

Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко

**ФОРСИРОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЕЙ
ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ
НАДДУВОМ**

**Москва
Легион-Автодата
2007**

УДК 621.43.052-82-03.30

Патрахальцев Н.Н., Савастенко А.А.

Форсирование двигателей внутреннего сгорания наддувом:
- М.: Легион-Автодата, 2007. - 176 с.: ил.

ISBN 5-1188850-164-6

**Рецензенты: докт. техн. наук, проф. Н. А. Иващенко,
канд. техн. наук Е. Г. Пономарёв.**

Пособие предназначено для студентов, обучающихся по направлению “Энергомашиностроение” специализации “Двигатели внутреннего сгорания”. Пособие может быть также полезно инженерно – техническим работникам, владельцам автомобилей и всем интересующимся проблемой наддува ДВС.

В пособии изложены основные положения форсирования двигателей внутреннего сгорания путём использования различных систем наддува. Рассмотрены основные схемы комбинированных ДВС, основные схемы применяемых для наддува компрессоров. Проанализированы мероприятия, проводимые при модернизации двигателей оснащением их разными системами наддува, проводится анализ систем наддува как дизелей, так и бензиновых двигателей, рассматривается влияние системы наддува на тяговые характеристики двигателей.

© Н.Н. Патрахальцев, А.А. Савастенко

© ЗАО “Легион - Автодата” 2003, 2007

ISBN 5-1188850-164-6

Подписано в печать 19.04.2007.
Формат 60x90 1/16. Печатных листов 11.
Бумага офсетная. Печать офсетная.

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
1. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	8
1.1. Введение в проблему наддува ДВС	8
1.2. Двигатели со всасыванием из атмосферы и двигатели с наддувом	9
1.3. Наддув дизелей и двигателей с внешним смесеобразованием и принудительным зажиганием	10
1.4. Методы организации наддува.....	11
1.5. Турбонагнетатели	13
1.6. Модификации двигателей при применении наддува.....	14
1.7. Достоинства и недостатки применения наддува	18
1.8. Краткая историческая справка	21
2. КОМПРЕССОРЫ	25
2.1. Основные типы компрессоров для наддува ДВС..	25
2.2. Поршневые компрессоры (компрессоры с возвратно – поступательным движением рабочего органа)	26
2.3. Области применения поршневых компрессоров	29
2.4. Объёмные компрессоры	33
2.4.1. Пластинчатые компрессоры	34
2.4.2. Лопастные компрессоры	35
2.4.3. Характеристики объёмных компрессоров, их достоинства и недостатки	39
2.5. Винтовые объёмные компрессоры типа Элиот Лисхольм ...	41
2.6. Компрессор объёмного типа с кольцевым поршнем	43
2.7. Области применения объёмных компрессоров	44
2.8. Центробежные (лопаточные) компрессоры	46
2.9. Преимущества и недостатки лопаточных компрессоров	48
2.10. Компрессоры – обменники давлением	50
2.11. Устройство и работа системы “Комплекс”	51
2.12. Характеристики компрессоров “Комплекс”	55
2.13. Достоинства и недостатки системы “Комплекс”	56

3. ТУРБОКОМПРЕССОРЫ	58
3.1. Основные положения	58
3.2. Особенности конструкции роторов	61
3.3. Расположение подшипников.....	64
3.4. Уравновешивание осевых усилий	67
3.5. Основные схемы газотурбинного наддува	67
3.6. Регулирование турбокомпрессоров с помощью клапанов перепуска газов или воздуха	73
3.7. Расходная характеристика двигателя	79
4. ОСНОВНЫЕ МОДИФИКАЦИИ КОНСТРУКЦИИ БЕЗНАДДУВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ МОДЕРНИЗАЦИИ ЕГО НАДДУВОМ	81
4.1. Общие положения	81
4.2. Компрессия в цилиндре	82
4.3. Степень сжатия	84
4.4. Модификации поршней	85
4.5. Камера сгорания	88
4.6. Клапаны	90
4.7. Цилиндр и блок цилиндров	92
4.8. Изменения фаз газораспределения	93
4.9. Процессы топливоподачи	95
4.10. Охлаждение двигателя	98
4.11. Охлаждение поршней	100
4.12. Смазывание деталей и фильтрация масла.....	106
5. СИСТЕМЫ ПУСКА, ВПУСКНЫЕ И ВЫПУСКНЫЕ КОЛЛЕКТОРА И ПРОМЕЖУТОЧНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ВОЗДУХА	110
5.1. Пуск двигателя с наддувом	110
5.2. Впускные и выпускные коллектора	114
5.3. Выпускные коллектора	115
5.3.1. Постоянное давление газов перед турбиной.....	115
5.3.2. Система импульсного наддува.....	117
5.3.3. Преимущества и недостатки систем импульсного наддува и наддува при постоянном давлении.....	125
5.3.4. Применение преобразователей импульсов	126
5.3.5. Компенсаторы расширений коллекторов	129
5.4. Охлаждение наддувочного воздуха	130
5.4.1. Основные положения	130
5.4.2. Теплообменники и системы охлаждения наддувочного воздуха	131

6. НАДДУВ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ЗАЖИГАНИЕМ.....	136
6.1. Историческая справка	136
6.2. Регулирование двигателей с турбонаддувом	139
6.2.1. Регулирование угла опережения зажигания.....	141
6.2.2. Регулирование давления наддува.....	141
6.2.3. Регулирование угла опережения зажигания и давления наддува.....	143
6.3. Регулирование газодинамического наддува	147
7. СПЕЦИАЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ НАДДУВА	150
7.1. Характеристики желательного протекания крутящего момента.....	150
7.2. Наддув двухтактных ДВС	152
7.3. Применение дополнительного приводного компрессора ...	155
7.4. Комбинированный двигатель с дифференциальным наддувом	156
7.5. Системы наддува “Максидайн” и “Гипербар”	158
7.6. Двухступенчатый наддув.....	162
7.7. Динамический наддув	166
Список литературы	168

3.3. Расположение подшипников

Различают внешнее и внутреннее расположение подшипников. На рис. 3.6. показано внутреннее расположение подшипников (колесо компрессора размещено консольно с одной стороны вала, а колесо турбины также консольно, но с другой стороны вала), а на рис. 3.7. – внешнее.

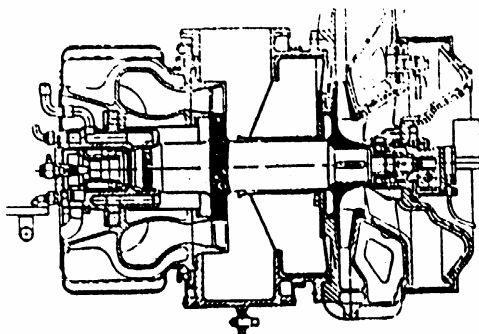


Рис. 3.7. Общий вид турбокомпрессора с внешним расположением подшипников.

Имеются также особые конструктивные схемы, когда одна опора расположена снаружи, а другая – изнутри, т. е. между колёсами компрессора и турбины.

Имеются схемы с моноротором, т. е. когда ротор размещён в двух подшипниках, а колёса и турбины, и компрессора размещены совместно консольно с одной стороны вала на опорах. Преимущества внешнего расположения подшипников следующие: хороший доступ к ним (удобство обслуживания подшипников, удобство замены при малом объёме монтажно – демонтажных работ), меньшие диаметры цапф подшипников, чем при внутреннем расположении, меньший подвод тепла к подшипнику, расположенному у турбины, т. к. его можно удалить от диска. Правда, в этом случае требуется охлаждение водой входного устройства компрессора (рис. 3.8).

Расположение опор по концам вала имеет следующие недостатки: большие габаритные размеры; более толстый и тяжёлый вал, т. к. из-за повышенной длины он должен иметь повышенную изгибную жёсткость; худшая соосность подшипников, т. к. подшипники размещаются в отдельных частях корпусных деталей, которые между собой должны очень строго фиксироваться, а также потому, что из-за повышенной длины более ощутимыми становятся термические искривления вала; подвод воздуха к компрессору и газа к турбине происходят не так свободно, как при внутреннем расположении опор; худший доступ к узлам с лопатками.

Схема взаимодействия между поршнем и клапаном приведена на рис. 4.6. Видно, что по мере приближения поршня к ВМТ в процессе выпуска, расстояние между его верхней плоскостью и дном крышки цилиндра уменьшается, и поршень приближается к тарелке клапана даже при его закрытом положении. За 5° до ВМТ клапан начинает открываться (опускаться по приведённой схеме), и в точке 1, за $3,5^\circ$ до ВМТ, возможно столкновение тарелки клапана с поршнем.

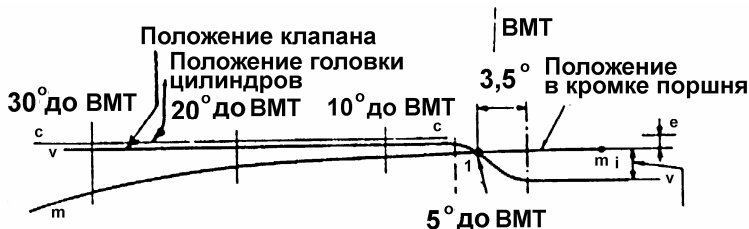


Рис. 4.6. Схема взаимодействия между поршнем и клапанами.
1 – точка начала взаимодействия.

Это происходит несмотря на наличие повышенного зазора “е” между крышкой цилиндра и дном поршня (для снижения ε). Следовательно на участке 1 – m и далее полость в поршне размером i должна обеспечивать отсутствие удара поршня о клапан.

4.6. Клапаны.

Очевидно, что для заполнения цилиндра повышенным зарядом воздуха необходимо (при сохранении эффективности наполнения) повысить размеры проходных сечений клапанов, их время – сечения. Это необходимое увеличение зависит от величины наддува двигателя. Пусть двигатель без наддува имел проходное сечение впускного клапана порядка $12,6 \text{ см}^2$, т. е. при давлении на впуске 1 бар обеспечивалось эффективное наполнение цилиндра. Определим, какое проходное сечение должен иметь впускной клапан двигателя, если он форсируется наддувом в 2 бара. Необходимое проходное сечение клапана в этом случае должно быть увеличено пропорционально корню квадратному из относительного увеличения давления на впуске.

Однако этого количества воздуха может быть недостаточно для достижения мощности, которую надо получить при наддуве. Например, исходная мощность была равна 162 кВт, а после наддува должна быть равна 260 кВт. Тогда увеличение мощности составляет $260/162 = 1,6$. Следовательно, в 1,6 раза необходимо увеличить расход воздуха. А повышенное давление воздуха обеспечило увеличение расхода воздуха лишь в 1,41 раза. Увеличим диаметр клапана на 10%, т. е. сделаем клапан вместо диаметра 40 мм равным 44 мм. Тогда проходное

Некоторые фирмы – производители двигателей с наддувом идут на сохранение повышенной степени сжатия, т. е. на повышение механических нагрузок на детали ЦПГ, с целью решения проблемы пуска. Очевидно, что применимость этого метода ограничена как уровнем применяемого наддува, так и запасом прочности двигателя, его надёжностью и долговечностью.

5.2. Впускные и выпускные коллекторы

Решая задачу форсирования двигателя наддувом, т. е. установки на двигатель турбокомпрессора, необходимо изменить конструкцию впускных и выпускных коллекторов со всеми их соединениями, которые требуются для связи с ТК. Прежде всего необходимо разместить дополнительные коллектора, связывающие газовую турбину ТК с выпуском ОГ, а компрессор – со всасыванием воздуха. При этом все трубопроводы должны быть максимально короткими, без резких изменений направления и с достаточно большими диаметрами, чтобы не увеличивать гидравлические потери в них. В то же время проходное сечение выпускного трубопровода не должно превышать проходного сечения входа в корпус турбины, чтобы не происходило потери кинетической энергии газов. Необходимо также предусмотреть возможности повышенного теплового расширения коллекторов, установить компенсаторы термических расширений, чтобы не нагружать ни головку цилиндра двигателя, ни сам ТК.

Для современного машиностроения характерна высокая специализация производства. ТК представляет собой агрегат, предъявляющий высокие требования к уровню производства (ротор, его балансировка, подшипниковые узлы, уплотнения). Такое производство может быть рентабельным только при достаточной массовости. Поэтому ТК чаще всего выпускаются специализированными фирмами. Фирмы выпускают ряды ТК, построенные по принципу возможности осуществления наддува любого существующего или вновь создаваемого двигателя в определённом диапазоне мощностей. В России выпускаются два типа унифицированных ТК: 1) компактные ТК для наддува быстроходных дизелей с внутренним расположением подшипников и радиальной центростремительной турбиной (ТКР-7, ТКР-8,5, ТКР-11, ТКР-14 и ТКР-23); 2) ТК для наддува средних и тяжёлых дизелей больших ресурсов в основном с внешним расположением подшипников и осевой турбиной (ТК-18, ТК-23, ТК-30, ТК-38, ТК-50 и ТК-64).

При размещении трубопроводов необходимо учесть размеры самих турбокомпрессоров. Эти размеры обычно даются в каталогах.

6. НАДДУВ ДВИГАТЕЛЕЙ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ЗАЖИГАНИЕМ

6.1. Историческая справка

В 1885 г. Готтлиб Даймлер предложил и реализовал на своих двигателях с принудительным зажиганием идею наддува. В соответствии с его патентом, наддув осуществлялся с использованием принципа кривошипно – камерной продувки, когда сжимаемый в картере воздух поступал в цилиндр через клапан в головке поршня после завершения нормального всасывания. Наддув применялся им для компенсации низкого наполнения цилиндра свежим зарядом при повышении частоты вращения вала. Даймлер стремился повысить частоту вращения от 150-160 об/мин, которая существовала тогда для стационарных газовых ДВС, до 500 – 800 об/мин, что было необходимо для применения ДВС на автомобиле. Предполагается, что увеличение мощности в этом случае было невелико, а сложности с размещением клапана в поршне значительны. В связи с этим, после создания двух десятков таких двигателей, Даймлер прекратил заниматься наддувом и вернулся к нему лишь после первой мировой войны после успешного применения наддува в авиационных двигателях. Опыт механического наддува был перенесён на двигатели гоночных и спортивных автомобилей. В этот период для целей механического наддува широко применяется нагнетатель типа "Рут". Компрессор применялся лишь кратковременно на высоких скоростях движения автомобиля и при подъёмах лишь при полных частотах вращения вала.

Первым авиационным двигателем с наддувом (механическим) считается двухтактный ротативный двигатель Мюррея – Вильята, в котором ещё в 1910 г. благодаря наддуву при подъёме на высоту до 5200 м над уровнем моря сохранялись условия наполнения, зарядки и продувки цилиндра, соответствовавшие условиям работы на уровне моря. Т. е. практически на любой высоте в указанных пределах сохранялась мощность двигателя, соответствовавшая нормальным условиям. Практическое применение механический наддув авиационных двигателей с принудительным зажиганием нашёл к концу первой мировой войны.

Газотурбинный наддув таких двигателей начал испытывать в 1917 г. Рато. Однако технические сложности отодвинули практическое применение этого метода наддува до 1939 г, когда был испытан первый авиационный двухтактный двигатель с газотурбинным наддувом и принудительным зажиганием.

На сегодняшний день в отличие от авиационных двигателей с принудительным зажиганием, где высокого совершенства достигли как механический, так и газотурбинный наддувы, применение наддува в автомобильных двигателях ограничено. Развитие наддува у авиационных

7.3. Применение дополнительного приводного компрессора

Для повышение приёмистости и приспособляемости двигателя иногда применяется дополнительный компрессор с механическим приводом от коленчатого вала. Он включается в работу только в периоды, когда требуется получение повышенного крутящего момента (очевидно, что при этом регулятор должен выполнять функции управления топливopодачей в соответствии с количеством подаваемого воздуха). На рис. 7.5 заштрихованная область показывает, что достигается применением дополнительного компрессора.

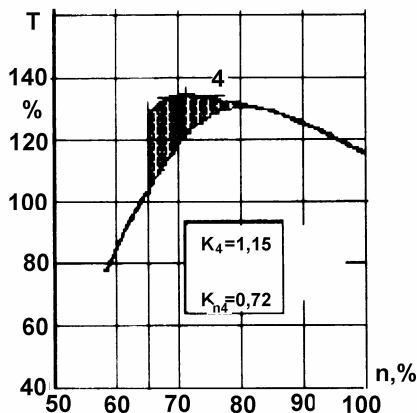
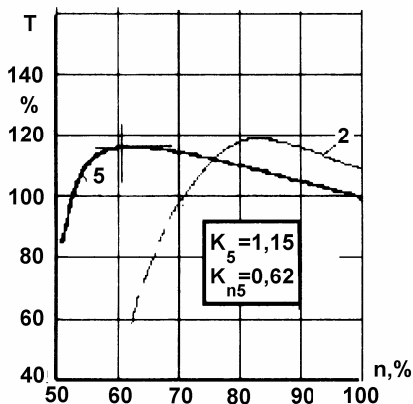


Рис. 7.5. Корректирование скоростной характеристики дизеля с наддувом применением дополнительного, причём, приводного, нагнетателя.

В данном случае диапазон его работы по частоте вращения вала дизеля – от 80 до 65% от номинальной частоты вращения.

Рассмотренная ранее система наддува типа “Комплекс”, конечно, не обеспечивает получения высокой степени повышения давления, т. е. не позволяет значительно форсировать двигатель. Зато она позволяет расширить диапазон скоростных режимов, где наддув достаточно эффективен, улучшить приспособляемость двигателя как по моменту, так и по частоте.



Преимущества системы наддува “Комплекс” демонстрируются далее сопоставлением характеристик автомобильного дизеля с турбонаддувом и наддувом “Комплекс” легкового автомобиля (рис. 7.6).

Рис. 7.6. Характеристика дизеля с системой “Комплекс” (5) и сравнение её с характеристикой дизеля со свободным ГТН (2).