

А. Джодж

Автомобильные и авиационные двигатели
часть 1

Москва
«Книга по Требованию»

УДК 656
ББК 39.1
А11

А11 **А. Джодж**
Автомобильные и авиационные двигатели: часть 1 / А. Джодж – М.: Книга по Требованию, 2024. – 334 с.

ISBN 978-5-458-38262-5

Автомобильные и авиационные двигатели

ISBN 978-5-458-38262-5

© 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.

ПРЕДИСЛОВИЕ АВТОРА

За период времени, протекший с момента первого издания этой книги, было сделано много теоретических и экспериментальных работ, результатом которых явился значительный прогресс в области развития быстроходных двигателей внутреннего сгорания.

Значительная часть новых данных теории и практики этого прогресса включена в настоящее издание книги.

Здесь мы даем специальную главу о двигателях с зажиганием от сжатия (как у нас принято называть двигатели тяжелого топлива. — Н. Ч).

Интересно отметить, что за последние десять лет благодаря усовершенствованию клапанного механизма, камеры сгорания и применению более высокой степени сжатия при работе на недетонирующих топливах литровая мощность двигателей увеличилась, примерно, на 40%.

В области увеличения быстроходности двигателя также имеются значительные достижения благодаря усовершенствованию конструкции и применению лучших материалов с большим отношением допускаемого напряжения к весу.

Что касается литровой мощности, то здесь лучшие конструкции современных автомобильных и авиационных бензиновых двигателей приближаются к своему пределу.

Правда и в этой части возможности еще не все использованы.

В течение последних двадцати лет достигнуты заметные улучшения в уменьшении удельного веса (т. е. сухого веса двигателя, приходящегося на 1 л. с.) и расхода топлива.

Удельный вес лучших конструкций авиационных двигателей непрерывно уменьшается от 1,5 — 2 кг/л. с. в 1912 — 1914 гг. до 0,45 кг/л. с. для гоночных двигателей и 0,67 кг/л. с. для двигателей, внедренных в эксплуатацию.

Что касается изменения в удельном расходе топлива за тот же период от 300 — 320 г/э. л. с. ч., он уменьшился до 225 — 200 г/э. л. с. ч. в лучших современных конструкциях.

За этот период времени благодаря интенсивной научно-исследовательской работе накопились известные знания физико-химической природы различных топлив и нахождения лучших пропорций составляющих этих топлив (ароматики, нафтенны и парафины). В результате этого стало возможным применять более высокие степени сжатия при бездетонационной работе двигателя.

Установлено, что из сорокапроцентного увеличения отдачи мощности двигателя от 10 до 15% падает на улучшенные сорта топлив*.

* Тут автор, очевидно, имеет в виду увеличение мощности за счет применения более высокой степени сжатия, что в свою очередь стало возможным благодаря лучшим (недетонирующим) сортам топлив. *Прим. перев.*

Применение золотникового двигателя, как показали недавние опыты, сулит большие возможности в смысле дальнейшего увеличения литровой мощности. До сего времени считается, что в клапанных двигателях нельзя применять высокую степень наддува из-за возникающих при этом высоких давлений и температур на выхлопе. Золотниковые двигатели в этом отношении не имеют жестких пределов.

Результаты недавних опытов Рикардо на золотниковом двигателе показали, что в этом двигателе можно применять очень высокую степень наддува. В своем двигателе он применял настолько высокую степень наддува, что среднее эффективное давление изменялось от 28 до 35 кг/см² в зависимости от рода применяемого топлива. Двигатель этот работал в течение довольно долгого периода времени. Давление в начале выхлопа здесь было значительно выше, чем у не наддуваемого двигателя и изменялось от 27 до 25 кг/см².

Если не использовать энергию выхлопных газов в цилиндре низкого давления (применение компаунд-моторов), то в таком двигателе благодаря большим потерям будет большой расход топлива.

Золотниковый двигатель с отсутствующим в нем выхлопным клапаном (а следовательно с наличием беспокойств и неполадок благодаря высоким температурам нагрева), повидимому, хорошо будет подходить для компаундирования.

За последние годы несколькими выдающимися химиками и физиками была проделана большая экспериментальная работа по изучению природы сгорания в двигателях внутреннего сгорания. В результате этих работ было выдвинуто несколько новых теорий сгорания, основные положения которых даны в этой книге. Вопросы детонации, наддува и топлив заново рассмотрены и включены самые позднейшие данные, полученные к моменту сдачи в печать этой книги. Ввиду особой важности, которую приобрели в настоящий момент быстроходные двигатели с зажиганием от сжатия (так называемые дизеля-моторы), этот отдел также расширен в этой книге.

В новое издание книги внесено большое количество изменений, исправлений и дополнений по новейшим данным теории и практики.

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СГОРАНИЕ ТОПЛИВО-ВОЗДУШНЫХ СМЕСЕЙ В ДВИГАТЕЛЯХ И СОВРЕМЕННЫЕ ТЕОРИИ ПО СГОРАНИЮ

Общие соображения

В цилиндре двигателя внутреннего сгорания происходят сложные явления, и хотя выдающиеся ученые и инженеры уделяли достаточное внимание уяснению этих явлений, однако, остается еще многое сделать в этом отношении.

К сожалению, в прошлом не было проделано научных работ в отношении разрешения специфических проблем, относящихся к бензиновым двигателям по сравнению с газовыми и нефтяными двигателями, хотя война 1914—1918 гг. дала заметный толчок к исследовательской работе.

Бензиновый двигатель, работающий при очень больших числах оборотов по сравнению с большим газовым и нефтяным двигателем, представляет значительные трудности для экспериментатора, поэтому многие из наших теперешних выводов, отнесенных к этому типу двигателей, перенесены из опытов и наблюдений, проделанных над тихоходными двигателями.

Горючие смеси

При смешении паров горючего или газа с надлежащим количеством кислорода воздуха образуется взрывчатая смесь, и достаточно небольшого пламени или искры, чтобы произошла химическая реакция в этой смеси с большей или меньшей быстротой.

При медленном сгорании смеси пламя занимает сравнительно большое время для распространения в самой массе смеси от частицы к частице, пока не сгорит весь объем смеси. Этот процесс называется **воспламенением**.

В этом случае сгорание или химическое соединение начинается от точки поджигания смеси. Сгоревшие частицы нагревают соседние до температуры самовоспламенения и этот процесс проходит через всю массу смеси.

В тот момент, когда воспламеняется вся оставшаяся масса смеси, происходит взрыв, и давление в этот момент достигает максимального значения.

Полное сгорание не обязательно совпадает с точкой взрыва и максимальным давлением. В газовых двигателях точка максимального давления в действительности всегда предшествует точке полного сгорания.

Может быть и другой вид сгорания взрывной смеси, совершенно отличный от того, что мы называли воспламенением. Это сгорание более бурное и называется **детонацией**.

Детонация, повидимому, устанавливается наличием волны сжатия во взрывной смеси, которая, распространяясь через всю массу смеси, поджигает ее от тепла сжатия*.

Очевидно, что сгорание смеси в этом случае будет распространяться со скоростью движения волн сжатия, и эта скорость очень значительная по сравнению со скоростью сгорания в первом случае.

Если горючую смесь, составленную из соответственных объемов СО и О₂, поджечь в одной точке при нормальных условиях, то скорость распространения, или скорость воспламенения в данном случае будет около 1 м/сек, в то же самое время, если ту же смесь поджечь не в точке, а мгновенно и в значительном объеме, то возникает детонация, и скорость распространения пламени достигает 1500 м/сек.

Детонация может возникать и в других газовых смесях, как, например, в смеси водорода и кислорода, если она будет составлена из двух объемов водорода и одного объема кислорода и подожжена; в этом случае скорость распространения детонирующего пламени достигает 3000 м/сек.

Различие между нормальным и детонирующим сгоранием можно продемонстрировать на следующем примере: если поджечь спичкой какое-либо количество пироксилина на открытом воздухе, то сгорание будет спокойное и безопасное, но тот же самый пироксилин и при точно тех же условиях, будучи подожжен капсюлем, даст очень быстрое или детонирующее сгорание.

Упомянутые выше два вида сгорания имеют место в бензиновых и других двигателях и могут быть получены при определенных условиях, которые рассмотрим в следующих параграфах. Надо заметить, что в двигателях в чистом виде не встречаются эти виды сгорания отдельно друг от друга.

Очень бедная смесь бензиновых паров с воздухом будет сгорать сравнительно медленно, в то время как та же смесь с чистым кислородом или смесь ацетилена с воздухом, будучи введена в цилиндр и подожжена обычным способом, вызовет детонацию и чрезвычайно высокие давление и температуру. Разбавление смеси инертными газами уменьшает детонацию.

Были произведены опыты по определению скоростей распространения пламени в различных газовых смесях, в смесях, разбавленных инертными газами, и в смесях при различных степенях сжатия.

Эти опыты обнаружили, что скорость распространения пламени:

- 1) уменьшается по мере увеличения инертных газов;
- 2) зависит от доли активных составляющих смеси;
- 3) уменьшается по мере увеличения — разжижения смеси инертными газами;
- 4) увеличивается по мере возрастания температуры смеси;
- 5) гораздо больше, когда смесь сгорает при постоянном объеме, чем при постоянном давлении.

Опыты Гомфри Деви (Humphry Davy) показывают, что чисто взрывные смеси теряют свои взрывные свойства при чрезвычайном избытке одного

* Эта теория детонации является устаревшей и мы оставляем ее здесь как имеющую лишь исторический интерес. В дальнейшем автор приводит современные теории по сгоранию и в специальной главе «Детонация в бензиновых двигателях» дает подробное освещение существующих теорий по детонации. *Прим. перев.*

из составляющих эту смесь компонентов, при избытке таких инертных составляющих как азот, или при уменьшении давления газов ниже определенной точки.

Для бензино-воздушных смесей невозможно получить взрывного сгорания (в обычных бензиновых двигателях) при отношении воздуха к бензину большем 22 или меньшем 8 частей по весу.

В слишком бедных смесях слабость взрывного сгорания получается из-за чрезмерного разжижения горючей смеси инертными газами, в то время как в слишком богатых смесях решающим фактором является диспропорция в активных составляющих смеси*.

Если при нормальном атмосферном давлении смешать два объема водорода с одним объемом кислорода и затем к этой смеси добавить около двадцати пяти объемов кислорода, то такая смесь теряет свои взрывные свойства. Но если увеличить плотность результирующей этой смеси посредством внешнего давления или изменения температуры, то взрывное свойство ее восстанавливается.

С другой стороны, если уменьшить атмосферное давление до $\frac{1}{18}$ от его первоначального значения, то тогда смесь, состоящая из двух объемов водорода и одной части кислорода, перестанет быть взрывной, однако, нагреванием этой разряженной смеси до довольно высокой температуры можно снова воспроизвести взрыв. Дальнейшие исследования показали, что влияние увеличения температуры более действительно, чем разжижение смеси инертными газами или избытком одного из компонентов. Важно заметить, что увеличение давления сжатия в бензиновых двигателях увеличивает скорость распространения пламени в смеси, что очень важно в быстроходных и особенно гоночных моторах.

Состав смеси и скорость распространения пламени

Дегальд Клерк (Dugald Clerk) из опытов над смесями каменноугольного газа и воздуха нашел точку, где прекращается воспламенение. Он установил, что смесь, состоящая из 14 частей воздуха и 1 части газа, взрывалась от искры. Смесь же из 15 частей воздуха и 1 части газа не взрывалась. Когда же эту смесь слегка подогревали или добавляли немного каменноугольного газа, смесь становилась воспламеняемой.

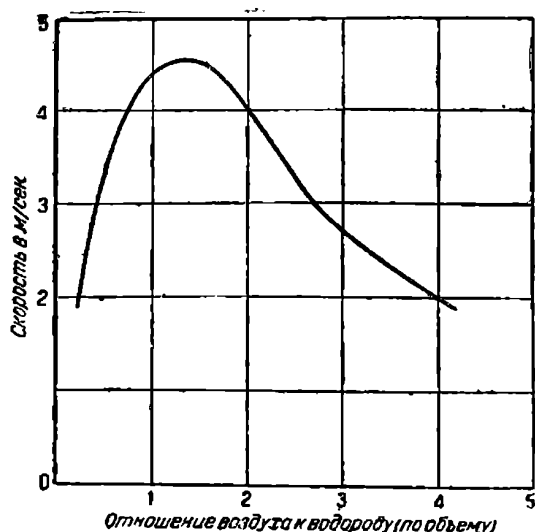
При переходе от взрывной смеси (с правильной пропорцией составляющих для химического соединения) постепенным разжижением ее к смеси с «критической пропорцией» воспламенение все замедляется и замедляется, а также значительно уменьшается скорость пламени и практически не слышно взрывных звуков.

Это явление легко продемонстрировать сжиганием от искры в стеклянной трубке смеси окиси углерода CO с кислородом O₂.

Влияние различных пропорций газов и паров горючего на их воспламеняемость и скорость распространения пламени было определено Бунзеном, Маллярдом, Шателье и другими исследователями.

* Богатство или бедность смеси определяется избытком или недостатком топлива в этой смеси по сравнению с теоретически необходимым для полного ее сгорания. У нас это оценивается коэффициентом избытка воздуха α , а у англичан и американцев — весовым отношением воздуха к топливу. В дальнейшем состав смеси везде будет изображаться этим отношением. *Прим. перев.*

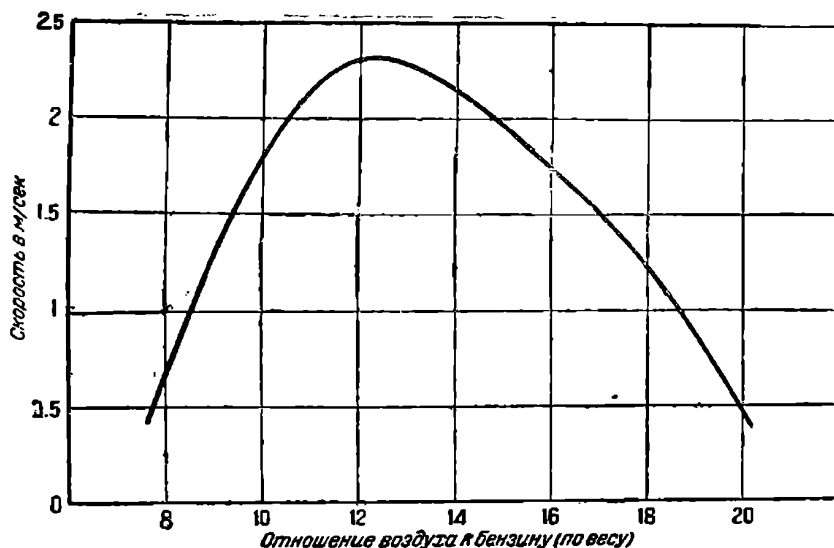
На кривой фиг. 1 приведены экспериментальные данные Маллярда и Шателье. Из кривой видно, что максимальная скорость распространения пламени была при составе смеси из 1 части водорода и 1,5 частей воздуха и соответствовала 4,4 м/сек. Так как воздух состоит из 4 частей азота и одной части кислорода по объему, то, следовательно, максимальная скорость распространения пламени будет соответствовать смеси из 10 частей водорода и 3 частей кислорода.



Фиг. 1. Скорость движения пламени.

Другие опыты по сгоранию смесей водорода с чистым кислородом в объеме, необходимом для совершенного сгорания, т. е. при отношении объемов водорода и кислорода равном 2:1, дали те же результаты, т. е. что максимальная скорость распространения пламени соответствовала избытку водорода в смеси, что видно из кривой фиг. 1.

Опыты д-ра Неймана (Дрезден) по сгоранию бензино-воздушных смесей показали, что максимальная скорость сгорания получалась при более богатой смеси, как это видно из кривой фиг. 2.



Фиг. 2. Скорость распространения пламени в зависимости от состава смеси.

Различные экспериментаторы, проводившие свои опыты по сгоранию бензино-воздушных смесей, приходили к тем же результатам, к которым раньше пришел д-р Нейман, так что данные его опытов дают закон изменения скорости сгорания бензино-воздушных смесей в зависимости от состава смеси.

Сгорание при постоянном объеме

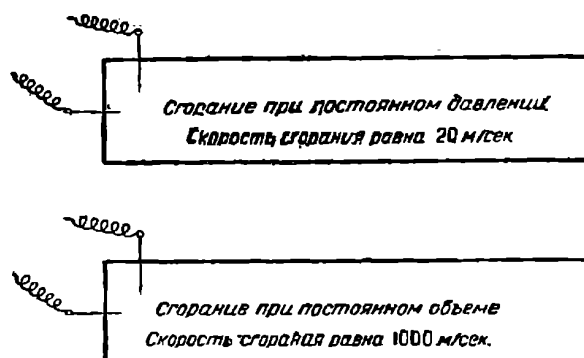
Маллярд и Шателье проводили опыты по сгоранию смесей водорода и кислорода (или воздуха) в закрытых сосудах и установили, что скорость

сгорания смесей при постоянном объеме больше, чем при постоянном давлении.

Когда смесь, состоящая из 2 частей водорода и 1 части кислорода (по объему), поджигалась в трубке, один конец которой был открыт в атмосферу, то скорость распространения пламени была 20 м/сек. Когда смесь такого же состава сгорала в закрытом с обоих концов сосуде, то скорость была 1000 м/сек (фиг. 3). Такое чрезмерное увеличение скорости во втором случае, повидимому, объясняется быстрым возрастанием давления и температуры, которые ускоряют распространение пламени от частицы к частице.

В бензиновых двигателях сгорание приближается ко второму случаю.

Опытами было установлено, что скорость сгорания зависит от объема сосуда, и чем больше сосуд, тем длиннее период времени от момента воспламенения до достижения максимального давления. Это обстоятельство надо иметь в виду при конструировании больших двигателей внутреннего сгорания.



Фиг. 3.

Данные по сгоранию

Прежде чем перейти к рассмотрению действительных явлений, происходящих внутри цилиндра двигателя, и разбору наиболее важных результатов опытов со сгоранием в закрытых сосудах, необходимо рассмотреть сгорание с химической и термической точек зрения. Основой работы каждого двигателя внутреннего сгорания является химическое соединение водорода H и углерода C топлива с кислородом воздуха O. Фавром (Favre), Сильверманом (Silverman), Андреусом (Andrews) и другими исследователями была определена теплотворная способность различных горючих или их элементов, которые и даны в нижеследующих таблицах.

ТАБЛИЦА 1
Теплотворная способность

Топлива и их элементы	Обозначения	Калории на килограмм	Теплотворная способность H_u
Водород	H	29 200	Низшая теплотворная способность
Углерод	C	8 080	
Окись углерода	CO	2 400	
Сера	S	2 220	
Этилен	C_2H_4	11 860	
Бензол	C_6H_6	9 910	
Метан	CH_4	13 060	

Как видно из табл. 1, топлива, богатые водородом, будут иметь большую теплотворную способность.

Под теплотворной способностью топлива понимается количество тепла, выделенного при сгорании 1 кг этого топлива.

ТАБЛИЦА 2

Теплотворная способность топлив, применяемых в двигателях внутреннего сгорания

Наименование топлива	Состав в %			Теплотворная способность в кал-кг	Примечание
	С	Н	О		
Этиловый спирт	52,2	13,0	34,8	7 000	C_2H_6O
Метиловый спирт . . .	37,5	12,5	50	5 300	CH_4O известен как древесный спирт
Денатур рованный спирт	—	—	—	6 100	90% этил. алкоголь, 10% метил
Сырой бензол	92,3	7,7	0	10 000	C_6H_6
1) Бензин $\gamma=0,80$. .	—	—	—	10 650	Легкий бензин
2) Бензин $\gamma=0,720$. .	85	15	0	10 400	Средний бензин
3) Бензин $\gamma=0,760$. .	—	—	—	10 150	Тяжелый бензин
Парафин	85	15	—	10 500	Известен как керосин
Гексан	83,7	16,3	—	11 100	C_6H_{14}
Гептан	84	16	—	11 500	C_7H_{16}
Толуол	91,3	8,7	—	10 100	C_7H_8
Ксилол	90,5	9,5	—	10 200	C_8H_{10}
Ацетилен	92,3	7,7	—	12 000	C_2H_2

В бензиновых двигателях надо брать низшую теплотворную способность топлива, так как здесь тепло, потраченное на парообразование, уходит с выхлопными газами и не обращается в полезную работу внутри цилиндра.

Возьмем 1 кг коммерческого бензина, приблизительная химическая формула которого C_8H_{18} , и определим его низшую теплотворную способность.

Элементарный состав по весу будет: $C = \frac{96}{114} = 0,84$ и $H = 0,16$. Определим количество паров, образованных при сгорании этого топлива.

1 кг водорода, соединяясь с 8 кг кислорода, образует 9 кг водяных паров, следовательно у нас паров будет $0,16 \cdot 9 = 1,44$.

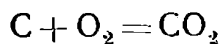
Для образования 1 кг пара требуется тепла 500 кал, тогда низшая теплотворная способность взятого нами 1 кг топлива будет:

$$H_u = 0,85 \cdot 8080 + 0,16 \cdot 29\,200 - 1,44 \cdot 500 = 11\,448 \text{ кал.}$$

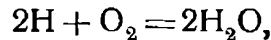
Объемные соотношения при сгорании

Часто бывает важным и необходимым определить количество воздуха (по весу или по объему), необходимого для полного сгорания данного количества топлива.

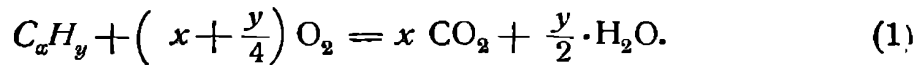
Если топливо дано химической формулой C_xH_y и известно, что углерод сгорает по формуле



и водород сгорает по формуле



тогда мы можем написать следующее уравнение:



Таким образом 1 объем топлива состава C_xH_y соединяется с $\text{C}\left(x + \frac{y}{4}\right)$ объемами кислорода и образует x объемов CO_2 и $\frac{y}{2}$ объемов H_2O . Так как воздух состоит по объему из 79,1 частей азота и 20,9 частей кислорода, отсюда следует, что 1 м³ кислорода содержится в 4,78 м³ воздуха.

Следовательно, 1 объем топлива состава C_xH_y требует для полного сгорания $4,78 \left(x + \frac{y}{2}\right)$ объемов воздуха.

Перепишем формулу (1) в молекулярных весах:

$$(12x + y) + \left(x + \frac{y}{4}\right) \cdot 32 = x(12 + 32) + \frac{y}{2}(2 + 16); \quad (2)$$

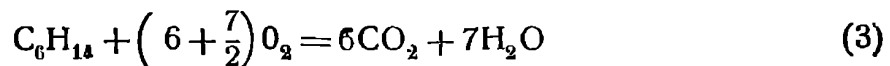
отсюда следует, что для сгорания 1 кг топлива состава C_xH_y требуется

$$\frac{32x + 8y}{12x + y} \text{ кг}$$

кислорода.

Так как воздух по весу состоит из 76,8% азота и 23,2% кислорода, т. е. 4,31 кг воздуха содержат 1 кг кислорода и 3,31 кг азота, то следовательно, для полного сгорания 1 кг топлива потребуется $4,31 \left(\frac{32x + 8y}{12x + y}\right)$ кг воздуха.

Для бензинового двигателя с достаточной для целей расчета точностью можно принять топливо чистый гексан C_6H_{14} и для него уравнение сгорания напишется в следующем виде



или по молекулярному весу:

$$86 + 304 = 264 + 126.$$

Для полного сгорания 1 кг гексана требуется $\frac{304}{86} = 3,53$ кг кислорода или $3,53 \cdot 4,31 = 15,21$ кг воздуха.

Объемная теплотворная способность

Для полного сгорания 1 кг бензина требуется 15,2 кг воздуха или по объему при 15°C и 760 мм Hg $\frac{15,2}{1,22} = 12,5$ м³, так как удельный вес воздуха при этих условиях $\gamma = 1,22 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$.

Низшая теплотворная способность бензина $H_u = 10\,400 \text{ кал/кг}$, тогда теплотворная способность 1 м^3 бензино-воздушной смеси будет:

$$\frac{10\,400}{12,5} = 830 \text{ кал/кг.}$$

Состав продуктов сгорания

При теоретическом составе смеси продуктами сгорания для чистого бензина или гексана будут:

$$\begin{aligned} \text{CO}_2 &= 14,3\% \text{ по объему и} \\ \text{N}_2 &= 85,7\% \text{ » »} \end{aligned}$$

В этом случае вода считается сконденсированной.

Рассмотрим теперь, какие продукты сгорания получатся для смесей различного состава. Бензино-воздушные смеси имеют довольно широкий диапазон воспламеняемости, начиная от самой бедной смеси, состоящей из 20 частей воздуха и 1 части бензина, до самой богатой, 8 частей воздуха и 1 части бензина.

Очевидно, что в бедных смесях в продуктах сгорания надо ожидать наличия свободного кислорода, кроме CO_2 и N_2 . Наоборот, в богатых смесях будет происходить неполное сгорание, часть углерода сгорит в CO тем большая, чем богаче смесь.

Это теоретическое положение довольно хорошо подтверждается на практике при анализе выхлопных газов.

Смесь, которая дает в практике ближайшее подобие совершенного сгорания, состоит из 14,7 частей воздуха и 1 части бензина, удельный вес которого равен 0,720 при 15°C .

Продукты сгорания этой смеси состояли из:

Углекислота	$\text{CO}_2 = 13,3\%$	по объему
Окись углерода	$\text{CO} = 0,5$	» »
Кислород	$\text{O}_2 = 0,5$	» »
Метан	$\text{CH}_4 = 0,06$	» »
Водород	$\text{H}_2 = 0,18$	» »
Азот	$\text{N}_2 = 85,46$	» »
Альдегиды		следы

Эти числа, конечно, немного изменяются в зависимости от качества применяемого топлива.

Надо заметить, что данные анализа (представляющие средние числа большого количества испытаний) указывают на несовершенное сгорание смеси в цилиндре двигателя.

Кроме того, химическое испытание сконденсированной воды на выхлопе обнаружило наличие в ней альдегидов.

В результате многочисленных испытаний и анализов выхлопных газов в четырехцилиндровых бензиновых двигателях Ватсон (Watson) построил ряд кривых, представленных на фиг. 4.

В этих кривых продукты сгорания в процентах выражены в функции состава смеси. Вес воздуха и бензина во время испытаний точно измерялись