1.4.5 Агрегаты наддува

Развитие двигателей внутреннего сгорания (ДВС) идет по пути повышения мощности двигателя при уменьшении его габаритов и расхода топлива. Эта тенденция особенно актуальна для двигателей, предназначенных для транспортных средств. Рост мощности при сокращении веса и габаритов двигателя позволяет увеличить полезное пространство транспортного средства, отводимое под перевозку груза или размещение пассажиров. Кроме того, уменьшение размеров двигателя при сохранении или увеличении создаваемой мощности снижает его инерционность, и сообщает транспортному средству высокие динамические свойства. Поэтому создатели автомобилей требуют все более мощных двигателей при пониженных габаритных и весовых показателях.

Из теории ДВС известно, что мощность двигателя определяется следующим выражением [7, 18]:

$$N_{\text{е}} = \text{К} \cdot \frac{\text{H}_u}{l_0} \cdot \frac{V_h}{\tau} \cdot z \cdot \frac{\eta_i}{\alpha} \cdot \eta_v \cdot \eta_{\text{м}} \cdot \rho_{\text{к}} \cdot n, \qquad 1.4.5$$

где K - константа;

H_u- низшая теплота сгорания топлива, Дж/кг;

l_0 - количество воздуха теоретически необходимое для полного совершенного сгорания топлива кг/кг;

V_h- рабочий объем цилиндра, л;

z - число цилиндров, шт;

τ – тактность двигателя (двух или четырехтактный);

α - коэффициент избытка воздуха;

η_i- индикаторный КПД;

η_v - коэффициент наполнения цилиндра;

$\eta_{\text{м}}$ - механический КПД;

$\rho_{\text{к}}$ - плотность воздуха, поступающего в цилиндр, кг/м^3;

n – число оборотов коленчатого вала, об/мин.

Анализ выражения показывает, что мощность двигателя можно увеличить за счет увеличения числа цилиндров z ДВС при сохранении их размеров, или увеличивая объема цилиндров V_h. Оба этих пути приведут к росту размеров и веса двигателя в целом.

Другой путь повышения мощности – увеличение частоты вращения коленчатого вала n. Чем больше частота вращения, тем большее число рабочих циклов совершает двигатель в единицу времени. Однако такой путь развития сопровождается ростом нагрузок на де-

тали кривошипно-шатунного механизма. Соответственно рост частоты вращения во избежание снижения надежности должен компенсироваться усилением элементов двигателя, что в свою очередь вновь приводит к увеличению веса и габаритов. Повышение быстроходности двигателя обуславливает высокую мощность трения, поскольку сила сопротивления пропорциональная квадрату частоты вращения *n*. Кроме того, обороты коленчатого вала ограничиваются скоростью движения поршня, которая не должна превышать *10…12* м/с [18].

Еще одним направлением увеличения мощности является изменение тактности – применение двухтактного двигателя. У такого двигателя рабочий цикл совершается за один оборот коленвала, что при одинаковых размерах и быстроходности позволяет совершить вдвое большую работу. Однако изменение числа тактов приводит к существенным изменениям в конструкции двигателя. Кроме того, увеличение мощности на выходном валу на практике происходит не в *2*, а в *1,5... 1,7* раза, что связано с расходом части мощности на привод нагнетателя, необходимого для запуска двигателя и продувку цилиндров.

Другое принципиальное направление повышения мощности – совершенствование рабочего процесса двигателя. Применение лучших и дорогих сортов топлив, увеличение коэффициента наполнения, механического и индикаторного КПД, изменение коэффициента избытка воздуха, модернизация каналов впуска и выпуска конечно влияют на выходную мощность. Однако при существующем уровне совершенства ДВС улучшение этих показателей способно дать прибавку мощности, не превышающую *5…10%.*

Наиболее же перспективным путем повышения мощности является увеличение плотности рабочего тела, поступающего в цилиндр $\rho_к$. Последнее позволяет существенно увеличить мощность двигателя без существенного изменения габаритов и массы, при сохранении инерционных нагрузок и тактности. В результате увеличивается заряд цилиндра окислителем, что позволяет пропорционально увеличить количество топлива, сжигаемого в цилиндре. А это в свою очередь дает большую теплоту, которая в дальнейшем преобразуется в механическую работу [7, 18].

Кроме мощности пропорционально росту давления на входе в цилиндры растет и крутящий момент на выходном валу:

$$\mathrm{M}_{\text{кр}} = p_{ср} V_h, \qquad 1.4.6$$

где $p_{ср}$ - среднее давление цикла.

Хотя у современных атмосферных двигателей величина удельного крутящего момента может быть более *100 Н·м/л,* двигатели с наддувом даже при умеренных параметрах

рабочего цикла превосходят эту величину более, чем на *50%* [18].

Изначально наддув задумывался как способ повышения мощности ДВС, однако, со временем он стал применяться для улучшения экологических характеристик и снижения расхода топлива. В настоящее время более *90%* дизельных и 6% бензиновых двигателей оснащается агрегатами наддува. Практически все современные двигатели для мощной техники (локомотивов, грузовиков, военной, строительной и дорожной техники) имеют системы наддува [18].

Двигатель с наддувом представляет собой *комбинированный двигатель внутреннего сгорания*. Под этим понимается комбинация поршневого ДВС, лопаточных и поршневых машин сжатия, расширения и теплообменников. Термодинамически в таком двигателе единое рабочее тело совершает соответствующий единый рабочий цикл. В комбинированном двигателе тепло, полученное от сгорания соответствующего топлива (или топлив), преобразуется в механическую работу. Полезная механическая работа может в общем случае сниматься с коленчатого вала поршневой машины, с вала газовой турбины или с обоих валов. Компрессор с приводом турбиной называют *турбонаддувом* (в иностранной литературе обозначается термином *Turbocharge*), а компрессор с приводом от коленвала – *механическим наддувом* (*Supercharge*).

Конструктивно двигатель с наддувом отличается от атмосферного наличием устройства сжатия. Для этого применяются компрессоры всех известных типов. В настоящее время наиболее распространенным является наддув посредством ЦБК с приводом от газовой турбины или коленчатого вала двигателя (поскольку их рабочее процессу хорошо согласуются).

Основная идея турбонаддува заключается в использовании для привода компрессора энергии турбины, в которой происходит расширение выходящих из цилиндра выхлопных газов до давления близкого к атмосферному. Эта энергия является «дармовой» - обычно энергия выхлопных газов просто выбрасывается и рассеивается в атмосфере без всякой пользы.

Наиболее распространенной является схема одноступенчатого турбонаддува. Она выглядит следующим образом (рисунок 1.4.23). Атмосферный воздух, пройдя воздушный фильтр, попадет в компрессор, находящийся в составе одного агрегата с турбиной и связанный с ней валом. Агрегат, состоящий из компрессора и турбины, установленных в общем корпусе, называется турбокомпресром (ТКР) и содержит также подшипники ротора и системы подвода и отвода масла. Сжатый воздух проходит через теплообменник, где охлаждается набегающим потоком или с помощью охлаждающей жидкости. Теплообменник не является обязательной деталью ДВС с турбонаддувом, но достаточно часто уста-

навливается для снижения температуры наддувающего воздуха, что увеличивает плотность окислителя на входе в цилиндры. Затем сжатое рабочее тело попадает в двигатель. Отработанные газы из цилиндра подводятся к турбине, где расширяются, совершая работу, которая расходуется на вращение компрессора [18].

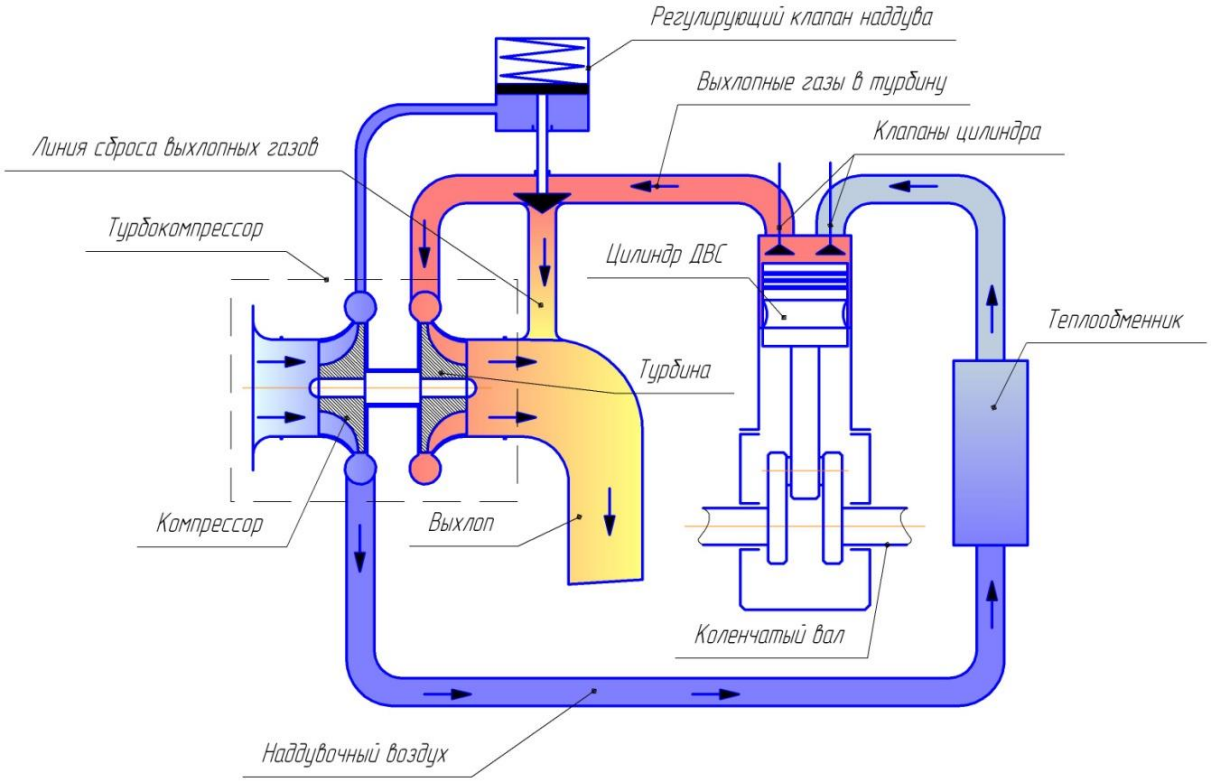

Рисунок 1.4.23 - Принципиальная схема организации турбонаддува [7]

Давление за компрессом может достигать значений недопустимых с точки зрения нагружения элементов двигателя, условия детонационного горения топлива или других соображений. Поэтому оно ограничивается. При превышении установленного значения срабатывает клапан, перепускающий выхлопные газы или их часть мимо турбины. В результате мощность турбины и частота вращения турбокомпрессора снижается, что приводит к уменьшению степени повышения давления в компрессоре. Описанная система регулирования не является единственной. Существует множество других вариантов ограничения предельного давления за компрессором.

Схема турбонаддува, описанная выше, может считаться классической. Она обеспечивает малый уровень механических потерь и может быть просто реализована на существующем ДВС.

На первый взгляд турбокомпрессор является довольно простым устройством. Однако, для сокращения его размеров, с целью уменьшения массы и инерционности, частота вращения ротора ТКР все время увеличивается (в настоящее время она достигает

80000…120000 об/мин). Кроме того, температура выхлопных газов достигает *750℃*[18]. Эти факты приводят к тому, что создание турбокомпрессора является сложной научно-технической задачей. Для ее решения производители прибегают к самым современным материалам и технологиям. Внешний вид типичного турбокомпрессора показан на рисунке 1.4.24.

В качестве привода компрессора могут использоваться как центростремительные (рисунок 1.4.24), так и осевые турбины (рисунок 1.4.25). Большинство ДВС грузовых и легковых автомобилей имеют небольшие секундные расходы рабочего тела, поэтому в них предпочтительнее применять радиальные турбины. Обычно такие турбины применяются при мощности агрегата наддува *N=30···700кВт*. Мощные стационарные, локомотивные и судовые дизели имеют значительно больший расход рабочего тела и в них чаще применяются осевые турбины (рисунок 1.4.25). Они используются при мощности агрегата наддува *N=250···2500кВт*. Наличие осевой турбины позволяет практически безошибочно говорить, что турбокомпрессор принадлежит ДВС большой мощностью [7, 18].

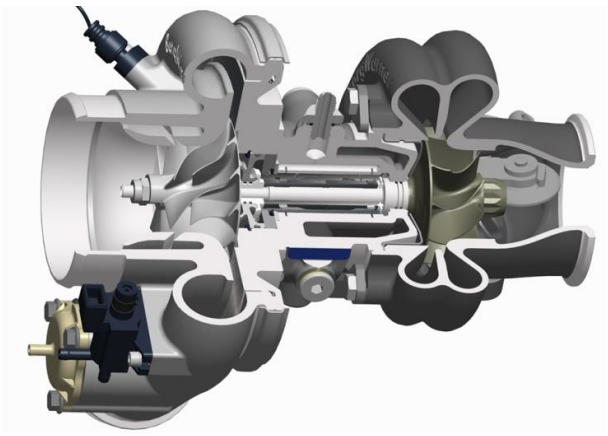

Рисунок 1.4.24 – Внешний вид типичного турбокомпрессора с радиальной турбиной [8]

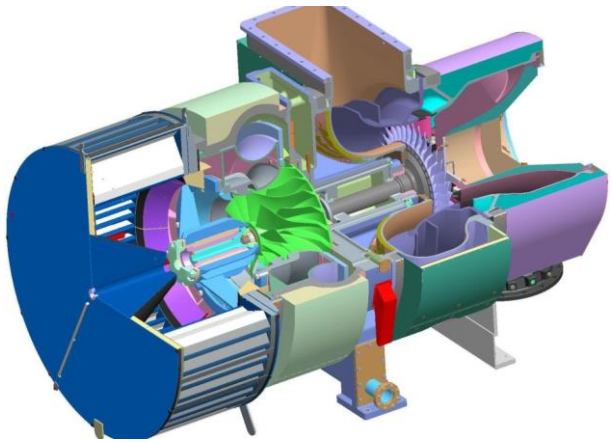

Рисунок 1.4.25 - Турбокомпрессор ABB с осевой турбиной [8]

Увеличение заряда цилиндра, получаемое при использовании наддува, существенно повышает литровую мощность двигателя. В настоящее время литровая мощность двигателя с наддувом достигла величины *110...120* л.с./л (рисунок 1.4.26).

Положительный эффект от повышения литровой мощности может быть реализован по разному. Во-первых, повышение литровой мощности позволяет существенно увеличить мощность двигателя при практически неизменных габаритах и весе силовой установки (рост не превышает *5…10%*, и связан с установкой надувающего агрегата [18]). Данный факт ценен в случаях, когда требуется повысить мощность силовой установки, лишь незначительно меняя конструкцию самого двигателя. В настоящий момент существуют примеры, когда внедрение наддува позволило увеличить мощность в *4* раза, при практически

одних и тех же габаритах и массе.

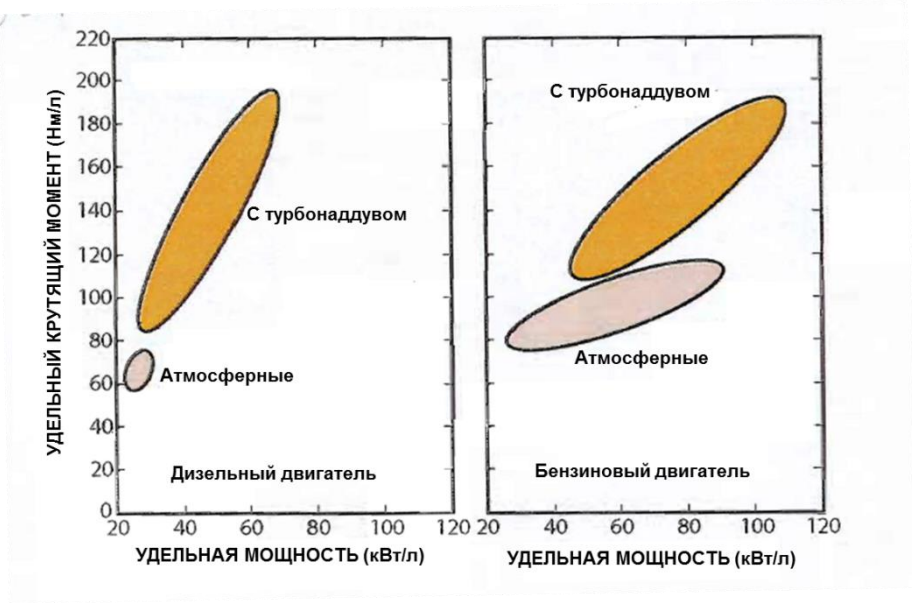

Рисунок 1.4.26 – Влияние турбонаддува на удельные параметры ДВС [9]

Во-вторых, рост литровой мощности позволяет получить двигатель заданной мощности со значительно меньшими размерами и массой. Двигатель с объемом *1,5* литра и наддувом до *1 кг/см*^{2} эквивалентен по мощности трехлитровому двигателю [7]. Более компактные двигатели имеют меньшие насосные потери и потери трения [5]. В качестве иллюстрации на рисунке 1.4.27 приведено сравнение двух дизелей одинаковой мощности.

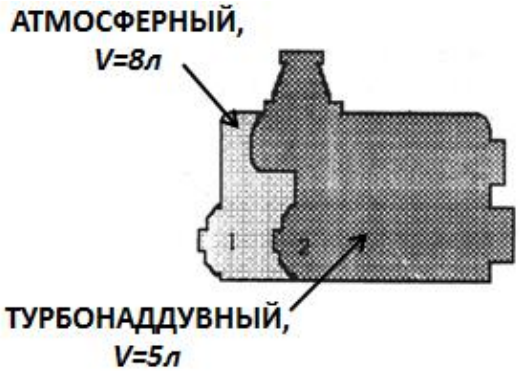

Рисунок 1.4.27 - Сравнение размеров дизелей одинаковой мощности

Сокращение размеров ДВС позволяет сэкономить пространство в помещениях судна, локомотива, электростанции, подкапотном пространстве автомобиля и т.п. Кроме того, существенное изменение размеров двигателя приводит к снижению его стоимости. Цена двигателя с наддувом ниже, чем цена на двигатель без наддува той же мощности.

Применение турбонаддува повышает эффективность работы двигателя, что выражается в снижении удельного эффективного расхода топлива. Основными причинами повы-

шения экономичности дизеля с наддувом являются следующие [18]:

а) выбор оптимальной степени повышения давления;

б) увеличение коэффициента наполнения цилиндра η_v;

в) более совершенное сгорание топлива (большая полнота сгорания η_z), благодаря повышенному коэффициенту избытка воздуха α;

г) большая доля топлива сгорает при постоянном объеме;

д) зарядка цилиндра происходит воздухом повышенного давления, благодаря чему появляется дополнительная положительная работа, причем, энергия на предварительное сжатие воздуха отбирается не от двигателя, а от отработанных выхлопных газов.

Это в первую очередь относится к двигателям с турбонаддувом на режимах близким к максимальным. Рост эффективности превышает *7%*. В качестве иллюстрации на рисунке 1.4.28 приведены нагрузочные характеристики по удельному расходу топлива дизелей с наддувом и без.

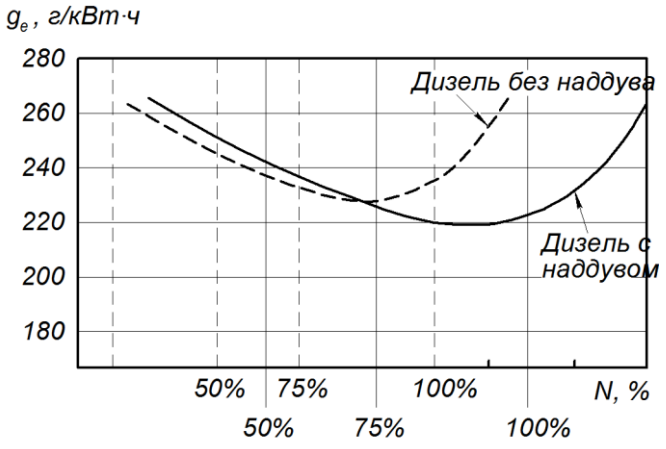

Рисунок 1.4.28 - Сравнение нагрузочных характеристик по удельному расходу топлива дизелей с наддувом и без [18]

Оснащение ДВС агрегатом наддува положительно сказывается на экологических характеристиках. Во-первых, установка турбины существенно снижает шум выхлопа. Во-вторых, уменьшается дымность и токсичность выхлопных газов. Это связано с тем, что поток за компрессором обладает повышенной турбулентностью, что приводит к лучшему перемешиванию топлива с окислителем. Последнее позволяет организовать процесс горения при повышенном значении коэффициента избытка воздуха α (бедной смеси). Повышению интенсивности смешения топлива с окислителем способствует также размещение карбюратора перед компрессом у бензиновых двигателей. В результате топливо выгорает полнее, а количество несгоревшего топлива уменьшается. Это и снижает концентрацию вредных веществ в выхлопе.

Ресурс ДВС с наддувом превышает моторесурс аналогичного безнаддувного двигателя. Это связано со следующими факторами [18]:

- период задержки воспламенения в наддувном двигателе, как правило, уменьшается, так как впрыск топлива происходит в среду с повышенной температурой. В результате снижается фактор динамичности цикла, сгорание становится более мягким, пропадают характерные для дизеля ударные нагрузки;
- повышенный коэффициент избытка воздуха α позволяет лучше охлаждать камеру сгорания. Благодаря повышенному коэффициенту избытка воздуха, выхлопные газы имеют более низкую температуру, не перегружают термическими нагрузками выпускной клапан. Благодаря наддуву среднее эффективное давление дизеля становится выше, но максимальное давление не возрастает в такой же степени, т.е. не возрастают нагрузки на подшипники и другие детали, что повышает срок их службы;
- использование выхлопных газов в турбине снижает их температуру, уменьшая теплонапряженность выхлопных коллекторов, улучшаются условия работы каталитического нейтрализатора.

При всех указанных достоинствах применение наддува обладает и рядом недостатков. Они зависят в первую очередь от применяемой схемы наддува, принципа его организации и конструктивного исполнения.

Главным недостатком механического наддува является то, что работа, необходимая для привода компрессора, отбирается от коленчатого вала, заметно сокращая полезную работу на выходном валу. Потеря мощности тем больше, чем больше степень сжатия. Доля мощности, идущая на привод компрессора, может превышать *15%* мощности двигателя [18].

Двигатель с турбонаддувом способен дать существенное повышение мощности и крутящего момента на режимах близких к максимальным, но на низких режимах может проигрывать по данным показателям атмосферному двигателю (рисунок 1.4.28). С увеличением степени наддува, мощность двигателя на пониженных режимах снижется значительнее. Это связано с тем, что на пониженных режимах энергии выхлопных газов недостаточно для достижения требуемой степени сжатия.

Турбина, установленная в выхлопном коллекторе, создает сопротивление выходящим отработавшими газам. Это нагружает поршни двигателя, поэтому он должен совершать повышенную работу выталкивания, что приводит к увеличению нагрузок на кривошипно-шатунный механизм и создает дополнительные потери.

У дизелей из-за высокого уровня степени сжатия высокий наддув приводит к чрезмерно высоким давлениям в цилиндре, т.е. высоким механическим нагрузкам. Для сниже-

ния этих нагрузок приходится снижать степень сжатия. При этом возникает проблема запуска дизеля и работы на малых нагрузках. При пуске, когда давление воздуха на входе в цилиндр равно атмосферному, низкая степень сжатия не обеспечивает получения достаточных для самовоспламенения топлива температур [18].

При изменении режима работы двигатель с турбонаддувом обладает худшей приемистостью (временем перехода с одного стационарного режима на другой) по сравнению с атмосферными двигателями и двигателями с механическими компрессорами. Это является следствием отсутствия прямой связи компрессора и поршневого двигателя. В результате разгон ротора турбокомпрессора происходит медленнее, чем разгон коленчатого вала. Это приводит к отставанию процесса снабжения цилиндров воздухом, из-за чего снижаются эксплуатационные, экономические и мощностные показатели.

Малая степень сжатия на пониженных режимах работы, худшие пусковые характеристики и высокая инерционность являются основными проблемами турбонаддува и многие модификации классической схемы направлены на повышение приемистости. Поэтому основная тенденция развития систем наддува направлена на их устранение [7, 18].

Анализируя современные турбокомпрессоры агрегатов наддува легко заметить основные тенденции их развития, диктуемые необходимостью минимизации указанных недостатков [18]:

- уменьшение размеров турбокомпрессора и снижение его инерционности за счет этого;
- применение двухступенчатого наддува (рисунок 1.4.29);
- использование регулирующих элементов в турбине (рисунок 1.4.30 и 1.4.31);
- использование дополнительной камеры сгорания (рисунок 1.4.32);
- применение электрической подкрутки ротора.

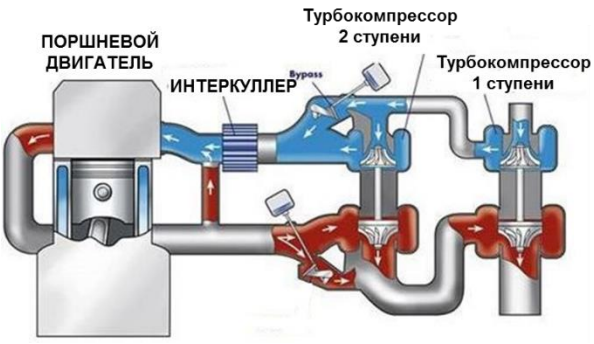

Рисунок 1.4.29 – Схема двухступенчатый наддув

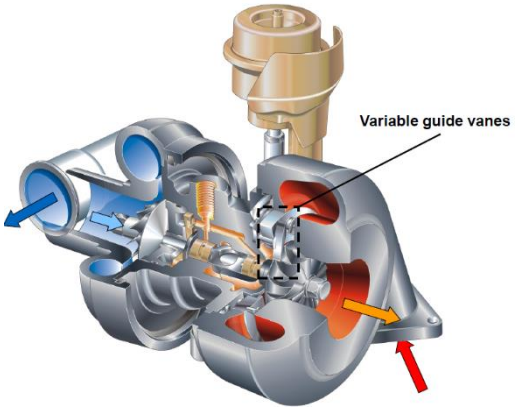

Рисунок 1.4.30 – Турбокомпрессор с регулируемыми лопатками турбины

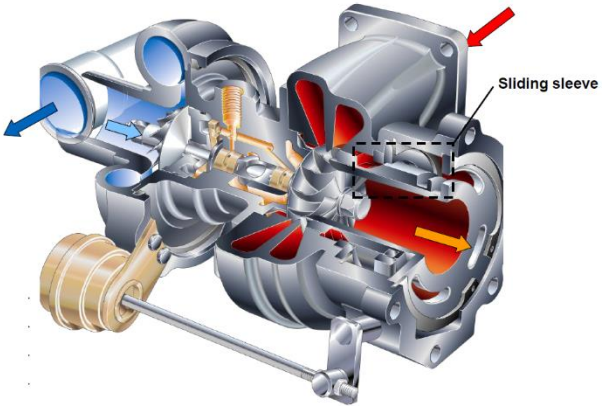

Рисунок 1.4.31 – Турбокомпрессор с турбиной регулируемой подвижной втулкой

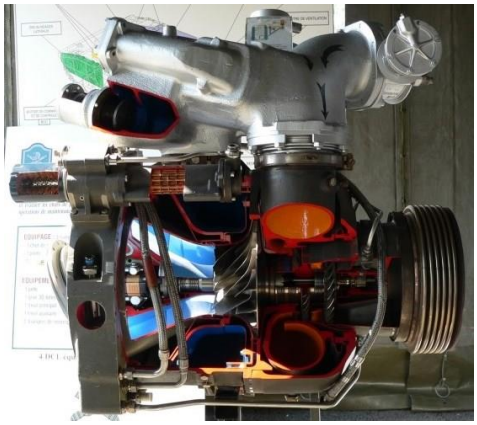

Рисунок 1.4.32 – Турбокомпрессор с камерой сгорания системы «Гипербар»