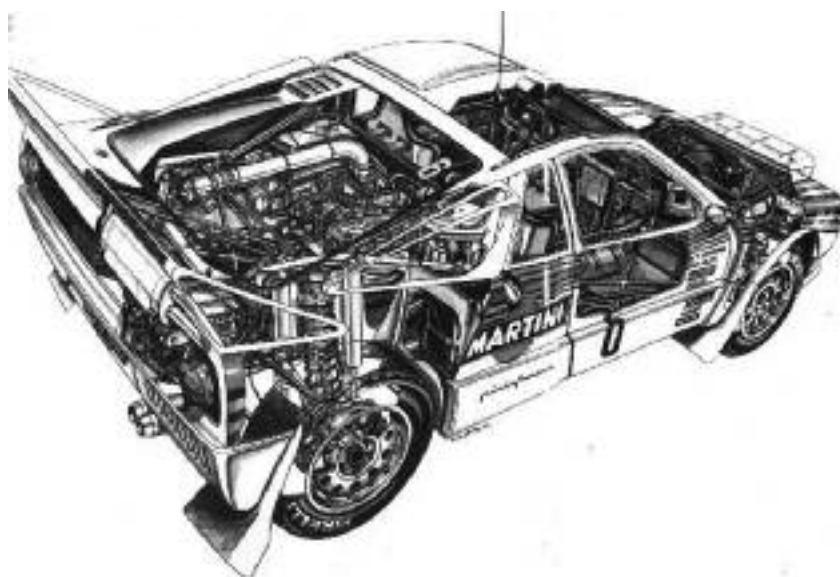


---

## Введение

Принцип действия турбонагнетателя прост. По сути, это нагнетатель воздуха, который приводится энергией, остающейся в выхлопных газах после их выхода из цилиндров двигателя. Из энергии, выработанной в процессе сгорания топлива, приблизительно треть отдается в систему охлаждения, треть производит работу на коленчатом валу, и треть выбрасывается из выхлопной трубы в виде тепла. Именно эту последнюю, третью часть мы можем использовать для привода турбонагнетателя. Заметьте, что 200-сильные машины выбрасывают приблизительно 70 л/с в виде теплоты прямо в выхлопную трубу. Это огромное количество энергии, которая могла бы быть использована. Вам доводилось видеть вентилятор, приводимый в действие 70-ю лошадиными силами? Таким образом, не трудно представить себе потенциал турбонагнетателя по перемещению огромного количества воздуха.



*Легендарная Lancia Delta Integrale 16V. Турбина Garrett AiResearch T03, создающая давление наддува 1,9 бара, обеспечивает мощность 345 л.с. (с установленным 34 мм рестриктором на впуске)*

Система турбонаддува – не примитивное устройство. Она состоит из турбонагнетателя и деталей, необходимых для интеграции его в кон-

струкцию двигателя. Однако нигде на этих страницах не обсуждаются такие вещи, как обтекание воздухом рабочих лопаток компрессора и прочие глубинно-фундаментальные аспекты. Поэтому Вы можете чи-

*Двигатель Nissan RB26DET, доработанный компанией Tomei.*



тать эту книгу с уверенностью, что она не является техническим трактатом о секретах работы турбонагнетателя. Определенный смысл, который вкладывается в эту книгу – сделать ее практическим пособием по применению турбонагнетателей в двигателях внутреннего сгорания.

Турбонагнетатель имеет простой и огромный потенциал для увеличения отдаваемой двигателем мощности, больший, чем у любого другого предназначенного для этой цели устройства.

*Indy car - лучший на сегодня пример разработки силовых установок с турбонаддувом в узких рамках технических требований гоночной серии.*



Что же такое турбонаддув, как он работает, и какое оборудование необходимо для него – ключевые моменты, которые освещены в этой книге.

---

# Инженерный взгляд на ОСНОВЫ

## Мощность турбонаддува.

Способность турбонагнетателя увеличивать мощность наиболее наглядно демонстрировалась гоночными автомобилями Гран-при Формулы 1 эпохи 1977-1988 годов.

*Рис. 1-1. Двигатель Renault EF15B Formula 1, 1985 - 1986 г.г., V6, объем 1492 куб. см., давление наддува до 4 бар, мощность до 900 л.с.*



Сравнение мощности дрегстеров с мощностью болидов Формулы 1 показывает абсолютное превосходство двигателей с турбонаддувом. Реальная мощность драгстера с 8-ми литровым двигателем находится в диапазоне 5000-6000 л/с, что означает 0,62 – 0,75 л/с с 1 куб. см. Эти цифры выглядят блекло в сравнении с 1300-1400 л/с 1500 кубовых двигателей автомобилей Формулы 1 1981 года, что означает отдачу от 0,86 до 0,93 л/с с одного кубического сантиметра рабочего объема. Однако у потенциального пользователя турбонаддува остается много вопросов,

ответы на которые покажут, почему турбонаддув в равной степени полезен автомобильному энтузиасту, который использует автомобиль для повседневной езды, спортсмену, и даже уличному гонщику.

Почему турбонаддув дает больший прирост мощности, чем другие способы модернизации двигателя?

Потенциал повышения мощности двигателя от применения любого компрессора измеряется количеством воздуха, нагнетаемого устройством с учётом потерь мощности, затрачиваемой на привод, а так же на нагрев воздуха в процессе сжатия. Хотя может показаться, что турбонагнетатель не использует мощность двигателя, так как энергия выхлопа так или иначе будет потеряна, это далеко не так. Поток горячих выхлопных газов приводит во вращение турбину. Уменьшенные проходные сечения, свойственные ее конструкции, создают этим газам противодействие. Это вызывает некоторые потери мощности двигателя, которые не возникли бы, если бы турбонагнетатель забирал энергию от другого её источника, а не двигателя, который в нашем случае выступает в роли насоса. Потеря мощности увеличивается при уменьшении размера турбонагнетателя, потому что турбина меньшего размера создает большее противодействие. Напротив, большие турбины создают намного меньшее противодействие, и поэтому потери мощности меньше.

И всё же затраты мощности на привод нагнетателя, свойственные двигателю с турбиной, существенно меньше, чем потери, возникающие при использовании приводного компрессора с ремнем или другим механическим приводом.

То, что нагнетатель всегда нагревает сжимаемый воздух, является термодинамическим фактом, от которого мы не можем отмахнуться. Различные виды нагнетателей воздуха нагревают воздух в разной степени при одинаковых расходах газа и степенях сжатия. В значительной степени это зависит от КПД различных типов насосов. Классический компрессор типа Рутс обычно имеет КПД приблизительно 50 % при том, что турбонагнетатель имеет КПД в районе 70%. Чем выше эффективность (КПД), тем меньше нагрев воздуха. Эффективность имеет первостепенное значение для настоящих энтузиастов мощности, так как повышенная температура воздуха на впуске – враг для высоких характеристик двигателя. Плотность воздуха меньше при высокой температуре; таким образом, двигатель фактически потребляет меньшее количество воздуха при более высокой температуре, даже если давление неизменно. Второй проблемой является то, что более высокие температуры способствуют разрушительно воздействующей на двигатель детонации топливовоздушной смеси.

### Противостояние отдаваемой мощности

Как конструкция двигателя может выдерживать эти огромные мощности?

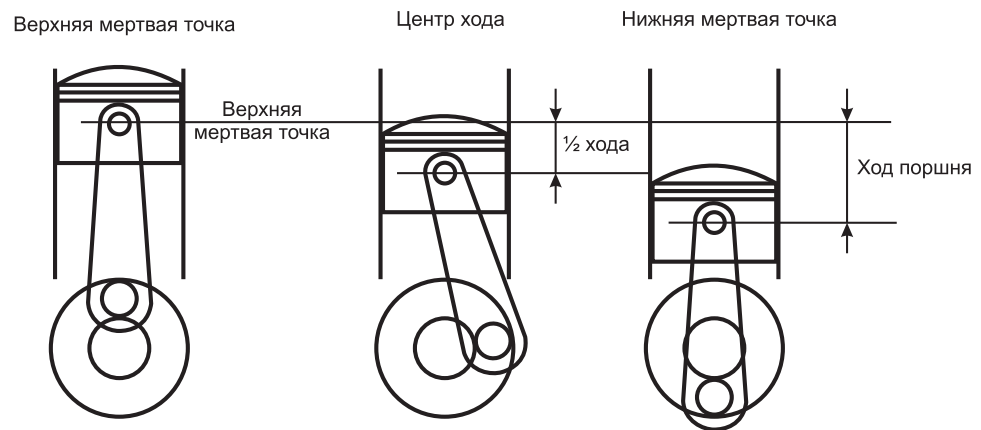
Чтобы понять, почему для конструкции двигателя не является губительной увеличенная в разумных пределах при помощи турбонагнетателя мощность, необходимо рассмотреть статические нагрузки в двигателе во время его работы. К конструкции двигателя в разные моменты его работы прикладываются два вида статических нагрузок:

инерционные и мощностные. Инерционные нагрузки могут быть растягивающими (произведены растягиванием) или сжимающими (произведены сжатием). Мощностная нагрузка может быть только сжимающей. Механизмы воздействия этих нагрузок должны стать понятны читателю как по отдельности, так и в совокупности. Это необходимо для ясного представления, почему турбонагнетатель не убивает кривошипно-шатунный механизм двигателя.

### Инерционная нагрузка.

Инерционная нагрузка возникает из-за сопротивления предмета ускоренному движению. Чтобы исследовать инерционные нагрузки, удобно разделить цилиндр на верхнюю и нижнюю части. Вообразите две половины, отделенные мнимой линией, называемой серединой хода поршня.

Рис. 1-2. Зависимость нагрузок на узлы двигателя меняет свой характер в трёх характерных взаимных положениях поршня и коленчатого вала.



Вектор ускорения поршня всегда направлен к середине его хода (даже при движении вверх или вниз от этой середины). Другими словами, когда поршень выше середины своего хода, он будет всегда ускоряться вниз. Когда он ниже середины хода (даже в мертвой точке), он будет ускоряться вверх. Самые большие ускорения достигаются в верхней мертвой точке и нижней мертвой точке, когда поршень фактически останавливается. Когда ускорение самое большое, нагрузки будут самые высокие. Когда поршень проходит через середину своего хода ускорение нулевое, а скорость максимальна, .

Величина нагрузок, возникающих при движении поршня, пропорциональна частоте вращения двигателя, возведенной в квадрат. Например, если число оборотов двигателя в минуту увеличено втрое, инерционная нагрузка будет в девять раз большей. Поршень, который двигается (ускоряется) к верхней мертвой точке и затем обратно к середине хода, прикладывает растягивающую инерционную нагрузку к узлу поршень/шатун. Напротив, когда поршень двигается к нижней мертвой точке и затем обратно к середине хода, инерционная нагрузка будет сжимающей. Таким образом, во время нахождения поршня выше середины хода инерционная нагрузка, будет растягивающей, а ниже се-



редины хода - сжимающей. Самое большое растягивающее усилие, приложенное к шатуну – в верхней мертвой точке на ходе выпуска (потому что в верхней мертвой точке в конце такта сжатия ТВС уже горит и создает давление, противодействующее инерционной нагрузке). Самая большая сжимающая нагрузка – в нижней мертвой точке после впуска или рабочего такта.

Эти инерционные нагрузки огромны. В двигателе большого объема, работающем на 7000 оборотов в минуту, в шатуне могут развиваться инерционные нагрузки величиной более, чем 1,8 тонны. (Для наглядности представьте себе микроавтобус, стоящий на вашем шатунном подшипнике.)

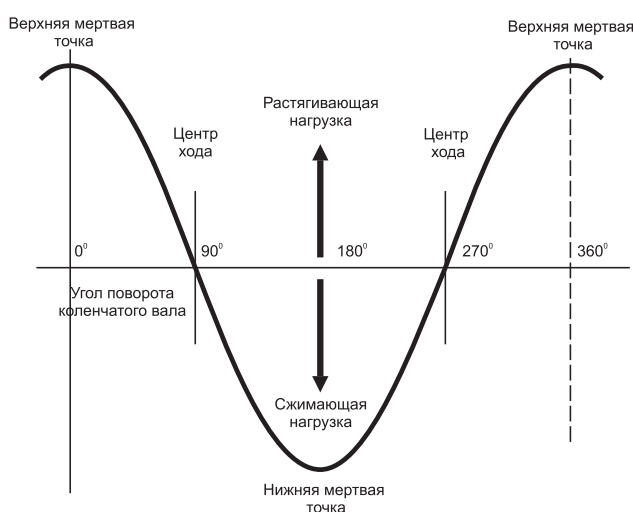


Рис. 1-3. Инерционные нагрузки, прикладываемые к шатуну, приближены к синусоидальной зависимости относительно угла поворота коленчатого вала.

### Мощностная нагрузка.

Мощностная нагрузка возникает от давления сгорающей ТВС, приложенного к поршню. Например – сжимающая нагрузка, приложенная к шатуну вследствие того, что горячие газы вынуждают поршень двигаться вниз.

Давление, созданное расширяющимися горячими газами, прикладывает к поршню силу, равную площади сечения цилиндра, помноженной на давление в камере сгорания. Например, шатун в двигателе с площадью сечения цилиндра 64,5 квадратных сантиметра (при диаметре 90 мм) при давлении 800 пси, будет испытывать сжимающую мощностную нагрузку в 3,6 тонны.

Особая зависимость инерционных и мощностных нагрузок наиболее интересна в верхней половине рабочего такта. Здесь мы имеем следующую картину: две нагрузки, действующие на шатун, нагружают его в различных направлениях. Помните, что инерционная нагрузка является растягивающей выше середины хода, в то время как мощностная нагрузка в любом случае является сжимающей. Мощностная нагрузка достигает максимума при максимуме крутящего момента, и постепенно снижается при дальнейшем увеличении оборотов двигателя, но вообще всегда больше чем инерционная нагрузка. Разность между этими двумя нагрузками и есть реальная нагрузка на шатун (рис. 1-5).

Итак, инерционные нагрузки частично компенсируются мощностной нагрузкой. Из вышесказанного, очевидно, что в конце такта выпуска, когда шатун/поршень достигает верхней мертвой точки и не подвергается сопротивлению сжимающихся газов (потому что все клапаны открыты), достигается самое высокое растягивающее усилие. Эта нагрузка наиболее разрушительна из всех, потому что растягивающие усилия вызывают усталостное разрушение, в то время как сжимающие усилия к этому не приводят. Поэтому, когда конструктор анализирует напряжения в шатуне и шатунных болтах, его в наибольшей степени интересуют инерционные нагрузки в верхней и нижней мертвых точках..

Рис. 1-4. Сгорающая ТВС создает сжимающие нагрузки в шатуне.

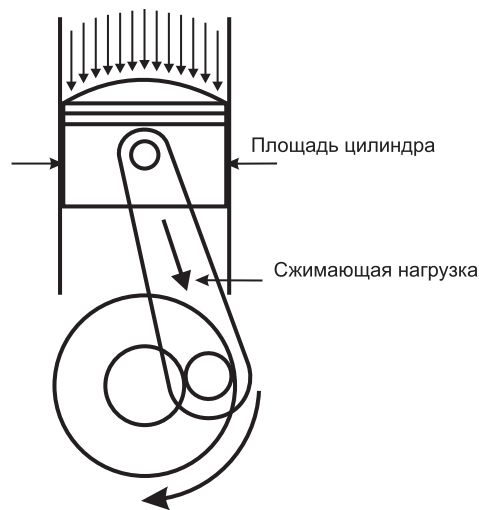


Рис. 1-5. Объединенный график мощностной и инерционной нагрузок. Заметьте, что мощностная и инерционная нагрузка вычитаются друг из друга.



Мысль об удвоении момента двигателя (удвоении мощности при тех же оборотах двигателя) приводит к другой мысли – об удвоении

мощностной нагрузки. К счастью это не так. Показать, как мощность можно удвоить без удвоения давления в камере сгорания, проще всего графически. Любые существенные изменения расчетной нагрузки были бы основаны на пиковом давлении в камере сгорания. На рисунке 1-6 видно, что при удвоении количества смеси в камере сгорания, пиковое давление возрастает только приблизительно на 20 %. Имеются две причины для этой непропорциональности.

Во-первых, мощность – функция среднего давления по всему рабочему ходу поршня, а не только пикового давления. Среднее давление может быть значительно увеличено за счет более высокого давления в середине или в конце хода, в то время как максимум давления существенно не возрастает.

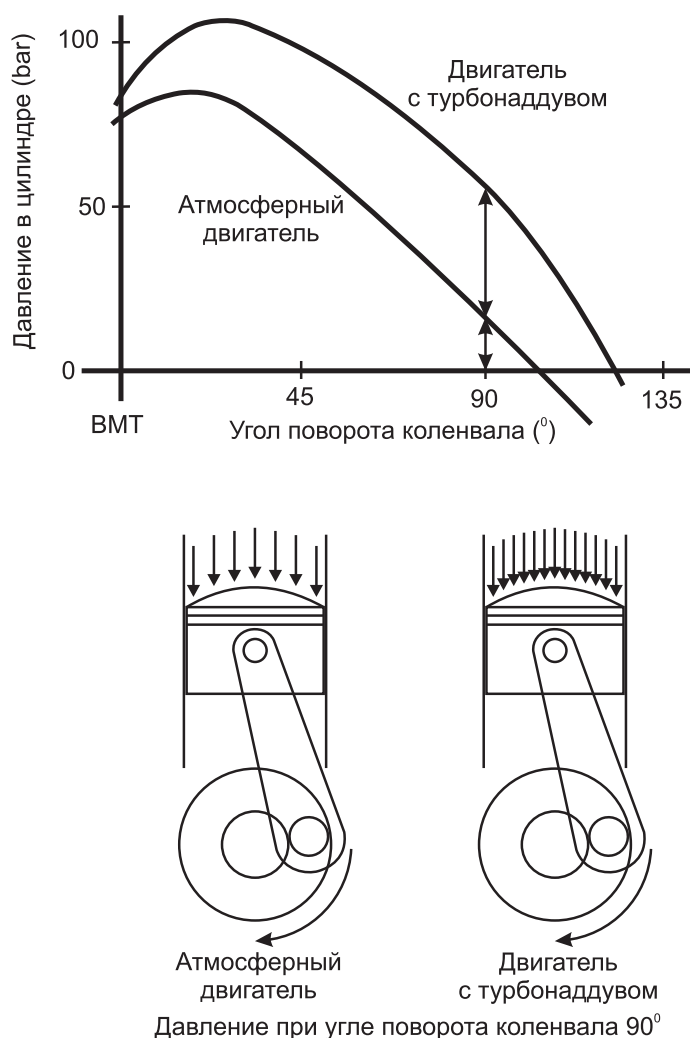


Рис. 1-6. Момент на коленчатом валу как функция угла поворота коленчатого вала при примерно двух атмосферах давления. Заметьте, что у двигателя с турбонаддувом максимальное давление достигается приблизительно при 20 градусах после ВМТ, когда сгорает около 20 % смеси. Даже при высоких давлениях наддува малое количество сожженной смеси не будет давать результат в виде большого изменения максимального давления. Когда процесс горения приблизится к завершению, большая плотность смеси может поднимать давление в три – четыре раза при углах поворота коленчатого вала около 90 градусов, поэтому момент на валу при этом может быть вдвое больше.

Во-вторых, максимальное давление вообще достигается после сгорания 18-20 % смеси. Если количество смеси удвоено, те же 18-20 % этого количества сгорят при достижении максимального давления. Так как полное давления в камере сгорания состоит из давления сжатия и давления сгоревших газов, невозможно удвоить полное давление, удваи-



вая только одну из его составных частей. (Не иначе, законы физики благосклонны к шатунам и шатунным подшипникам.)

Тщательное изучение рисунка 1-6 показывает, что при угле поворота коленчатого вала, приближающегося к 90 градусам, давление в камере сгорания, при работе с наддувом, в три - четыре раза больше. Оно, однако, заметно меньше чем максимальное давление. Поэтому оно не создает разрушающей нагрузки. Часть рабочего хода в районе 90 градусов – это тот участок, где возникают реальные увеличения мощности двигателя с турбонаддувом. Любой владеющий физикой товарищ, посмотрев на диаграмму, скажет Вам, что область под соответствующими кривыми представляет собой мощность. Таким образом, разность в площади этих двух областей представляет собой увеличение мощности от применения турбонагнетателя. Теперь очевидно, что мы можем удваивать мощность, не удваивая нагрузку на поршень и шатун!

Итак: предшествующее обсуждение показывает, что увеличенное давление в камере сгорания при использовании турбонаддува и увеличившаяся при этом мощностная нагрузка будут иметь довольно умеренное влияние на конструкцию двигателя.

*\*\* ПРАВИЛО: Мощностная нагрузка вообще не будет щекотать двигателю пузо.*

## Большой ресурс

Большой ресурс: достигается ли он? а как он достигается? Ответ на первый вопрос легко находится при рассмотрении нескольких примерах. Кто-то в Porsche однажды сказал, что одна миля в гонках эквивалента по износу 1000 уличным милям. Гоночные автомобили Porsche с турбомоторами выиграла так много двадцатичетырёхчасовых гонок на выносливость, что только гоночные историки могут назвать их число. Автомобили проходят на таких гонках почти пять тысяч километров. «Гражданский» автомобиль с пробегом в пять миллионов километров кажется невозможным, но такая аллегория звучит внушительно. На кольцевой трассе «Daytona» Porsche 962 с турбонагнетателем развивает скорость более 320 км/ч. Мысль о том, что он будет так носиться в течение двадцати четырех часов, может показаться ошеломительной. При осознании таких нагрузок и скорости возникает уверенность, что никто не пройдет эту гонку до конца. Однако болиды с турбомоторами успешно финишируют. Эта книга, прежде всего, касается турбонаддува не для гоночных болидов, а для обычных машин, но поставленные задачи принципиально одинаковы, даже если они различны по размаху. «Гражданские» автомобили это как кусок вкусного пирога для автопроизводителей. Многие из них даже дают достаточно длительную гарантию на свои турбоавтомобили.

Достигнуть большого ресурса не так легко, как ответить на вопрос, достигим ли он. В широком смысле, большой ресурс сводится к контролю над теплотой в системе двигатель/турбонагнетатель. Любой элемент системы, в котором делает своё дело теплота, является кандидатом на роль Ахиллесовой пяты мотора. Для достижения большого ресурса должен быть оптимизирован каждый из этих элементов. Эта оптимизация охватывает КПД компрессора, промежуточное охлаждение, управление температурой выхлопных газов, температуру под-

шипников турбины, и многие другие аспекты, которые будут обсуждены в следующих главах. Мы должны найти решение поставленной задаче – "управление теплотой". При чтении этой книги будет полезно помнить, что в грамотном решении этой задачи фактически кроется успех турбодвигателя.

### Увеличение мощности

Откуда возникает увеличение мощности? Какова формула мощности любого двигателя, и как турбонаддув влияет на эту формулу? (Не пугайтесь до смерти при упоминании формул: те из них, о которых ниже идёт речь, являются простыми и легкими для понимания.)

Чтобы ответить на эти вопросы, надо изучить линейное уравнение с одним неизвестным, которое связывает мощность с параметрами, описывающими двигатель внутреннего сгорания.

$$\text{Мощность} = P * L * A * N$$

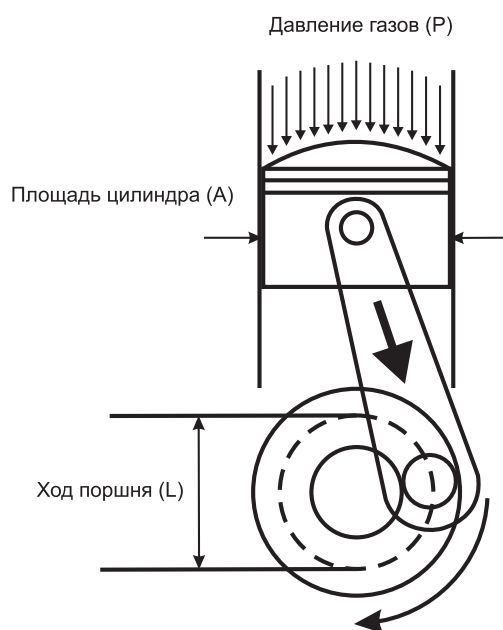


Рис. 1-7. «PLAN» – ключ к источнику всей отдаваемой мощности.

$P$  - среднее полное давление в цилиндре. Проще представить себе  $P$  как среднее давление, действующее на поршень.

$L$  - длина хода. Она сообщает, как далеко будет двигаться поршень под действием этого давления.

$A$  - площадь сечения цилиндра. Вот она, та самая площадь, к которой приложено давление.

$N$  - число рабочих тактов двигателя за одну минуту. Это число показывает, сколько цилиндров у двигателя и каковы его обороты.

$$N = \text{число цилиндров} * \text{rpm} / 2$$

(Для четырехтактного двигателя, обороты в минуту разделены на 2 потому что каждый цилиндр совершает рабочий такт один раз за два оборота)

Здесь наблюдается несколько интересных зависимостей! Например, возьмите  $P$  и умножьте на  $A$ , и Вы имеете произведение давления

на площадь, которое является средней силой, действующей на поршень. Теперь умножьте  $P \cdot A$  (сила) на длину хода  $L$  (расстояние), и Вы имеете число, которое представляет собой момент, теперь берите это число и умножьте на  $N$  (с какой скоростью совершается работа), вот Вы и получите мощность (то, что и заказывали).

Пожалуйста, заметьте, что это означает: мощность = момент \* обороты в минуту

Так как общая цель нашего упражнения – получение большей мощности, давайте изучим то, над чем позволяет нам поработать «PLAN».

Сначала давайте посмотрим на то, что может дать работа с  $N$ . Имеются два способа получить большее количество рабочих тактов в минуту: увеличить количество цилиндров или раскрутить двигатель до больших оборотов. Это дает некоторое поле для приложения усилий: старания целой области человеческой деятельности, известной как проектирование двигателей, направлены исключительно для достижения более высоких оборотов в минуту с определенным запасом прочности. Помните, что ненавистные инерционные нагрузки растут в квадратичной зависимости от увеличения оборотов двигателя. Это означает, что при 7200 оборотах в минуту, инерционная нагрузка будет составлять 144 % от нагрузки, возникающей при 6000 оборотах в минуту. Двигатель подвергается усиленному износу и разрушению. В конечном счете, увеличение отдаваемой мощности путем увеличения  $N$  не является ни дешевым, ни приятным и не способствует достижению большого ресурса.

Так как мы, по вышеизложенным практическим причинам, не можем значительно увеличивать мощность, увеличивая  $N$ , единственный оставшийся выбор – увеличить момент, делая что-то с  $PLA$ ,

Стало быть, мы должны вернуться и посмотреть на  $PLA$  немного внимательней. Попробуем изменить  $A$ , то есть - площадь сечения цилиндра. Насколько это поможет? Измените диаметр цилиндра на 3 мм, и, возможно, вы получите прибавку мощности в 10 %. Не стоит заморачиваться. Мы можем также изменить  $L$ , ход поршня. Может быть, получим ещё 10 %. Очевидно, что если нашей целью является существенное увеличение мощности, то  $A$  и  $L$  не дадут нам многого. Изменение  $P$  становится нашей единственной надеждой.

Как успешно изменять  $P$  - это сложный вопрос.  $P$  может быть изменено в 1,2, 1,5, 2, 3, 4, 5 раз... реальный потенциал не известен, так как инженеры постоянно нащупывают новый предел. Гоночные автомобили Гран-при сезона 1987 довели развитие турбонагнетателя до высочайшего уровня, когда-либо достигнутого, доведя отдаваемые мощности почти до 0,94 л/с с кубического сантиметра. Этого достаточно, чтобы сказать, что удвоение мощности нашего с вами обычного двигателя - это не детские фантазии, это наши оправданные ожидания.

Здесь особенно важно заметить то, что мы значительно увеличиваем мощность без увеличения оборотов двигателя. Потому что момент ( $PLA$ ) - это то, что мы действительно изменяем..

*\*\* ПРАВИЛО: Турбина увеличивает момент, а момент это здорово!*

## Эластичность двигателя

Каковы ограничения накладываемые турбодвигателем на эластичность?

Хорошая эластичность и отзывчивость на действия водителя для большинства современных автомобилей являются обязательными условиями. «Сел, завёл, поехал». Если не так, то современный потребитель будет недоволен.

Принято считать, что реальная мощность и хорошая эластичность не совместимы в одном автомобиле. Данное мнение является вполне справедливым для атмосферных двигателей, но совершенно не годится в отношении двигателей с турбонаддувом.

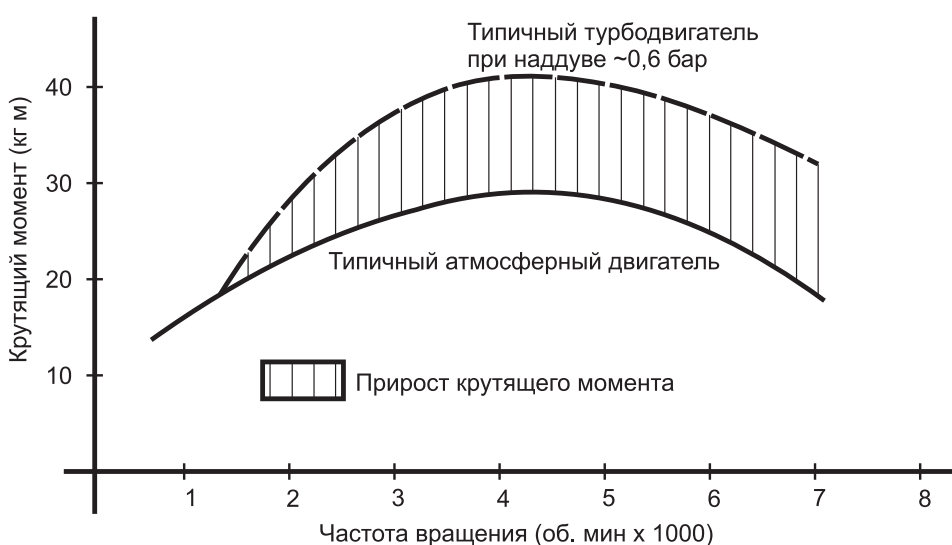


Рис. 1-8, Типичный пример разницы в кривых момента для турбомотора и атмосферного двигателя.

Рассмотрим факторы, определяющие эластичность: консервативные профили распредвала, малые впускные каналы, гибкость и калибровки топливной системы. Правильный двигатель с турбонаддувом имеет профиль распредвала с малым перекрытием, обычно называемый "экономичным распредвалом". Размеры каналов обычно малы, чтобы обеспечить хорошее наполнение цилиндров на низких оборотах и позволяющие компрессору затрамбовывать воздух в них, когда требуется высокое давление. Калибровка топливной системы должна быть точной, по крайней мере для случая электронно-управляемого впрыска топлива. Очевидно, что факторы, формирующие хорошую эластичность, присутствуют в автомобилях с турбомоторами. То, что турбонаддув позволяет подать большее количество воздуха в цилиндры, когда это необходимо, несколько не влияет на "сел, завёл и поехал."

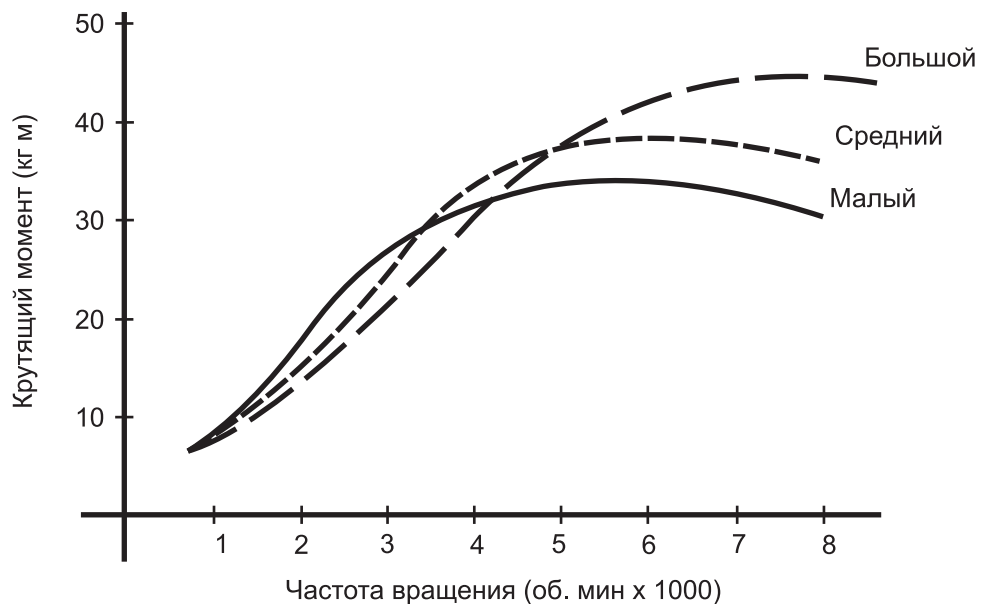
Однако имеются два фактора, влияющие на эластичность, которые начинают играть роль при использовании турбонаддува: порог наддува и задержка (лаг). Они, впрочем, не столь уж значительно ухудшают характеристики атмосферных двигателей, так как распредвал,

степень сжатия, установка угла опережения зажигания, и топливная смесь остаются фактически теми же самыми.

### Порог наддува.

Порог наддува, отнесённый к категории терминов для глоссария, по существу означает самые низкие обороты двигателя в минуту, при которых турбонагнетатель может создать давление наддува (с полностью открытой дроссельной заслонкой). Ниже этих оборотов турбонагнетатель просто не имеет достаточного количества энергии выхлопных газов, чтобы развить частоту вращения компрессора, необходимую для создания во впускном коллекторе давление выше атмосферного (см. рис., 1-8). До достижения оборотов порога наддува кривая момента двигателя остается фактически такой же, как у атмосферного двигателя. Если раскручивать двигатель далее при полностью открытой заслонке, водитель почувствует значительное увеличение мощности после порога наддува, поскольку кривая момента направлена вверх. Если дроссельная заслонка полностью не открыта, турбонагнетатель не вносит вклада в кривую момента, и ускорение будет таким же, как и у атмосферного двигателя.

Рис. 1-9. Диаграмма увеличения момента при использовании малой, средней, и большой турбин установленных на одном и том же двигателе.



Кривая момента до порога наддува может иногда являться компромиссным вариантом из-за беспричинного понижением степени сжатия (объем камеры сгорания плюс рабочий объем цилиндра, деленный на объем камеры сгорания), причиняя неприятные ощущения при отсутствии наддува на низких оборотах. Тут и выясняется, что некоторые из автомобильных производителей сделали серьезную инженерную (или экономическую) ошибку, не устанавливая соответствующие интеркулеры для достаточного охлаждения воздуха на впуске. Это позволило бы использовать более высокие степени сжатия, обеспечивая приятную реакцию двигателя на низких оборотах. Если Вы выбираете

себе машину с турбонагнетателем, попробуйте спросить у продавца о параметрах эффективности промежуточного охладителя (само собой, только после того, как Вы спросите, имеет ли вообще машина интеркулер). Разумно ожидать, что эластичность на низких скоростях имеет место, если транспортное средство оснащено промежуточным охладителем, и степень сжатия составляет 8 - 10.

Оценивать качество системы турбонаддува исключительно по наличию низкого порога наддува – значит допускать серьезную ошибку. Сложно доказать, что положительное давление наддува на низких оборотах двигателя – плохая вещь, но легко доказать, что это давление наддува на низких оборотах, достигнутое за счёт турбины меньших размеров – потенциальная проблема, связанная с более высоким обратным давлением отработанных газов. Тщательно разработанная система, в которой уделено подобающее внимание всем её параметрам, выдаст хорошее давление наддува на низких оборотах, и это будет лишь положительным её качеством.

Небольшие турбонагнетатели зачастую провоцируют раздражающую реакцию при незначительном открытии дроссельной заслонки. Это без сомнения влияет на эластичность двигателя, так как небольшое движение дроссельной заслонки производит быстрый и обычно нежелательный всплеск давления наддува, который ухудшает плавность движения автомобиля. Иногда это заставляет пассажира думать о водителе как о нервном и неуравновешенном. Этот небольшой всплеск часто дает водителю надежду, что автомобиль будет действительно лететь, когда дроссельная заслонка будет полностью открыта. Вместо этого, он с печалью наблюдает, что всплеск этот – и было все давление наддува, которое смогло изобразить лишь небольшой «дыр-р-р». Производители то и дело поступают именно так, надеясь, что мы будем думать, будто автомобиль имеет мгновенную реакцию и момент во всем диапазоне оборотов. Они вообще пропустили тот факт, что основные наши ожидания – это реальная мощность. Эта ошибка производителей имеет и обратную сторону – многие журналисты, писатели, крутые водители, и другие социальные изгои с удивлением вопрошают - " Где же, блин, мясо!?"

*\*\* ПРАВИЛО: Серийные турбонагнетатели вообще далеки от того чудо-устройства, которое энтузиасты и инженеры назвали бы быстрым, классным, и замечательным. Позвольте нам называть серийные турбины консервативными.*

## Задержка.

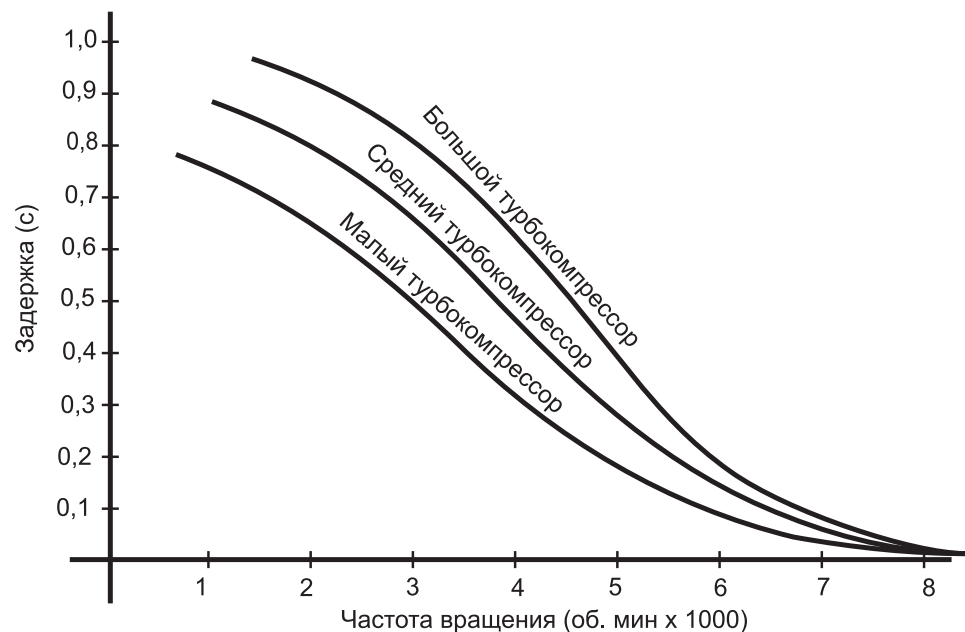
Обсуждение турбин редко обходится без упоминания о задержке (лаге турбины). На самом деле участники обсуждения редко говорят действительно о задержке. Обычно они говорят о пороге наддува. Пожалуйста, прочтите определения задержки (лага), порога наддува, и приемистости в глоссарии. Применительно к турбонагнетателю задержка по существу означает, как долго Вы должны ждать давления наддува после того, как открыли дроссельную заслонку. Стало быть, это явление не полезное по определению. Но задержка не имеет никакого отношения к приемистости. Приемистость в данном случае имеет одинаковый смысл как для турбодвигателя, так и для атмосферного.



Предположим, что Вы не имеете турбонагнетателя вовсе. Тогда у Вас имеется минимальная задержка, за которой не следует вообще никакой наддув. В таком случае можно говорить, что задержка продолжалась бы от той секунды, в которую Вы открыли дроссельную заслонку, до самой отсечки по оборотам. Смешно! Ситуация сводится к следующему – либо имеется некоторая задержка и огромное увеличение момента или напротив – отсутствие задержки и отсутствие увеличения момента.

Задержка уменьшается с увеличением частоты оборотов двигателя. В то время как задержка может иметь длительность в секунду или более при низких оборотах двигателя, при увеличении наддува, на оборотах приблизительно 4000 или больше задержка фактически исчезает. Например, в должным образом сконструированной системе наддува, давление наддува будет всегда следовать за положением вашей педали при оборотах более чем 4000 оборотов в минуту. Реакция здесь фактически мгновенна.

Рис. 1-10. Сопоставление величин задержки малой, средней, и большой турбин



**\*\* ПРАВИЛО:** Если Вы не имеете никакой задержки, Вы не имеете никакого наддува. Поэтому Вы не можете ожидать никакого значительного увеличения момента.

Форма кривой момента двигателя с турбонаддувом достаточно сильно отличается от таковой у атмосферного двигателя. На двигателях с турбонаддувом максимум момента фактически всегда находится на более низких оборотах. Сопоставьте характеристики всех известных двигателей и придёте именно к такому выводу. Чем больше форсирован атмосферный двигатель, тем больше его отличие от двигателя с турбонаддувом. Как результат для водителя это означает, что он или она не должен сильно раскручивать мотор с турбонаддувом, чтобы двигаться быстрее. Это логическое заключение идёт совершенно вразрез с популярным мнением, но факт налицо.

Горячий и холодный запуск часто представляют как проблемы высокофорсированных двигателей. До некоторой степени это справедливо в системах турбонаддува с карбюраторами, но такие системы немногочисленны. Системы впрыска топлива зависят исключительно от различных показаний температурных датчиков для холодного и горячего запуска и являются полностью автоматическими. Запуск из холодного состояния – проблема для двигателей с более низкими степенями сжатия. Если двигатель имеет проблемы в этом отношении без турбонагнетателя, он будет, вероятно, иметь те же самые проблемы с турбонагнетателем, так как нагнетатель не влияет ни на эти температуры ни на электронику. В любом случае, эта трудность не связана с турбонаддувом.

### Просто езда.

Турбонагнетатель находится на заднем плане на всех режимах езды кроме тех, на которых необходимо иметь давление наддува, чтобы достичь особенной скорости. Предположим, что данное транспортное средство может достичь максимальной скорости, скажем, в 200 км/ч без турбонагнетателя. Теперь прибавим турбонагнетатель. Разумно говорить, что транспортное средство достигнет приблизительно 200 км/ч без потребности в дополнительной мощности; следовательно, для этого не требуется никакого давления наддува. Для всех практических целей, даже для самых диких и невообразимых скоростей, вряд ли потребуется любое давление наддува, чтобы поддерживать такую скорость.

Мысль, что супермощный, с максимальной отдачей турбоавтомобиль великолепно приспособлен для движения на полной скорости, но похож на неприрученного злобного зверя на низких скоростях, не является столь уж неблагоприятной. Но слишком в неё углубляться мы не станем. Чтобы создать эффективный автомобиль с приличным турбонагнетателем, Вам необходимо только проделать на более продвинутом уровне всё то же, что требуется для создания турбоавтомобиля вообще: отвести большее количество теплоты, увеличить подачу топлива, увеличить октановое число и убедиться, что конструкция двигателя отвечает предъявляемым требованиям. Факторы, которые являются основой хорошего поведения на низких оборотах – консервативные профили распредвалов, малые впускные каналы, и калибровка топливной системы, неизменны и для более высоких давлений наддува.

Совершенно неразумно говорить, что 500-сильный уличный турбоавтомобиль, который при полном открытии дросселя на второй передаче может оставить на асфальте следы от колес, имеет проблемы с эластичностью.

### Итоги главы

*Какую мощность можно ожидать от двигателя с турбонаддувом?*

При использовании имеющегося в настоящее время топлива, наддув от 7 до 12 пси - практический верхний предел для стоковых двигателей (на уровне моря). Промежуточное охлаждение позволяет достичь этого потолка, когда оно продумано и должным образом выполнено. Конечно, не все турбокиты реализуют вышеупомянутый потенциал,

это связано с различиями технических решений в этих изделиях. Специальная подготовка двигателей для турбонаддува часто обеспечивает возможность давления наддува от 15 до 20 пси. При таком разбросе перспективных параметров требование точно вычислить или оценить значение мощности двигателя с турбонаддувом выглядит несколько сомнительно.

Самый низкий выход мощности, который был достигнут в ходе испытаний на динамическом стенде для поршневых двигателей с разнообразными системами турбонаддува - 0,00317 л.с./куб. см. на пси, а самый высокий - 0,0047 л.с./куб. см. на пси. Расхождение это вызвано разницей в исходных конструкциях двигателей. Чтобы приблизительно оценить выходную мощность вашего собственного двигателя, возьмите за основу предполагаемый удельный выход мощности Вашего проекта и умножьте на каждую из двух величин – рабочий объем в кубических сантиметрах и планируемое давление наддува плюс 14.7.

Пример: двигатель 5700 куб. см. с наддувом 10 пси.

Минимальная оценка =  $0,00317 \times 5700 \times (10 + 14.7) = 446$  л.с.,

Максимальная оценка =  $0,0047 \times 5700 \times (10 + 14.7) = 661$  л.с.

*Можно ли оценить величину наддува для конкретного турбокиита?*

Это можно сделать тогда и только тогда, когда были выполнены определенные условия, в таком случае наддув может быть определен точно. Например:

- использовался коммерческий бензин с бензоколонки?
- использовались увеличители октанового числа?
- была ли детонация?
- какова была температура воздуха на впуске?
- было ли установлено то же самое давление наддува, которое получит покупатель?

*Принимая во внимание большое увеличение мощности, обеспечиваемое турбонагнетателем, возникает вопрос: каким образом предотвращается разрушение элементов двигателя?*

Для правильного ответа на этот вопрос необходим полный анализ инерционных, мощностных и тепловых нагрузок до и после установки турбонаддува. Если всё изучено должным образом, то в заключении будут получены два интересных факта:

- инерционные нагрузки в современном двигателе внутреннего сгорания настолько велики при максимальной мощности, что мощностная составляющая полной нагрузки имеет небольшое значение. Например, чтобы увеличить мощностную нагрузку на шатунный подшипник до величины инерционных нагрузок, фактическая мощность двигателя должна была бы увеличиться приблизительно на 50 %.

- тепловые нагрузки в двигателе, не разработанном первоначально для турбонагнетателя, приведут к увеличению температуры в узлах системы охлаждения при работе с наддувом, узлы и система охлаждения могут справиться с увеличением температуры в течение некоторого ограниченного времени. Это истинно для Buick, Porsche, Saab, Volvo, Nissan, и т.д. Это также относится ко всем вариантам турбокиитов. Значение этого времени зависит от многих факторов. Опыт показывает, что значение времени работы при полном наддуве находится в пределах от 20 до 25 секунд. Это эксплуатационное ограничение, не имеющее, однако, значительных последствий. Представьте для наглядности,

на какой скорости Вы будете двигаться, если будете держать полностью открытой дроссельную заслонку 325-сильной Toyota Supra в течение двадцати секунд? Ответ: очевидно, на неприлично высокой скорости.

*Когда турбонагнетатель должен начать создавать давление наддува?*

В большинстве случаев приходится идти на компромисс между низким порогом наддува и максимальной мощностью. Изменение размеров турбонагнетателя для обеспечения наддува на низких оборотах приводит к работе турбонагнетателя в очень неэффективном диапазоне расхода газов при максимальных оборотах двигателя. Наоборот, если должна быть достигнута максимальная мощность, турбонагнетатель будет обычно таким большим, что не будет создавать никакого давления до второй половины рабочего диапазона оборотов двигателя. В большинстве случаев необходим компромисс. Разумный баланс между хорошей реакцией «внизу» и большой мощностью на максимальных оборотах состоит в том, чтобы довести требуемый размер турбонагнетателя до такого, при котором он начал бы создавать давление наддува при достижении приблизительно 30 % от максимальных оборотов двигателя.

*Как турбонагнетатель влияет на эластичность двигателя?*

Эластичность двигателей с впрыском топлива останется той же самой. Эластичность карбюраторных двигателей с системой турбонаддува перед карбюратором фактически останется той же самой. Запуск карбюраторных двигателей будут слегка ухудшен. Пожалуйста заметьте, что турбонагнетатель установленный за карбюратором, будет фактически всегда ухудшать эластичность двигателя, а холодный запуск является ахиллесовой пятой таких систем.

*Увеличит ли турбонагнетатель расход топлива?*

Да. Турбонагнетатель, установленный как дополнительное устройство на двигателе с искровым зажиганием, не является устройством для экономии топлива и не может быть таковым. Для таких ожиданий отсутствует какая-либо техническая основа. Если Вы поддаетесь уговорам продавца турбонагнетателя, обещающего снизить расход топлива Вашим мотором, убедитесь, что он даёт Вам в этом письменную гарантию. При работе в режимах до достижения порога наддува турбонагнетатель – узкая часть системы. В этом случае он является причиной небольшого падения объемного КПД. Объемный КПД и экономия топлива взаимосвязаны, и если Ваш стиль вождения останется прежним, Ваш расход топлива увеличится приблизительно на 10 % в городе и на 5 % на шоссе.

*Турбонагнетатель влияет на износ двигателя и его обслуживание?*

Конечно же, турбонагнетатель влияет на износ двигателя. Вы действительно ожидаете прибавку мощности без увеличения износа? Здесь также нет никаких чудес. Если Вы водите энергично, но с некоторым уважением к технике, Вы можете ожидать приблизительно сохранения ресурса на уровне примерно 90 % от номинального срока службы двигателя без наддува.

*Будут ли неблагоприятные воздействия на коробку передач и трансмиссию?*

Вряд ли. Имейте в виду, что трансмиссия передает большее количество момента на первой передаче от штатного двигателя, чем почти любой турбонагнетатель может дать на второй передаче. Иногда сцеп-

лению приходится усердно потрудиться, что не продлевает ему жизнь. Большинство проблем со сцеплением могут возникать при переключении передач более быстром чем приемлемо. Это не главный повод для переживаний.

*Какие ощущения возникают при управлении правильно настроенным турбоавтомобилем?*

Турбонагнетатель может быть назван умножителем момента: чем больше давление наддува, тем больше момента. Эта ситуация аналогична передаточным числам. Например, третья передача с передаточным числом 1.4 передаст на 40 % больше момента на ведущие колеса, чем четвертая с передаточным числом 1.0. Давление наддува на уровне 6 пси приведёт к увеличению момента примерно на 40 % (с использованием промежуточного охладителя). Таким образом, Вы можете видеть, что наддув 6 пси позволит иметь ускорение на четвертой передаче, фактически соответствующее третьей передаче на простом автомобиле. Вообразите, как будет грести колёсами автомобиль с подходящим турбонагнетателем на второй передаче! Другое наглядное сравнение: хороший турбоавтомобиль, получивший для двигателя 10 пси наддува, будет разгоняться от 0 до 100 км/ч за две трети от изначального времени; за 6 секунд против 9 секунд, например.