н на пути 100 000 м.

Для определения структуры g_s разделим каждую составляющую топливного баланса (2) на механическую работу A :

$$g_s = g_{isw} + g_{ise}. \quad (3)$$

Первое слагаемое (3) характеризует топливо, преобразованное в механическую работу (индекс w), с учетом выбранной размерности вычисляется по формуле

$$g_{isw} = \frac{100\,000}{H_u}.$$

Из данной формулы видно, что величина g_{isw} имеет постоянное значение, зависящее только от вида топлива. Например, при сгорании 1 г дизельного топлива выделяется 43 000 Дж тепловой энергии, а 1 г бензина – 44 000 Дж. Если бы вся эта энергия без остатка превратилась в механическую работу, то для преодоления силы в 1 Н на пути 100 км необходимо было бы затратить 2,33 г дизтоплива или 2,27 г бензина. Следовательно, для автомобиля, работающего на дизельном топливе

$$g_{isw} = 2,33 \frac{\text{г}}{\text{Н} \cdot 100 \text{ км}}, \text{ а на бензине } g_{isw} = 2,27 \frac{\text{г}}{\text{Н} \cdot 100 \text{ км}}.$$



Однако из-за тепловых потерь через стенки цилиндров и с выхлопными газами затраты топлива для совершения единицы работы повышаются на величину, определяемую вторым слагаемым g_{ise} в формуле (3).

Для удобства составления топливного баланса автомобиля и анализа степени совершенства рабочего процесса установленного на нем двигателя используем новый показатель Δ , который характеризует удельный вес тепловых потерь в топливном балансе автомобиля. Он определяется как отношение тепловых потерь к произведенной механической работе

$$\Delta = \frac{g_{ise}}{g_{isw}}$$

С учетом преобразований формула топливного баланса (2) примет вид

$$Q_S = g_{isw}(1 + \Delta)P_i \quad (4)$$

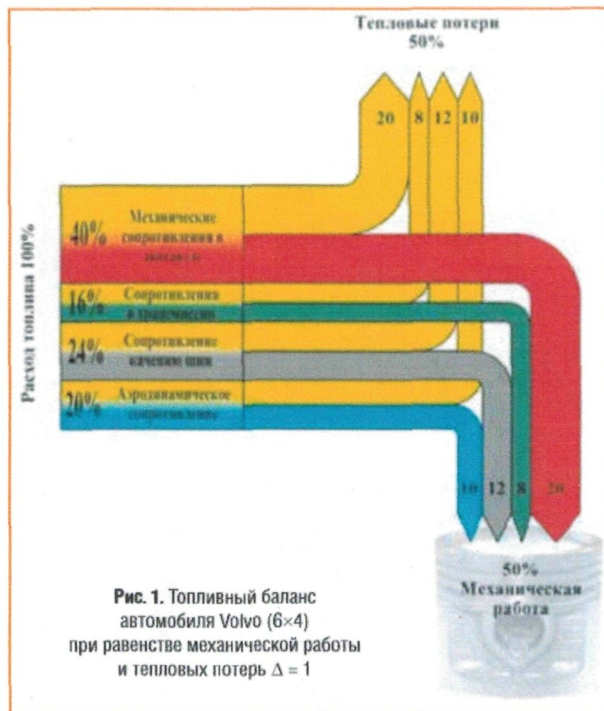
Здесь g_{isw} – постоянная величина. В скобках стоят величины, которые в безразмерных единицах показывают соотношение между топливом, преобразованным в механическую работу и потерянным при ее получении.

Рассмотрим пример практического применения формулы (4). В связи с этим запишем ее в развернутом виде применительно к автомобилю, который движется с постоянной скоростью по горизонтальной дороге. На данном режиме движения приведенная (так как силы прикладываются не непосредственно к колесу, то суммарная сила приведенная) к колесам автомобиля суммарная сила сопротивления движению P_i складывается из следующих составляющих: механических сопротивлений в двигателе и сопротивлений от вспомогательного оборудования – P_{MT} ; сопротивлений в трансмиссии – P_{TP} ; сопротивления качению шин – P_f ; аэродинамического сопротивления – P_w .

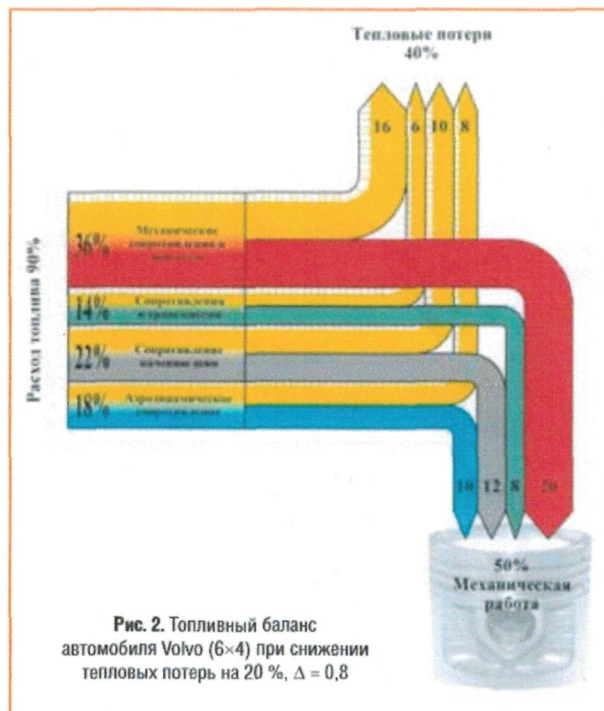
$$Q_S = g_{isw}(1 + \Delta)(P_{MT} + P_{TP} + P_f + P_w) \quad (5)$$

С помощью (5) составлен топливный баланс упомянутого выше автомобиля Volvo (6x4) (рис. 1). Здесь для получения единицы механической работы затрачено столько же тепловой энергии $\Delta = 1$. Это означает, что в данном режиме движения автомобиля его двигатель для преодоления каждой силы в 1 Н на пути 100 000 м потребляет 4,66 г дизтоплива. Из них 2,33 г преобразуется в механическую работу и столько же – в потери тепловой энергии через стенки цилиндров, систему охлаждения, с выхлопными газами и т.п.

Если у данного автомобиля уменьшить тепловые потери на 20 %, например, за счет использования новых конфигураций камер сгорания и впускных и выпускных систем, применения повышенной энергии впрыска, утепления элементов двигателя керамическими прокладками и т.п.,



то величина g_{isw} не изменится, а Δ уменьшится. В данном случае тепловая энергия расходуется более экономно, чем в исходном варианте. В результате произведенная механическая работа останется той же (5), однако на каждую единицу произведенной механической работы затраты теплоты снизятся на 20 % ($\Delta = 0,8$). Топливный баланс автомобиля, у которого уменьшены тепловые потери, показан на рис. 2.



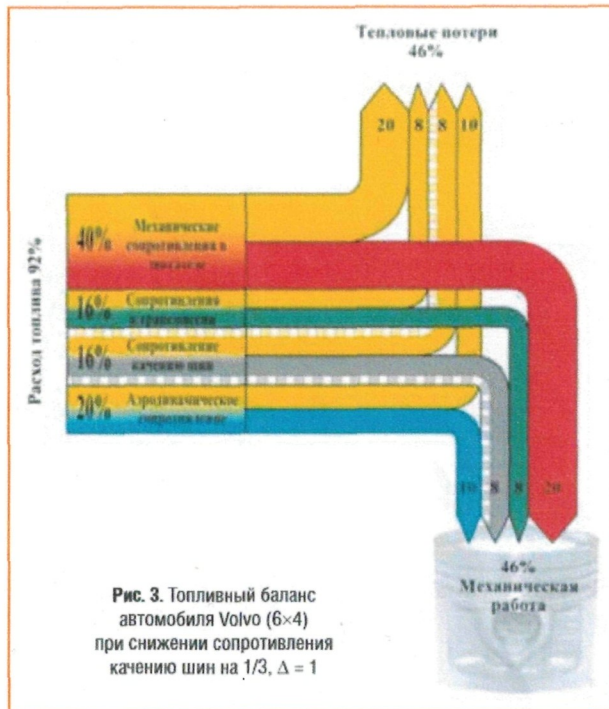


Рис. 3. Топливный баланс автомобиля Volvo (6×4) при снижении сопротивления качению шин на 1/3, $\Delta = 1$

При снижении сопротивления движению автомобиля согласно (5) произойдет снижение затрат топлива на механическую работу и на тепловые потери, связанные с ней. Например, если снизить сопротивление качению шин у автомобиля в исходном варианте на 1/3 в соответствии с (5), затраты топлива на механическую работу снизятся на величину $g_{sw} P_f / 3$ и на столько же – на тепловые потери ($\Delta = 1$).

Топливный баланс автомобиля, у которого уменьшено сопротивление качению шин по сравнению с исходным вариантом, показан на рис. 3.

Таким образом, была выведена формула топливного баланса автомобиля. Созданная на его основе математическая модель используется в компьютерной программе МВК [12], с помощью которой для различных автотранспортных средств, а их более 5 тыс., рассчитываются расходы топлива.

Для проверки корректности математической модели постоянно проводится сопоставление результатов расчетов, полученных с помощью МВК, с экспериментальными данными. Например, для всех участвующих в экспериментах легковых автомобилей (примерно 4,5 тыс.) контролируемые расчетные параметры (максимальная скорость, время разгона в заданном диапазоне скоростей, расходы топлива в городском, скоростном и смешанном циклах и т.п.), рассчитанные с помощью МВК, укладываются в пределы естественного разброса данных (в среднем 3...5 %), полученных при натурных испытаниях.

В связи с этим с помощью МВК можно оперативно решать многие задачи, имеющие научный и практический интерес. Например, наглядно показать, как влияют на топливную экономичность автомобиля тип двигателя, его рабочий объем и мощность, число ступеней КП, манера езды, ограничение скорости и т.п., а также какую экономию топлива можно получить за счет распылителей топливовоздушных смесей, добавок к моторным и трансмиссионным маслам, аэродинамических устройств, шин прогрессивных конструкций.

Литература

1. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
2. Безбородова Г.Б., Вельбовец А.Ф. Топливный баланс прицепного автопоезда // Автомобильная промышленность. – 1987. – № 11.
3. Matsumoto K. Total vehicle economy – the challenge. Int. conf. fuel power trains and veh.: VECON84, London 22-24 Oct. 1984. – P. 21-23.
4. Резниченко В.А., Наркевич Э.И., Киселев Н.С. Эксплуатационные свойства некоторых седельных тягачей // Автомобильная промышленность. – 1986. – № 4. – С. 16.
5. Петрушов В.А. Автомобили и автопоезда: Новые технологии исследования сопротивлений качения и воздуха. – М.: ТОРУС ПРЕСС, 2008. – 352 с.: ил.
6. Медовщиков Ю.В. Влияние аэродинамики автомобиля на топливную экономичность. – Сб. науч. тр. МАДИ: Пути улучшения автотранспортных средств. – М.: 1985. – С. 97-103.
7. Sovran G. Tractive-energy-based formulae for the impact of aerodynamics on fuel economy over the EPA driving schedules, SAE Trans. 830304, 1983. – P. 746-757.
8. Frank Zeitzen. Die schwarze Kunst // Lastauto omnibus. – 1996. – № 2. – P. 30-31.
9. Влияние конструктивных и эксплуатационных факторов на топливную экономичность грузовых автомобилей и автобусов фирмы Рено. Научно-исследовательский отдел фирмы Рено. – М.: 1987. – 53 с.
10. Гришкевич А.И. Автомобили. Теория. – Минск: Высшая школа, 1986.
11. Токарев А.А. Топливная экономичность и тягово-скоростные качества автомобиля. – М.: Машиностроение, 1982. – 224 с.
12. Московкин В.В., Парыгин С.П., Вохминов Д.Е. МВК Программный пакет для комплексных исследований автомобиля // Журнал ААИ. – 2004. – № 1.
13. Евсеев П.П. О нормировании расхода топлива автомобилем // Автомобильная промышленность. – 2001. – № 11. – С. 20-22.

