

А. Джодж

Автомобильные и авиационные двигатели
часть 2

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 656
ББК 39.1
А11

А11 **А. Джодж**
Автомобильные и авиационные двигатели: часть 2 / А. Джодж – М.: Книга по Требованию, 2024. – 248 с.

ISBN 978-5-458-38264-9

Автомобильные и авиационные двигатели

ISBN 978-5-458-38264-9

© Издание на русском языке, оформление
«YOYO Media», 2024
© Издание на русском языке, оцифровка,
«Книга по Требованию», 2024

Эта книга является репринтом оригинала, который мы создали специально для Вас, используя запатентованные технологии производства репринтных книг и печати по требованию.

Сначала мы отсканировали каждую страницу оригинала этой редкой книги на профессиональном оборудовании. Затем с помощью специально разработанных программ мы произвели очистку изображения от пятен, клякс, перегибов и попытались отбелить и выровнять каждую страницу книги. К сожалению, некоторые страницы нельзя вернуть в изначальное состояние, и если их было трудно читать в оригинале, то даже при цифровой реставрации их невозможно улучшить.

Разумеется, автоматизированная программная обработка репринтных книг – не самое лучшее решение для восстановления текста в его первоизданном виде, однако, наша цель – вернуть читателю точную копию книги, которой может быть несколько веков.

Поэтому мы предупреждаем о возможных погрешностях восстановленного репринтного издания. В издании могут отсутствовать одна или несколько страниц текста, могут встретиться невыводимые пятна и кляксы, надписи на полях или подчеркивания в тексте, нечитаемые фрагменты текста или загибы страниц. Покупать или не покупать подобные издания – решать Вам, мы же делаем все возможное, чтобы редкие и ценные книги, еще недавно утраченные и несправедливо забытые, вновь стали доступными для всех читателей.

НАДДУВ В ДВИГАТЕЛЯХ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ

НАДДУВ БЕНЗИНОВЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Обычно бензиновый двигатель всасывает рабочую смесь через карбюратор и впускной клапан, и развиваемая им мощность, при прочих равных условиях, зависит от начального давления и температуры смеси в начале сжатия. Ясно, что даже в самой лучшей конструкции двигателя при максимальном коэффициенте наполнения начальное давление смеси не может быть больше атмосферного давления.

Увеличение плотности или давления свежей смеси позволит увеличить количество тепловой энергии, вводимой в двигатель, и тем самым увеличить его мощность. Так как свежая смесь, предварительно сжатая компрессором, будет введена в цилиндр, то будет повышено не только начальное давление, но также и максимальное и среднее давления цикла. Далее мы покажем, что максимальная температура вспышки также увеличивается с повышением начального давления, но это увеличение невелико.

Термин нагнетание или „наддув“ может быть определен как „наполнение цилиндра количеством свежей смеси, большим того, которое двигатель мог бы засосать обычным путем“.

Агрегат, сжимающий воздух или смесь (благодаря чему увеличивается начальная плотность заряда), известен под названием нагнетателя.

Двигатель с нагнетателем для удобства можно рассматривать как нормальный, но работающий в окружающей атмосфере большей плотности.

Принципы нагнетания не новы: они были применены давно к газовым двигателям, а затем, позднее, к нефтяным двигателям, но практическое применение нагнетателей к автомобильным и авиационным двигателям развилось лишь в последние годы. Применению нагнетания в авиационных двигателях был дан толчок во время мировой войны; в настоящее же время мы имеем двигатели, в которых нагнетатель является уже неотъемлемой частью.

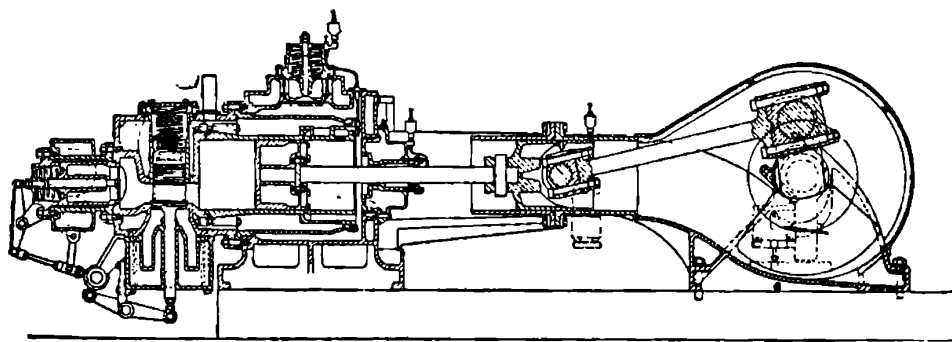
Разработкой вопросов наддува и экспериментированием с нагнетателями занимались: RAE в Англии, Рото во Франции, Бюро стандартов и „Дженерал электрик“ в Америке. Экспериментальные работы велись также в Германии и в Швейцарии, где фирмами

Сименс, Шваде и Браун и Бовери строились многоступенчатые приводные нагнетатели.

Прежде чем перейти к описанию новейших типов нагнетателей, применяемых для автомобильных и авиационных двигателей, кратко рассмотрим газовый двигатель Клерка, являющийся одним из первых двигателей, в которых было применено нагнетание.

Двигатель Клерка с пересжатием

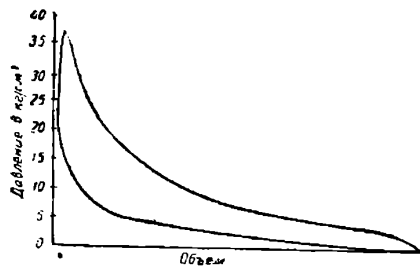
Клерк применил метод получения высокого среднего давления без увеличения температуры стенок путем введения в двигатель в конце хода всасывания добавочного заряда воздуха или инертных газов (охлажденные выхлопные газы) при давлении выше атмосферного; он получил начальное давление в цилиндре на $0,6 \text{ кг/см}^2$ выше атмосферного, увеличив таким путем вес заряда на 40%, причем увеличение давления сжатия было осуществлено без повышения средней температуры в цилиндре.



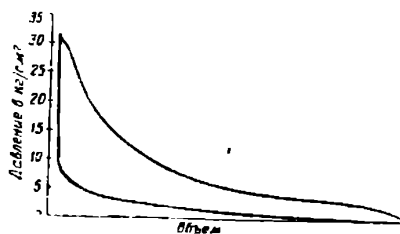
Фиг. 1. Двигатель с пересжатием (Клерка).

Результаты испытаний этого двигателя показали, что максимальная температура вспышки была понижена, но среднее давление возросло примерно на 20%.

На фиг. 1 дан разрез двигателя, в котором увеличение мощности достигалось добавочным введением воздуха в конце хода всасывания при давлении выше атмосферного. Задняя часть цилиндра в этом четырехтактном двигателе работает подобно насосу, подавая сжатый воздух в цилиндр через специальные окна.



Фиг. 2. Диаграмма двигателя с наддувом.



Фиг. 3. Диаграмма двигателя без наддува.

На фиг. 2 и 3 изображены две индикаторные диаграммы, снятые с одного из таких двигателей, диаметр и ход которого были 254 и 457 мм.

Ниже в таблице приведены результаты испытаний этого двигателя при наддуве и без него; все величины, помещенные в таблице, получены из индикаторных диаграмм, изображенных на фиг. 2 и 3.

Влияние наддува в газовом двигателе

	Давление сжатия	Максимальное давление вспышки	Среднее давление	Расход газа на индикаторную силу в час м^3	Индикаторный к. п. д. в %
Нагнетание воздухом . .	13,35	39,7	7,73	0,374	34,4
Нормальная работа без нагнетания	9,14	32,3	6,25	0,473	27,7

Теория наддува

Нагнетание выгодно лишь в том случае, если максимальная температура не выше определенного предела, обусловленного детонационными свойствами применяемой смеси. Поэтому были сделаны попытки охлаждать сжатый нагнетателем заряд прежде, чем он поступит в цилиндр, или применять для нагнетателя только сжатый холодный воздух. С понижением температуры вспышки уменьшаются: потеря тепла на непосредственную передачу его стенкам и потери вследствие увеличения теплоемкости газов. Если каким-нибудь способом удалось бы надуть двигатель без повышения температуры вспышки, то увеличение мощности произошло бы без потери в индикаторном к. п. д. Конечно, получение этой добавочной мощности возможно и путем улучшения индикаторного коэффициента.

Теплотворная способность обычного состава смеси при полном сгорании будет примерно 900 кал на 1 м^3 смеси. При такой смеси температура сгорания достигает 2500° С, если принять в расчет увеличение теплоемкости газов и диссоциацию.

Когда в цилиндр вводится добавочное количество смеси путем нагнетания, то максимальное давление и давления сжатия будут выше, но теоретически, поскольку степень сжатия остается той же самой, к. п. д. цикла не будет зависеть от степени нагнетания.

В действительности, однако, необходимо принимать в расчет температуру пламени, диссоциацию и увеличение теплоемкости газов. С увеличением температуры пламени растут тепловые потери и приближается момент детонации.

По этим причинам некоторые конструктора стремились охладить сжатую смесь перед цилиндром или применить метод воздушной продувки.

Давления наддува

Нетрудно показать, что теоретически максимальное и среднее индикаторные давления в нагнетаемом двигателе будут увеличиваться пропорционально степени нагнетания. Так, если в цилиндре

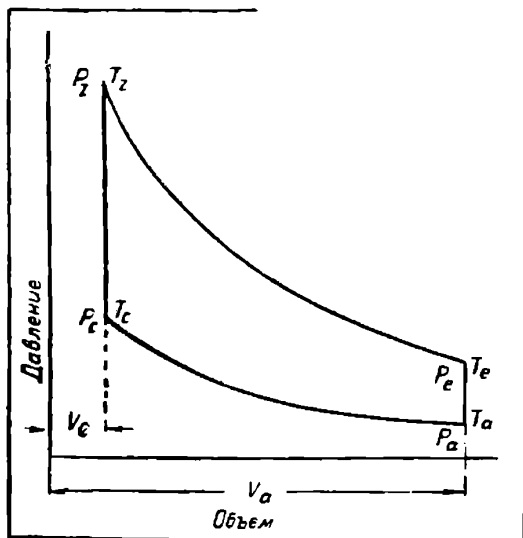
в начале хода сжатия имела смесь, дающая 100 кал при постоянном объеме, а затем мотор был наддут на 100%, тогда при сгорании выделится 200 кал. тепла и давление удвоится, если пренебречь увеличением тепловых потерь.

Обычно за степень нагнетания принимают выраженное в процентах отношение между разностью давлений нагнетания и нормальным давлением в начале сжатия к нормальному давлению, предполагая температуру постоянной. Так, если нормальное давление 0,985 кг/см², а давление нагнетания 1,48 кг/см², то степень нагнетания будет:

$$\frac{1,48 - 0,985}{0,985} 100 = 50\%.$$

Расчет наддува

Обычно вычисление давлений, температур, к. п. д. и т. д. производят на основании теоретической индикаторной диаграммы, беря за начальную точку давление нагнетания в начале хода сжатия (фиг. 4).



Фиг. 4. Теоретическая диаграмма для расчета наддува.

Для этого необходимо знать уравнения кривых сжатия и расширения. За отсутствием более точных данных эти уравнения могут быть приняты, как:

$pv^{1,33} = \text{const}$ для кривой сжатия,

$pv^{1,22} = \text{const}$ для кривой расширения.

Величины давлений и температур для других точек могут быть вычислены, если известны теплотворная способность смеси и закон изменения теплоемкости газов с температурой.

Тепловые потери во время сгорания должны быть известны и их нужно вычесть из общего баланса тепла смеси, воспламененной в конце сжатия. При отсутствии точных данных эти потери можно принимать в 10% от общего тепла сгорания H_u .

Максимальная температура конца сгорания получается из соотношения:

$$0,9 \cdot H_u = \int_{T_c}^{T_z} c_v \cdot dT,$$

где T_z и T_c — температуры после и до сгорания (т. е. в конце сжатия) и c_v — теплоемкость при постоянном объеме в пределах температур этой части цикла.

Для бензино-воздушных смесей в пределах температур от 600 до 2500° С величина c_v может быть принята равной:

$$c_v = 0,173 + 0,0000227 \cdot T,$$

так что

$$0,9 H_u = \int_{T_c}^{T_z} (0,173 + 0,0000227 \cdot T) dT = 0,173 (T_z - T_c) + 0,0000227 (T_z^2 - T_c^2).$$

Если H_u и T_c^1 известны, то легко найти и T_z .

Максимальное давление вспышки может быть определено из соотношения:

$$P_z = \frac{T_z}{T_c} \cdot P_c,$$

где P_c — давление сжатия.

Зная P_z можно построить и кривую расширения по уравнению:

$$p \cdot v^{1,22} = \text{const.}$$

Температура в конце хода расширения вычисляется по уравнению:

$$T_c = \frac{T_z}{\epsilon^{n-1}} = \frac{T_z}{\epsilon^{0,22}}.$$

Индикаторный коэффициент полезного действия

$$\eta_i = \frac{\text{тепло, обращенное в полезную работу}}{\text{эффективное тепло сгорания } (0,9 H_u)}$$

Тепло, обращенное в полезную работу, равно $0,9 H_u$ минус тепло, унесенное выхлопными газами.

Тепло выхлопных газов равно:

$$\int_{T_c}^{T_e} c_v \cdot dT.$$

Вычислив этот интеграл, легко определить и индикаторный к. п. д. Среднее индикаторное давление определяется из известного уравнения:

$$p_i = \frac{\text{тепло, обращенное в полезную работу} \cdot 427 \cdot G_e}{(V_a - V_c) 30 \cdot n}.$$

¹ Температура T_c определяется из хорошо известного соотношения:

$$T_c = T_a \epsilon^{n-1},$$

где ϵ — степень сжатия и n — показатель политропы сжатия (1,33 в нашем случае).

Расход горючего на индикаторную силу-час может быть вычислен

$$c_i = \frac{632}{H_u \cdot \eta_i},$$

где H_u — теплотворная способность 1 кг топлива.

Таким образом все параметры состояния нагнетаемого мотора могут быть определены с достаточной степенью точности.

Применяя данный метод к действительным случаям, лучше все вычисления для определения объема заряда относить к 1 кг воздуха при известной начальной температуре T_a (фиг. 4).

Поясним это примером.

Пусть степень сжатия двигателя $\epsilon = 5,0$, температура начала сжатия $T_a = 350^\circ$ и начальное давление $p_a = 1,033 \text{ кг/см}^2$; при этих условиях 1 кг воздуха будет иметь объем $0,992 \text{ м}^3$ и 1 кг паров бензина — $0,286 \text{ м}^3$.

Примем состав смеси, как отношение веса воздуха к весу бензина, равным 15:1. Тогда вес бензина в смеси на 1 кг воздуха будет равен:

$$\frac{1}{15} = 0,0667;$$

объем паров бензина:

$$0,286 \cdot \frac{1}{15} = 0,0191;$$

общий объем засосанной смеси:

$$V_a - V_c = V_h;$$

объем после сжатия:

$$V_c = \frac{V_a}{\epsilon - 1} = \frac{1,01}{4} = 0,253 \text{ м}^3.$$

Для того, чтобы учесть остаточные газы в объеме V_c допустим, что они имеют ту же характеристику, как и воздух при $T_a = 350^\circ\text{C}$ и $P_a = 1,033 \text{ кг/см}^2$. Тогда вес остаточных газов равен:

$$\frac{0,2530}{0,992} = 0,255 \text{ кг}$$

Таким образом общий вес рабочей смеси будет:

$$1 + 0,0668 + 0,255 = 1,32 \text{ кг}.$$

Этот вес является исходным для тепловых подсчетов. При наддуве начальное давление P_a будет выше и вес заряда соответственно больше. Очевидно, что во время сгорания это большее количество смеси выделит и больше тепла, в результате чего давление P_z и температура T_z также повысятся (фиг. 4).

Влияние степени наддува

Задаваясь различными степенями наддува, скажем 10, 20, 30% и т. д., можно вычислить соответственные величины давлений, температур, к. п. д. и средних давлений и, нанеся эти величины на график, можно видеть характер изменения их со степенью наддува.

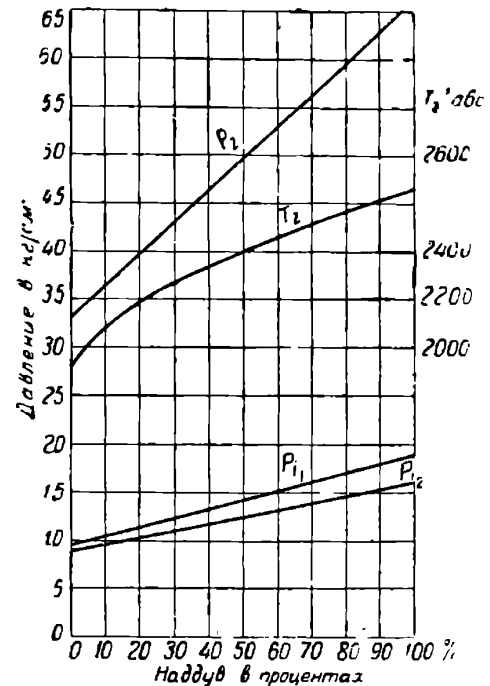
На фиг. 5¹ в виде кривых представлены данные теоретической индикаторной диаграммы для двигателя со степенью сжатия $\epsilon = 5$, в котором заряд охлаждался до температуры 350°C в каждом случае, атмосферное давление $1,033 \text{ кг/см}^2$ и состав смеси 14,5:1.

Теплоемкость смеси при постоянном объеме принята равной $C_v = 0,173 + 0,0000227 \cdot T$.

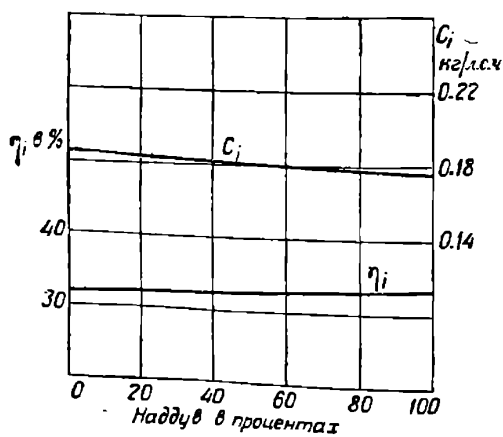
Из кривых видно, что теоретическое максимальное и среднее давления увеличиваются по линейному закону с увеличением степени нагнетания. Средняя температура также растет, но в меньшей степени, с увеличением степени нагнетания.

Вторая кривая среднего индикаторного давления, P_{i2} получена из P_{i1} путем уменьшения его на мощность, расходуемую на вращение нагнетателя при к. п. д. последнего в 50%.

Зависимость индикаторного к. п. д. и расхода горючего от степени нагнетания показана на фиг. 6. Из кривых можно видеть некоторое увеличение со степенью нагнетания индикаторного к. п. д. и со-



Фиг. 5. Влияние степени наддува на среднее индикаторное давление и на максимальные давления и температуру.



Фиг. 6. Влияние степени наддува на удельный расход топлива и индикаторный к. п. д.

ответственно этому некоторое уменьшение расхода горючего.

Что касается максимальных температур, достигаемых без и при нагнетании, то, как видно из фиг. 5, где масштаб температур дан увеличенным, увеличение температуры при изменении степени нагнетания от 0 до 100% составляет примерно всего лишь 6%.

Общее заключение, которое можно сделать из этих аналитических исследований, состоит в том, что нагнетание, значительно влияя на мощность, не уменьшает индикаторного к. п. д., не увеличивает

¹ „Supercharging“ I. G. Cameron, Autom. Engr. (Aug. 1925).

расхода горючего и сопровождается незначительным повышением температуры.

Действительный индикаторный к. п. д. и расход горючего

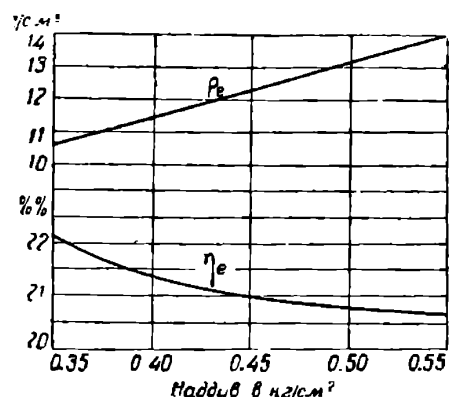
Ниже рассмотрим, будет ли в действительности индикаторный к. п. д. нагнетаемого двигателя таким же, как и в разобранном ранее теоретическом примере.

Здесь имеют место по крайней мере, две причины, вследствие которых величина действительного индикаторного к. п. д. будет ниже теоретической, а именно:

1) Обычно не всегда удается охладить нагнетаемый заряд до температуры всасывания двигателя без наддува.

2) Потеря мощности на вращение нагнетателя должна быть вычтена из „полезной мощности“, представленной площадью индикаторной диаграммы.

Можно ожидать уменьшения индикаторного к. п. д. еще и по причине уменьшения степени расширения с большей величиной заряда; так как к. п. д. является функцией степени расширения, то он будет иметь тенденцию падать пропорционально величине степени нагнетания.



Фиг. 7. Влияние степени наддува на среднее эффективное давление и эффективный к. п. д.

При отсутствии охлаждения нагретого сжатием воздуха (или смеси), выходящего из нагнетателя, температуры сгорания будут все более приближаться к детонационным температурам горючих, так что может оказаться необходимым во избежание этого уменьшить степень сжатия, а уменьшение степени сжатия влечет уменьшение индикаторного к. п. д.

В практике удельный расход горючего для нагнетаемых автомобильных двигателей больше вследствие одной или нескольких из указанных причин.

На фиг. 7¹ изображены результаты экспериментов, проведенных на авиационном двигателе, указывающие на зависимость P_e и η_e от степени нагнетания. Степень нагнетания в этом случае выражена в единицах избыточного (над атмосферным) давления.

Наддув и индикаторная диаграмма

Из приведенных выше рассуждений видно, что путем наддува двигателя с данной степенью сжатия увеличиваются давления; всасывания, сжатия, вспышки и конца расширения. Индикаторная диаграмма относительно атмосферной линии расположится выше и будет полнее.

На фиг. 8 изображены три диаграммы: диаграмма А для двигателя без нагнетателя, имеющего степень сжатия $\epsilon = 5$, диаг-

¹ „Supercharging Aircraft and Motor Vehicle Engines“ A. H. R. Fedden. Proc. Inst., Auf. Engrs. (1927—1928).

рамма *B* для того же самого двигателя, но с наддувом в 50% и, наконец, диаграмма *C* для двигателя без нагнетателя, но дающего такую же эффективную мощность, как и двигатель *B*. В последнем случае необходима степень сжатия $\epsilon = 11$, при которой давление вспышки будет 70 кг/см^2 . Вследствие такого высокого давления вопрос о применении столь большой степени сжатия практически отпадает. Средние индикаторные давления, соответственные диаграммам *A* и *B* (фиг. 8), будут $8,85$ и $12,85 \text{ кг/см}^2$.

По отношению к двигателю *A*, увеличение давления вспышки в двигателе с наддувом (*B*) всего лишь около 30% по сравнению со 125% для двигателя с пересжатием, представленного диаграммой *C*.

Линия расширения диаграммы *B* лежит значительно выше, чем в диаграмме *A*; это, как мы уже сказали, является типичным для диаграмм двигателей с наддувом.

Потеря P_p , эквивалентная мощности, поглощаемой нагнетателем в случае *B*, была $0,91 \text{ кг/см}^2$, так что полезное $P_i = 12,85 - 0,91 = 11,94 \text{ кг/см}^2$.

Мощность нагнетаемого двигателя (*B*) была на 35% больше, чем двигателя без наддува (*A*).

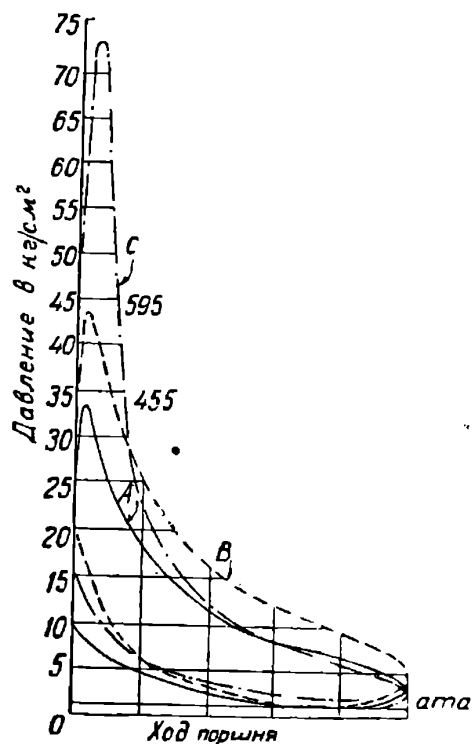
Механический к. п. д. нагнетаемых двигателей

Теоретически при одних и тех же условиях относительные механические потери нагнетаемого двигателя меньше, чем двигателя без наддува.

Если P_i данного типа двигателя будет удвоено, то механические потери, хотя и увеличатся, но незначительно; если, скажем, механический к. п. д. двигателя без наддува был 85%, то у двигателя с наддувом будет 87—90% без вычета потерь на нагнетатель; принимая же во внимание и последние, механический коэффициент двигателя с нагнетателем будет несколько ниже.

В заключение следует указать, что наличие нагнетателя при наддуве увеличивает вес двигателя. Затем, поскольку при наддуве давления вспышки примерно на 25% выше, чем без наддува, то по этой причине двигатели должны строиться более прочными, а значит, они будут и более тяжелыми. Таким образом с точки зрения удельного веса наддув не дает преимуществ. Но зато с точки зрения литровой мощности двигателя и сохранения его мощности с высотой (для авиационных двигателей) имеются очевидные преимущества двигателя с наддувом.

Использование выхлопных газов будет иметь своим следствием уменьшение удельного веса двигателя.



Фиг. 8. Влияние наддува на индикаторную диаграмму.

Сохранение мощности на высоте

Одной из самых важных проблем при конструировании авиационного двигателя является сохранение его мощности с высотой, т. е. при уменьшении плотности воздуха. Для разрешения этой проблемы в распоряжении конструктора имеются несколько методов, хотя не все из них представляют практическую ценность.

Из наиболее существенных методов сохранения мощности с высотой назовем следующие:

- 1) Применение сжатого кислорода.
- 2) Применение двигателей с пересжатием (высокая степень сжатия). Такие двигатели на уровне земли работают задросселированными, по мере подъема на высоту дроссель все больше и больше открывается.
- 3) Переразмеренный (большой литраж цилиндра) двигатель, работающий на уровне земли, также задросселированный.
- 4) Двигатель с пересжатием и работающий на двух сортах горючих.
- 5) Двигатель с изменяющимся распределением.
- 6) Двигатель с переменной степенью сжатия, в котором сжатие увеличивается по мере подъема на высоту.
- 7) Принудительное наполнение или наддув посредством различных компрессорных устройств.
- 8) Утилизация энергии выхлопных газов для создания пара.

Рассмотрим каждый из этих методов в отдельности.

Кислородный способ не имел практического успеха, главным образом, ввиду затруднений карбюрирования при изменении режима, большого веса баллонов, заключающих кислород для питания двигателей и из-за появления детонации, сопровождающейся чрезмерным повышением и давления и температуры.

Тем не менее применение кислорода с целью компенсации обогащения смеси с высотой является вполне возможным. Но в этом случае рабочие температуры будут выше и возникнут трудности с охлаждением цилиндров и клапанов.

Задросселированный двигатель с пересжатием. Высшая степень сжатия с успехом применялась, и применяется до настоящего времени, во многих авиационных двигателях „BMW“, „Юпитер“, „Либерти“, в которых дроссель на малых высотах остается закрытым. Обычно на уровне земли для таких двигателей разрешается открывать дроссель полностью не выше, чем на 2 мин. при условии, что мотор работает на соответствующем топливе без признаков детонации. Иначе могут иметь место преждевременные вспышки и другие неприятности.

С подъемом на высоту дроссель постепенно открывается и уменьшение плотности воздуха (и мощности в двигателе с нормальной степенью сжатия) частично компенсируется за счет увеличения сжатия.

Переразмеренные двигатели. Этот тип двигателей имеет нормальную степень сжатия, но большие, по сравнению с нормальным двигателем, размеры (литраж) цилиндра. Большой литраж