
Проф. Д. Д. БРОЗЕ

СГОРАНИЕ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Перевод с английского
канд. техн. наук А. С. ХАЧИЯНА
Под редакцией
д-ра техн. наук А. Н. ВОИНОВА



ИЗДАТЕЛЬСТВО „МАШИНОСТРОЕНИЕ“
Москва 1969

УДК 621.432:536.46.001

Сгорание в поршневых двигателях. Б р о з е Д. Д. М., «Машиностроение», 1969, 248 стр.

В книге приведена классификация процессов сгорания, рассмотрены отдельные виды этих процессов и их физико-химические основы. Рассмотрены особенности сгорания в бензиновых карбюраторных двигателях и дизелях, а также проблемы загрязнения, коррозии и износа двигателей в связи с процессом сгорания. Книга основана на богатом личном опыте автора, являющегося одним из крупных зарубежных специалистов в области теории и практики поршневых двигателей внутреннего сгорания, и на обобщении материалов специалистов различных стран.

Книга предназначена для инженерно-технических работников, занятых конструированием и эксплуатацией поршневых двигателей внутреннего сгорания. Табл. 6, илл. 184, библи. 46 назв.

Рецензенты: кандидаты техн. наук Н. С. Ханин и Б. С. Чистозвонов

**COMBUSTION IN
PISTON ENGINES**

Spark-ignition and compression-ignition

by PROF. IR. J. J. BROEZE

Technische Hogeschool Delft

DE TECHNISCHE UITGEVERIJ H. STAM N. V.

Haarlem — Antwerpen — Keulen

3-3-4

351-68

Общая теория горения

1. В книге рассмотрены процессы, происходящие в поршневых двигателях, и законы, управляющие этими процессами. Прежде всего следует уточнить, каким конкретно вопросам необходимо уделить основное внимание.

2. Сгорание является химическим процессом, но специалиста по двигателям внутреннего сгорания интересуют в основном физические явления, происходящие в результате сгорания, а именно: изменение температуры и давления рабочего заряда, а также продукты химических реакций, если они представляют какую-либо опасность (некоторые составляющие отработавших газов; продукты, способствующие загрязнению масла, увеличивающие отложения на деталях двигателя и т. д.).

3. Процесс выделения тепла при сгорании топлива следует рассматривать скорее как отрицательное явление, так как он вызывает повышение "температуры газов, что, в свою очередь, ведет к термическому напряжению стенок камеры сгорания. Поэтому в общем случае желательна такая организация процесса сгорания, при которой было бы возможно достигнуть изменения давления заряда требуемого характера при минимальных термических нагрузках на стенки. Это влечет за собой стремление осуществить процесс сгорания при низких температурах и минимальных значениях коэффициента теплоотдачи от заряда в стенки камеры сгорания.

4. Характер изменения давления должен оцениваться как с точки зрения термодинамики, так и с учетом механических нагрузок двигателя. С точки зрения термодинамики цикл с адиабатическим сжатием и расширением и сгоранием при постоянном объеме (рис. 1) является наиболее выгодным.

1*

5. Принимая во внимание статическую прочность деталей двигателя, нередко соглашаются с небольшим ухудшением к. п. д., чтобы значительно уменьшить максимальное давление сгорания. Для того же, чтобы получить при допустимом давлении сгорания достаточно высокие эффективность и экономичность цикла, принимают в качестве основы рабочего цикла цикл Сабатэ (рис. 2) со смешанным подводом тепла.

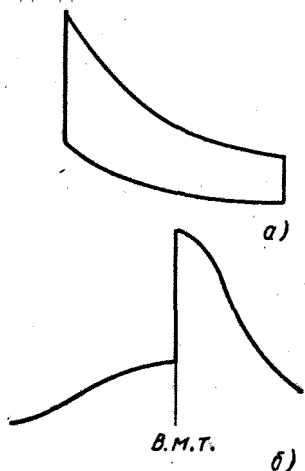


Рис. 1. Диаграммы цикла
Бо-де-Роша:

a — p — V -диаграмма; b — p — τ -
диаграмма

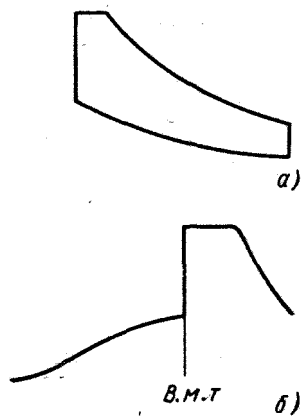


Рис. 2. Диаграммы цикла
Сабатэ:

a — p — V -диаграмма; b — p — τ -
диаграмма

6. Соображения динамической прочности деталей приводят к новому компромиссу. С точки зрения термодинамики достаточно иметь характеристику изменения давления в зависимости от объема заряда в цилиндре (p — V -диаграмма); для определения же действительных нагрузок необходимо рассматривать изменение давления по времени (p — τ -диаграмма). Процесс, осуществленный в соответствии с термодинамическими циклами, приведет к скачкообразному изменению нагрузки, что из-за инерции деформирующихся деталей вызовет в них дополнительную динамическую нагрузку. Если, например, сгорание происходит при строго постоянном объеме (т. е. мгновенно), деформации, а следовательно, и напряжения в деталях удвоятся по сравнению с напряжениями при статическом приложе-

нии того же усилия при тех малых степенях демпфирования, которые обычно имеют место (рис. 3).

Возникающие при этом вибрации вызывают шум, работа двигателя становится «жесткой» и существенно уменьшается усталостная прочность деталей. Поэтому важно добиться такого характера зависимости $\rho - \tau$, при котором отмеченные последствия динамического приложения нагрузки будут сведены к минимуму.

7. Отмеченное требование может быть осуществлено только в том случае, если сгорание будет происходить в течение определенного промежутка времени (рис. 4). Это вполне возможно без существенного отклонения от совершенства цикла (рис. 5), так как допущенные отклонения в единицах времени (угла ϕ) связаны с объемом через зависимость косинусоидального типа, и если ϕ меняется в пределах от -15° до 15° , то перемещение поршня от н. м. т.

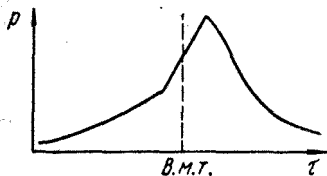


Рис. 4. Действительный характер повышения давления в течение конечного отрезка времени

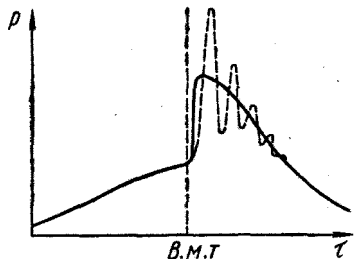


Рис. 3. Влияние динамического приложения нагрузки при бесконечно быстром повышении давления на напряжения, возникающие в деталях

термодинамического совершенства цикла (рис. 5), так как допущенные отклонения в единицах времени (угла ϕ) связаны с объемом через зависи-

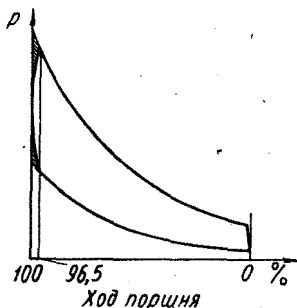


Рис. 5. Потери, возникающие вследствие конечной скорости повышения давления

в начале и конце сгорания будет составлять около 96,5% полного хода поршня. Сказанное применимо также к сгоранию по циклу, близкому к смешанному, но в последнем случае угол ϕ , при котором начинается расширение, обычно больше (30° и более, см. рис. 2), так что скругление

диаграммы может привести к более существенному снижению эффективности.

8. Последствия динамического приложения нагрузки должны рассматриваться в связи с периодом собственных колебаний деталей двигателя (при отсутствии демпфирования период собственных колебаний $\tau_c = 2\pi \sqrt{\frac{m}{c}}$, где

m — масса, c — жесткость [1]). Из практики известно, что во многих случаях величины τ_c и времени сгорания примерно одинаковы, следовательно, необходимо принимать меры для уменьшения эффекта от динамического приложения нагрузки. Последнее относится как к тихоходным дизелям, так и к быстроходным бензиновым двигателям, причем в последнем случае — в связи с массовым использованием на легковых автомобилях.

В быстроходных дизелях динамическое приложение нагрузки вызывает чрезмерный шум и жесткую работу. В двигателях этого типа особенно сложно удовлетворительно решить проблему уменьшения нежелательных эффектов динамического приложения нагрузки. Частично это связано с явлениями, которые будут рассмотрены позднее, а именно с тем, что давление в объеме камеры сгорания дизеля при определенных условиях не успевает полностью выравняться, и в самом газе в период сгорания возникают колебания, вызывающие звуковой эффект. Аналогичное явление имеет место в бензиновых двигателях при детонации (стук).

9. Из сказанного следует, что предпочтительным является равномерное повышение давления в течение времени, соответствующего минимально возможному пути поршня, с достижением достаточно малых конечных давлений. Это должно сопровождаться минимальными тепловыми потерями, большой полнотой сгорания и минимальным содержанием в продуктах сгорания вредных примесей.

10. Возможны различные способы достижения сформулированных выше целей. В соответствии с родом применяемого топлива были разработаны различные методы организации процесса. Из них в книге разбираются: процессы сгорания в газовых и бензиновых двигателях с искровым зажиганием предварительно сжатой горючей смеси; процессы сгорания в нефтяных двигателях (которые называются двигателями Дизеля) со сжатием воздуха, последующим впрыском топлива и его самопроизволь-

ным воспламенением. Процессы других видов, представляющие сейчас в основном исторический интерес, будут также упомянуты вкратце.

11. Процессы сгорания в двигателях различных типов состоят из ряда элементарных (характерных) процессов, законы протекания которых следует изучить прежде всего. После этого необходимо познакомиться с основами химии горения.

ОТДЕЛЬНЫЕ ВИДЫ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ

12. В двигателях имеют место три типичных элементарных процесса сгорания, происходящих или последовательно, или одновременно. В физической химии первые два процесса объединяются термином взрыв и поэтому могут быть названы взрывным сгоранием.

Третий процесс может быть охарактеризован [2] как диффузионное пламя и назван диффузионным горением.

13. Взрывное сгорание может происходить в смесях горючих газов или паров с воздухом, если эти смеси имеют соответствующий состав, и протекать различно — как одновременный или как постепенный взрыв. Первый имеет место в случае, когда в гомогенной по составу и температуре газовой смеси экзотермическая химическая реакция возникает одновременно во всех точках смеси. Так как скорости протекания многих химических реакций увеличиваются с температурой, реакции развиваются с ускорением повсеместно и одновременно до их полного завершения. Этот тип взрыва называется также тепловым взрывом. Он является следствием самопроизвольного воспламенения всей смеси, т. е. воспламенения без участия внешнего источника. В определенный момент времени в смеси будет иметься только одна фаза, а именно, реагирующая смесь.

14. Вторая разновидность взрыва имеет место при воспламенении той же горючей смеси от внешнего источника, например от электрической искры (искровое зажигание). После воспламенения вокруг искры возникает очаг воспламенения и образуется фронт пламени, передвигающийся по смеси с некоторой характерной скоростью, называемой скоростью распространения пламени. В любой рассматриваемый момент времени будут существовать две главные фазы — несгоревшая смесь и сгоревшая

смесь, разделенные зоной реакции, находящейся во фронте пламени.

15. Диффузионное горение происходит в пограничном слое между горючим газом или паром и воздухом при благоприятных условиях, а именно, когда скорость химических реакций и скорость смешения находятся в соответствии. В противоположность взрывному сгоранию при диффузионном горении имеются три основные фазы вещества в один и тот же момент, а именно: горючий газ или

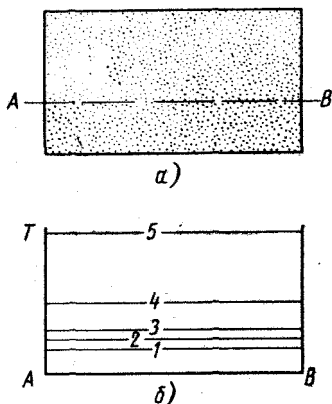


Рис. 6. Одновременный взрыв:

a — сосуд с реагентами; *б* — изменение температуры по длине (*AB*) сосуда в различные моменты времени: 1, 2, 3, 4, 5 — моменты времени

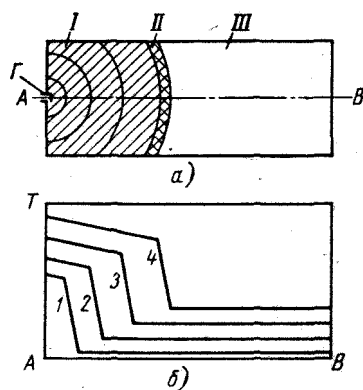


Рис. 7. Постепенный взрыв:

/ — сгоревшая смесь; *//* — горящая смесь; *///* — свежая смесь; *Г* — свеча зажигания (*AB*, *a*, *б*, 1, 2, 3, 4 — см. рис. 6)

пар, воздух и сгоревшая смесь; зона реакции находится между паром и воздухом. Пар может образовываться в ходе процесса с поверхностей капель или пленки жидкости. В дизелях капли образуются в результате распыливания, а пленка — вследствие осаждения топлива на стенках камеры сгорания.

16. На рис. 6, 7 и 8 схематически показаны различные виды процесса сгорания, причем диффузионное горение в струе газа (или обычное диффузионное газовое пламя) приведено для пояснения принципа развития этого процесса. Диффузионное горение характерно также для испаряющейся капли жидкого топлива (рис. 9).

17. Постепенный взрыв имеет место в газовых и бензиновых двигателях с искровым зажиганием, а также и в двигателях других типов, например, в дизелях, в виде

распространения неомогенного теплового взрыва, когда в некоторых частях заряда реакции развиваются быстрее, чем в остальных, и образуются отдельные очаги [воспламенения].

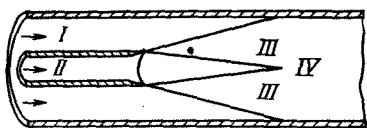


Рис. 8. Схема диффузионного горения в потоке газа и воздуха:

I — воздух; II — газ; III — зона реакции; IV — сгоревшая смесь

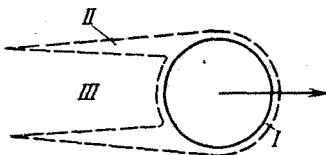


Рис. 9. Схема диффузионного горения испаряющейся капли:

I — пар; II — зона реакции; III — сгоревшая смесь

18. Одновременный взрыв в чистом виде имеет место в последней части несгоревшей смеси в газовых или бензиновых двигателях — в так называемом конечном газе (выражение, введенное Боерледж [3]) и вызывает детонацию. Схематическая иллюстрация детонации, являющейся комбинацией горения двух типов, приведена на рис. 10. В связи с этим представляет интерес сгорание в дизеле в начале процесса, которое для определенных зон носит характер одновременного взрыва, но впоследствии переходит в другие формы горения.

19. Диффузионное горение, в частности, имеет место в дизеле на той стадии, когда горение уже развивается, и топливо, продолжающее впрыскиваться в пламя, испаряется, перегревается и сгорает по мере соприкосновения с воздухом. В наиболее общем виде диффузионное горение встречается в нефтяных горелках непрерывного действия, используемых в котлах, а также при сгорании в газовых турбинах.

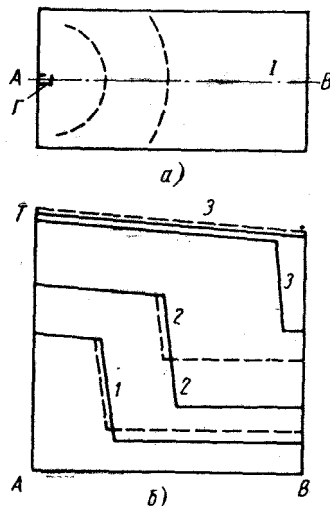


Рис. 10. Явление детонации в двигателе с искровым зажиганием:

I — последняя часть заряда; Г — свеча зажигания (АВ, а, б, 1, 2, 3 — см. рис. 6). Сплошные линии — сгорание без детонации, штриховые линии — сгорание с детонацией

ОДНОВРЕМЕННЫЙ ВЗРЫВ (ОБЪЕМНОЕ САМОВОСПЛАМЕНЕНИЕ)

20. Рассмотрим простейший случай чисто теплового взрыва. Первоначальное рассмотрение его выполнено Вант-Гоффом. В дальнейшем теория теплового взрыва была развита Н. Н. Семеновым и его школой, а также Иостом [4].

При рассмотрении теплового взрыва принимают, что в газовой смеси идет экзотермическая реакция; считают, что в данный момент газовая смесь гомогенна как по составу, так и по температуре; предполагают, что скорость выделения тепла $\frac{dq_1}{d\tau}$ всегда прямо пропорциональна скорости реакции. Последняя считается возрастающей с температурой по экспоненциальному закону. Поэтому

$$\frac{dq_1}{d\tau} = C_1 e^{-\frac{E}{RT}},$$

где E — энергия активации;
 R — газовая постоянная;
 T — абсолютная температура.

21. Энергия активации может рассматриваться как энергия, которую необходимо затратить для того, чтобы далее могла выделиться теплота реакции E' . Поэтому количество произведенного тепла равно $E' - E$. В случае, если эта разность положительна, реакция экзотермична; в противном случае реакция эндотермична. Теплота реакции E' является энергией активации для реакции, идущей в обратном направлении.

22. Увеличение температуры сопровождается потерей тепла в окружающую среду, имеющую температуру T_0 . Эта потеря в наипростейшем случае может быть выражена формулой

$$\frac{dq_2}{d\tau} = C_2 (T - T_0)^*.$$

Приведенные выше два основных уравнения могут быть представлены графически (рис. 11). На рисунке показана одна зависимость $\frac{dq_2}{d\tau}$ от температуры и зависимости $\frac{dq_1}{d\tau}$ от температуры при трех значениях C_1 . Из графика сле-

* Усложнения, связанные с появляющимся вследствие этого теплообмена температурным градиентом, пока не рассматриваются.

дует (кривая 2), что при температурах ниже $T_2 \frac{dq_1}{d\tau} > \frac{dq_2}{d\tau}$,

т. е. в результате реакции температура смеси будет расти от начальной T_0 до температуры T_2 , при которой достигается равновесие между выделением и потерями тепла. Поэтому реакция не сможет более ускоряться, хотя и будет продолжаться, т. е. настоящего взрыва не произойдет. Если скорость выделения тепла при всех температурах больше скорости потерь тепла (кривая 3), то реакции ускоряются, и происходит взрыв. Кривая 1 представляет граничный случай, когда при температуре T_1 кривая тепловыделения и прямая теплоотвода касаются — имеет место неустойчивое состояние.

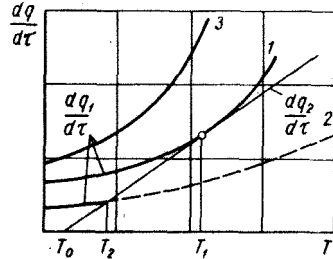


Рис. 11. Самопроизвольные воспламенения при наличии тепловых потерь

Из приведенного следует, что для каждой определенной реакции при данных условиях теплообмена существует начальная температура T_0 , определяющая границу воспламенения.

Она называется температурой самопроизвольного воспламенения (или температурой самовоспламенения). Для возможности быстрого развития реакции начальная температура должна быть значительно выше этого граничного значения. При практическом определении минимальной температуры самовоспламенения взрыв происходит спустя секунды и даже минуты после начала реакции. Однако применительно к двигателям внутреннего сгорания интересны только взрывы, происходящие за время, равное 0,001—0,01 сек.

23. Вследствие того, что химические реакции, происходящие в действительности, имеют очень сложный механизм, как правило, нет четкого соответствия между поведением вещества при граничных условиях, например, при определении температуры самовоспламенения, и поведением его в условиях двигателя. Поэтому для оценки топлив для двигателей лучше испытывать их на реальных двигателях (октановое число, цетановое число).

24. Влияние давления, которое очень существенно для явлений, происходящих в двигателях, может быть учтено

следующим образом. Выражение $C_1 e^{-\frac{E}{RT}}$ содержит в C_1 функцию $f(p)$, так как концентрация реагентов влияет на скорость реакции. Если смесь состоит из двух компонентов, то $f(p) = \beta p^2$. Из этого следует, что T_0 и p взаимосвязаны, и в простейшем случае для граничных условий зависимость имеет вид кривой, показанной на рис. 12.

В действительности величина $\frac{dq_1}{d\tau}$ не является простой функцией температуры T , но также зависит от времени τ и многих других факторов. Эта более сложная зависимость объясняется тем, что реакции идут между постоянно меняющимися реагентами. В случае углеводородных топлив приведенная выше зависимость очень усложняется. Реакции только начинаются с углеводородами определенного состава, но очень скоро образуются промежуточные продукты со специфическими свойствами, оказывающие существенное влияние на процесс в целом.

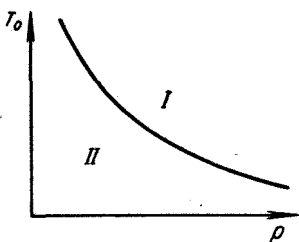
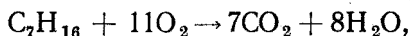
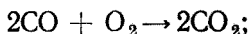
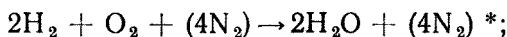


Рис 12. Зависимость температуры самовоспламенения T_0 от давления:

I — область взрыва; II — область отсутствия взрыва

25. Поясним сказанное, рассмотрев механизм реакции сгорания. Уравнения реакции сгорания, такие как, например:



показывают не механизм реакции, а лишь ее конечный результат, и то при определенных условиях. При очень высоких температурах происходит частичная диссоциация продуктов сгорания, вследствие чего образуются определенные количества CO и H_2 . При низких температурах реакции не идут совсем или протекают не до конца. При составах смеси, не соответствующих составу, приведенному в уравнениях, можно получить результат, отличный от показанного выше, особенно при избытке топлива.

* Сумма $\text{O}_2 + 4\text{N}_2$ представляет смесь, состав которой приближенно соответствует составу воздуха.

26. Даже очень простое рассмотрение механизма реакций приводит к необходимости ввести понятие о цепной реакции. Наипростейшая реакция типа $2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ не может произойти мгновенно. Вначале молекулы реагируют с молекулами или частями молекул, так называемыми радикалами (а также атомами), имеющими одну или более свободные валентности (такими как $-\text{CH}_3$, $\equiv\text{CN}$, $-\text{H}$, $=\text{O}$), причем и те и другие должны к тому же обладать необходимой энергией. Энергия молекул, которую здесь необходимо принимать во внимание, это их кинетическая энергия, включающая в себя энергию поступательного, колебательного и вращательного движений. В случае полного равновесия энергия равномерно распределена по всем степеням свободы. Энергия поступательного движения в представляющем интерес диапазоне температур до 3000°K может быть выражена через «температуру» газа. Сопутствующее большее или меньшее количество энергии вращательного и колебательного движений проявляется через теплоемкость вещества, которая растет при увеличении сложности молекулы и при повышении температуры.

Колебательное движение особенно важно с точки зрения скорости реакций, так как при увеличении количества атомов в молекуле число степеней свободы колебательного движения начинает превосходить число степеней свободы движений остальных видов, в связи с чем возрастает вероятность разрушения какой-либо из внутримолекулярных связей.

27. Энергия радикалов, имеющих свободные валентности, принимается эквивалентной кинетической энергии молекул, следовательно, радикал может быть носителем энергии даже в состоянии покоя.

28. Опыт показывает, что сумма кинетических энергий и энергий свободных валентностей двух сталкивающихся молекул, радикалов и атомов должна превосходить упомянутую выше энергию активации E ожидаемой реакции для того, чтобы эта реакция могла произойти.

Средняя энергия частицы газа обычно значительно ниже энергии активации, но не все частицы обладают энергией, равной среднему значению; очень важно, что имеется определенная доля частиц, обладающих значительно большей энергией, в результате чего энергия соударения таких частиц может превзойти энергию актива-

ции E . Это так называемые активные частицы. Они могут присутствовать в газе даже при низких температурах. При более высоких температурах средняя энергия молекул растет, и вероятность того, что отдельные частицы будут обладать энергиями, достаточными для реакции, значительно увеличивается.

Активными частицами являются практически все радикалы и очень быстродвигающиеся молекулы.

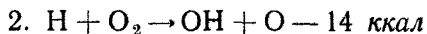
29. С ростом температуры число столкновений частиц также растет. Оно зависит от средней длины свободного пробега, количества, скорости и размеров молекул. Число столкновений очень велико и достигает значений в пределах от 10^9 до 10^{10} в секунду при нормальных температуре и давлении. Поэтому даже в интервалы времени, равные от 10^{-3} до 10^{-2} сек, число столкновений составляет по меньшей мере от 10^6 до 10^7 . Именно этим объясняется столь быстрое завершение таких сложных процессов, какими являются процессы сгорания.

30. В случае столкновения частиц с достаточно высокой энергией, в котором участвует, например, лишь одна активная частица, нередко ничего существенного не происходит, так как любая вновь образовавшаяся молекула не может сама аккумулировать столь большую энергию и быстро разрушается. Поэтому нужна третья молекула, которая либо участвует в столкновении одновременно с двумя упомянутыми выше, либо, спустя очень короткое время (10^{-13} сек), поглощает часть выделившейся энергии. Только в случае тройного соударения (а оно происходит порядка одного раза из тысячи) новая молекула после образования сможет существовать. Еще более сложное, например четвертное, соударение могло бы быть эффективным, но вероятность его ничтожна.

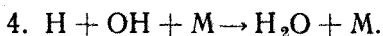
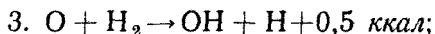
31. Продолжая разбирать случай реакции $2\text{H}_2 + \text{O}_2$, придется предположить участие в ней также по меньшей мере радикала OH и атомов O и H . При использовании в качестве окислителя воздуха в реакциях может также участвовать N_2^* . При столкновениях происходят различные реакции, каждую из которых можно представить,

* Азот N_2 обладает химической стабильностью, и в определенном интервале температур практически не образуются атомы азота. В то же время в продуктах сгорания найдены в небольших количествах окислы азота.

как это сделано ниже, с учетом теплоты реакции, отнесенной к одному молю:



(эта реакция требует для осуществления большой энергии активации);



Последняя реакция представляет собой типичный пример реакции тройного соударения, когда H_2O продолжает существовать вследствие наличия случайной молекулы M , поглотившей излишнюю энергию (такой молекулой может быть N_2).

32. Цепная реакция была открыта Кристиани, Полиани и Херцфельдом в 1919 г. и изучена позднее Н. Н. Семёновым.

Сущность цепной реакции заключается в том, что раз образовавшееся число активных центров неизменно восстанавливается и поддерживается в ходе последующих столкновений, вследствие чего реакция идет с неизменной скоростью, даже если не происходит значительного тепловыделения и температура остается неизменной. Это положение было бы применимо в случае бесконечного пространства, так как если две активные частицы сталкиваются на стенке сосуда, то их избыточная энергия будет потеряна, не будет образовано новой активной частицы, и цепь реакции будет разорвана. Под термином «стенка» следует понимать не только поверхности сосуда, в который заключены реагенты, но и инертные молекулы, упомянутые выше, которые воспринимают энергию при тройном столкновении. Четвертая реакция, приведенная в абзаце 31, и является примером такого обрыва цепи.

Несмотря, однако, на обрывы цепи, имеется множество реакций, которые проходят на практике непрерывно и даже с ускорением. Это происходит из-за:

1) тепловыделения, которое приводит к росту температуры и, как следствие, увеличению числа активных частиц;

2) разветвления цепи.

Под разветвлением цепи понимается увеличение числа активных частиц при определенных механизмах реакций (см. реакции 2 и 3 в абзаце 31).

33. Ввиду высокой частоты столкновений реакция, при которой происходит разветвление цепи, могла бы очень быстро достигнуть почти бесконечно большой скорости. Этого, однако, не происходит из-за наличия реакций, ведущих к обрыву цепи. Тем не менее в принципе именно реакции, сопровождающиеся разветвлением цепей, имеют место при всевозможных взрывах (взрывах, связанных с химическими реакциями, рассмотренными выше, или при ядерных реакциях).

При большом процентном содержании азота N_2 в горючей смеси в двигателях внутреннего сгорания доля реакций на «стенке» и, следовательно, число обрывов цепей велико. Но реакции, идущие в двигателях, в высокой степени экзотермичны, и, как следствие, происходит значительное увеличение температуры смеси и числа активных частиц. Действительная скорость реакции, однако, всегда на один или более порядков меньше теоретически возможной (из-за эффекта «стенок»).

34. Самопроизвольная реакция в двигателях внутреннего сгорания принципиально возникает в двух случаях:

а) когда реагенты смешиваются при температуре, при которой реакция еще не идет с ощутимой скоростью; после этого температура смеси повышается (обычно сжатием) до значения, при котором реакция может начаться (это имеет место, например, в случае детонации или в маленьких двигателях, предназначенных для авиамodelей; некоторое время мотовелосипеды снабжались аналогичными двигателями);

б) когда воздух нагревается до высокой температуры сжатием и в него впрыскивается топливо (дизели). В этом случае совершенной гомогенизации смеси не достигается.

35. В смеси всегда образуются активные частицы, особенно из кислорода O_2 и горючих газов, таких как CO и H_2 ; молекулы углеводородов также могут находиться в активном состоянии или давать радикалы в результате разрыва внутренних связей в процессе колебаний. При температурах выше $250^\circ C$ число образующихся активных частиц увеличивается до такой степени, что для большого числа горючих газов и паров происходящие из-за наличия активных частиц реакции могут оказывать влияние на

процесс сгорания (даже при значительно более низких температурах, например при 100°C , эти реакции влияют на такие процессы, как старение масла, для развития которых имеются более длительные интервалы времени). 36. Когда экзотермический характер реакции становится явным, развитие процесса (каким бы ни был сложным механизм реакции) будет походить на настоящий тепловой взрыв, рассмотренный выше. Однако в начальный период, когда подъем температуры еще очень невелик, возможны существенные отличия вследствие того,

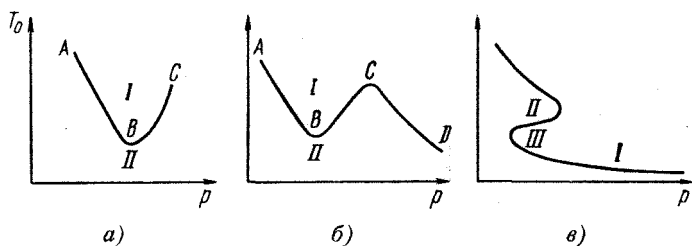


Рис. 13. Зависимости температуры самовоспламенения T_0 от давления:

I — область взрыва; II — область отсутствия взрыва; III — область эффективного применения тетра-этилсвинца

что влияние температуры, концентрации реагентов, эффекта стенки и прочих факторов на различные реакции неодинаково. Это будет отражаться на зависимостях T_0-p , принимающих вид, показанный на рис. 13, а, б, в. В то время как ветвь AB (рис. 13, б) в достаточной мере похожа на зависимость, наблюдающуюся при тепловом взрыве, ветви BC отвечают другой зависимости. Это может быть связано, например, с возрастающим при изменении давления влиянием обрыва некоторых цепей. За подобным участком может последовать (рис. 13, б) ветвь CD , снова ограничивающая зону чисто теплового взрыва. Столь сложный характер поведения многих углеводородов может привести к наличию двух температур самовоспламенения в области низких давлений.

37. Рассмотрим протекание процесса объемного самовоспламенения исходя из зависимости количества выделившегося тепла от времени. Для этой цели реакция может в первом приближении рассматриваться происходящей адиабатно (в дальнейшем особо рассмотрим

влияние подвода и отвода тепла в начальной фазе процесса). При больших упрощениях Тодес, принадлежащий к школе, основанной Н. Н. Семеновым, подсчитал для чисто теплового взрыва изменения температуры от времени и таким образом подошел к концепции типичного развития подобных взрывов в двигателях внутреннего сгорания.

Был рассчитан интервал времени, в течение которого температура возрастает до $(1 + \frac{1}{\alpha_1})T_0$, где $\alpha_1 = \frac{E}{RT_0}$.

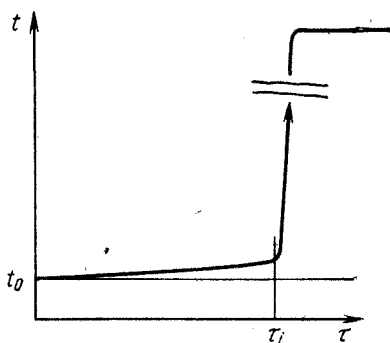


Рис. 14. Иллюстрация понятия о периоде индукции τ_i

Этот интервал, называемый периодом индукции τ_i , является очень важной характеристикой процесса, так как остальная часть реакции происходит в течение очень короткого промежутка времени. Кривая температура — время ($t-\tau$) имеет вид, показанный на рис. 14, причем тепловыделение за период индукции составляет от одного до двух процентов всей теплоты реакции.

Так как при взрыве газа повышение температуры всегда вызывает рост давления, можно характеризовать самовоспламенение периодом задержки, за которым следует быстрый рост давления с уже неконтролируемой скоростью. Два наиболее важных случая возникновения стука при сгорании — в начале сгорания в дизеле и при детонации в бензиновом двигателе — объясняются рассмотренными выше характерными особенностями одновременного взрыва.

38. Также характерным для одновременного взрыва является то, что влияние химического состава топлива и других факторов на скорость реакции обычно проявляется через влияние их прежде всего на период индукции. Очень слабая степень превращения веществ в течение периода индукции объясняет тот факт, что очень малые концентрации некоторых специфических веществ могут существенно сокращать или удлинять этот период. Такие специфические добавки называются присадками.

Одной из присадок является ТЭС (тетраэтилсвинец), эффективно подавляющий детонацию, так как его добавка увеличивает длительность индукционного периода одновременного взрыва (самовоспламенения) бензина. Таким образом задерживается объемное самовоспламенение, вследствие чего постепенный взрыв завершается без каких-либо нарушений (см. абзац 18, рис. 10). Процесс может быть понят при рассмотрении диаграмм давление — время (рис. 15), где показан характер изменения давления в двух случаях: при отсутствии детонации (кривая *A*) и в случае, когда непосредственно перед концом нормального завершения сгорания происходит самовоспламенение конечной части заряда (кривая *B*). На рис. 15 τ_3 — момент пробоя искрового промежутка.

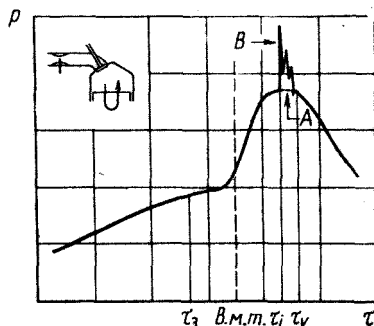


Рис. 15. p — τ -диаграмма двигателя с искровым зажиганием при детонации

39. Следует иметь в виду, что конечная часть заряда первоначально сжимается за счет движения поршня, а в дальнейшем горящими и, как следствие, расширяющимися газами. Поэтому она сжимается почти до максимального давления сгорания. Момент времени τ_b , когда наступает самовоспламенение, может быть установлен с удовлетворительной точностью, в то время как применение концепции «период индукции» дает менее удовлетворительные результаты, так как нет начала отсчета, если только не выбрать его как момент смещения топлива и воздуха в карбюраторе. В этот момент, однако, температура обоих компонентов так низка, что в смеси не могут идти сколь-нибудь заметные реакции. Реакции приобретают ощутимое значение только в сильно нагретом впускном трубопроводе или позднее, когда смесь приходит в соприкосновение с горячими деталями внутри цилиндра, или же в результате последующего сжатия. Однако отсчет начала периода индукции с момента соприкосновения смеси с этими деталями также мало оправдан, так как скорости реакций вначале (в период впуска и даже в пе-

риод большей части процесса сжатия) очень низки. Типичной характеристикой детонации является координация момента ее начала τ_c по отношению к периоду нормального постепенного взрыва (распространения пламени).

Если τ_v является тем моментом, когда сгорание могло бы закончиться, если бы не было детонации, то единственным требованием для получения нормального процесса сгорания является условие, чтобы τ_c не наступало ранее τ_v . Совсем не требуется какими-либо мерами подавить полностью возможность самовоспламенения. Нужно только на какое-то мгновение оттянуть момент его возникновения при данных конкретных условиях. Это оказывается практически возможным вследствие соответствующего выбора углеводородов, добавки антидетонационных присадок, таких как ТЭС, и других мер, которые приводят к уменьшению температуры заряда (использование богатой смеси, определенные конструктивные мероприятия). Эти меры будут рассмотрены ниже.

Расчет момента τ_c в условиях двигателя возможен при столь грубых упрощениях, что результат его не имеет практического значения. Рассмотрим влияние некоторых важных факторов на период индукции.

40. 1. Температура. По определению (абзац 22) $\tau_i = \infty$, если $T < T_o$. Начиная с T_o и выше, τ_i уменьшается по экспоненте.

41. 2. Концентрация реагентов. В общем случае τ_i уменьшается при увеличении концентрации реагентов, в том числе и тогда, когда это происходит за счет увеличения плотности заряда в камере сгорания. В случае сгорания в дизеле, где, как известно, топливо впрыскивается в воздух, находящийся при высокой температуре, зависимость периода индукции от давления доказана экспериментально (абзац 263). Что касается детонации в бензиновом двигателе, то аналогичная зависимость менее определена, так как в этом случае в период предварительных (так называемых предпламенных) реакций различные углеводороды по-разному реагируют на изменение давления.

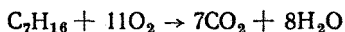
Очень важным фактором является соотношение топлива и воздуха в смеси.

Состав смеси в данной книге оценивается коэффициентом «крепости смеси» KC (или, что то же, коэффициентом использования

воздуха, являющимся обратной величиной коэффициента избытка воздуха α):

$$KC = \frac{\text{действительное отношение веса топлива к весу воздуха}}{\text{теоретическое отношение веса топлива к весу воздуха, необходимое для полного сгорания}}$$

В случае гептана, например, из уравнения реакции его с кислородом



следует, что для теоретически полного сгорания одного моля (100 г) гептана нужно 11 молей кислорода (352 г) или около 1,51 кг воздуха. Следовательно, стехиометрическое отношение топлива к воздуху составляет 1 : 15,1. При этом $KC = 1$.

В дизеле оптимальный состав смеси, как правило, образуется где-либо локально уже почти в начале процесса впрыска, а в период впрыска имеется весь предел составов от чистого воздуха до чистого топлива. Об оптимальном для воспламенения значении состава смеси мало что известно; он может быть принят соответствующим коэффициенту использования воздуха, по меньшей мере равному 1. В бензиновых двигателях смесь определенного состава равномерно распределена по камере, причем состав смеси зависит от многих факторов. Эффект его — сложного характера (например, имеется охлаждающий эффект при богатой смеси) — будет рассмотрен ниже.

42. 3. Состояние движения воздушного заряда. В случае гомогенной смеси турбулизация не может оказать влияния на протекание реакции, так как реакция происходит равномерно во всех точках объекта. В действительности турбулизация может влиять на теплообмен со стенкой. При гетерогенной смеси дополнительно к этому за счет движения заряда улучшается равномерность распределения топлива в воздухе. Следовательно, уменьшение или увеличение τ_i при турбулизации будет зависеть от того, идут ли реакции на начальном этапе с подводом или отводом тепла. При рассмотрении сгорания в дизеле будет показано, что улучшение равномерности распределения топлива в воздухе может означать потерю очага оптимального состава смеси (коэффициент использования воздуха 1 или более) и как возможный результат — увеличение τ_i (абзац 271),

ПОСТЕПЕННЫЙ ВЗРЫВ (РАСПРОСТРАНЕНИЕ ПЛАМЕНИ)

43. На рис. 16 схематически изображен некоторый момент постепенного взрыва, причем взрыв распространяется слева направо в пространственном элементе газовой смеси. Справа горючая смесь находится в начальном состоянии; в следующей зоне происходит реакция, в то время как слева находится сгоревшая смесь. Линия $T_{сг}—T_{нсг}$ представляет изменение температуры при сгорании. Необходимо не забывать, что понятие «температура», строго говоря, применимо только к равновесным состояниям, так что свойства смеси в зоне реакции не могут быть полностью охарактеризованы какой-либо температурой в интервале между $T_{нсг}$ и $T_{сг}$. Вскоре после окончания сгорания или недалеко за фронтом пламени достигается равновесное состояние. Температура $T_{сг}$ может быть подсчитана на основании термодинамических данных.

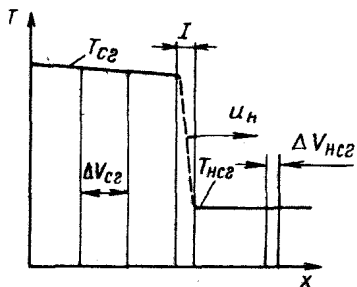


Рис. 16. Характер распределения температур по длине сосуда в определенный момент постепенного взрыва, распространяющегося в направлении X в неподвижной смеси: / — зона реакции (стрелкой показано направление распространения пламени)

Предположим сначала, что имеется идеальный газ, в котором происходит изменение температуры. Заметим, что на практике отношение $\frac{T_{сг}}{T_{нсг}}$ может принимать значения от 3 до 6. Поэтому элемент объема ΔV в процессе сгорания подвергнется более или менее внезапному расширению от $\Delta V_{нсг}$ до $\Delta V_{сг}$, пропорциональному повышению температуры, если принять, что давление остается неизменным. Такое предположение допустимо даже в случае ограниченного объема при условии, что рассматриваются моменты времени непосредственно до сгорания и сразу после сгорания слоя смеси, имеющего толщину зоны сгорания. Последняя в условиях двигателей мала в сравнении с общими размерами камеры сгорания.

44. Результатами расширения зоны сгорания являются: импульс, оказываемый расширяющимся при сгорании слоем смеси на сгоревшие и несгоревшие части

заряда, и определенное перемещение газов. Эти явления типичны для случая постепенного взрыва.

45. Теоретическое рассмотрение интенсивности импульса, создаваемого при сгорании, ведет к разделению общего случая распространения горения на два типа. В первом, нормальном для поршневых двигателей случае реакции развиваются относительно медленно и давление в зоне реакции остается, в сущности, неизменным. При этом импульс слаб и распространение пламени происходит за счет теплопроводности и диффузии радикалов. Во втором случае в результате внезапности реакции имеет место кратковременное повышение давления в зоне реакции, вследствие чего создается импульс высокого значения, оказывающий влияние на распространение реакции.

В первом случае скорость фронта пламени лежит в пределах от нескольких десятков сантиметров до нескольких десятков метров в секунду. Во втором же она достигает значений, превышающих скорость звука; при этом реакция идет в детонационной волне, возникшей в результате самого сгорания и распространяющейся за счет сжатия во фронте волны. Появлению такой детонационной волны должен обязательно предшествовать определенный период нормального распространения пламени.

46. Детонационная волна хорошо известна из литературы по исследованию сгорания в длинных трубах, причем идентичность названия с явлениями детонации в бензиновых двигателях ведет к изрядной путанице. Для уменьшения этой путаницы и учитывая, что детонационная волна (открытая Бертелло—Вьиле и Малард—Ле Шателье., описанная Диксоном и в дальнейшем исследованная многими другими [4]) не наблюдается при сгорании в двигателях из-за небольшого пути пробега фронта пламени, в дальнейшем она рассматриваться не будет. Применение термина «детонация» в обоих случаях связано просто с аналогичным звуковым эффектом.

47. Для дальнейшего рассмотрения примем во внимание то, что в результате процесса сгорания, протекающего в элементарной части пространства горения, соответствующая часть объема газа расширяется, и это способствует как общему увеличению давления, так в равной степени перемещению газовой смеси и продуктов сгорания в камере сгорания.

48. Скорость сгорания просто определить методом мыльных пузырей, когда осуществляется центральное зажигание [4]. В случае, когда горючая смесь находится

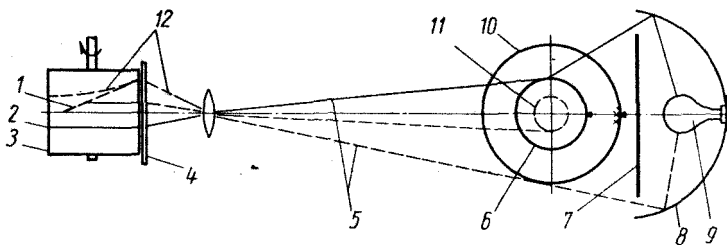


Рис. 17. Схема для измерения скорости распространения пламени по методу мыльного пузыря, предложенного Беккером:

1 — след пламени; 2 — след первоначального диаметра пузыря; 3 — пленка на барабане; 4 — Щель и затвор камеры; 5 — отраженный свет; 6 — пузырь первоначального диаметра; 7 — экран; 8 — рефлектор; 9 — источник света; 10 — пузырь конечного диаметра; 11 — фронт пламени; 12 — след диаметра пузыря

в состоянии покоя, скорость сгорания по отношению к горючей смеси называется нормальной скоростью сгорания. Из-за упомянутых перемещений не эта скорость

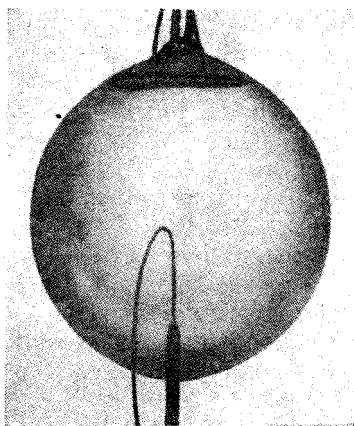


Рис. 18. Мыльный пузырь Беккера, подготовленный для центрального зажигания

наблюдается непосредственно на вращающемся зеркале или экране. Наблюдается видимая скорость, которую назовем для большей точности изложения видимой скоростью пламени (не «сгорания»). Если смесь находится в состоянии турбулентного движения, то скорость распространения пламени может значительно превышать нормальную скорость сгорания, так как она включает компоненты скорости самого газа. Именно поэтому предпочтителен термин «скорость пламени». Среднюю скорость пламени в направлении, перпендикулярном к фронту пламени (или части фронта пламени, достаточно большой для осреднения) по отношению к несгоревшей смеси, назовем действительной или абсо-

лутной скоростью пламени. Если смесь находится в покое, эта скорость обычно идентична нормальной скорости сгорания.

49. Метод мыльных пузырей, предложенный Беккером (рис. 17, 18 и 19, а, б), является простейшим методом

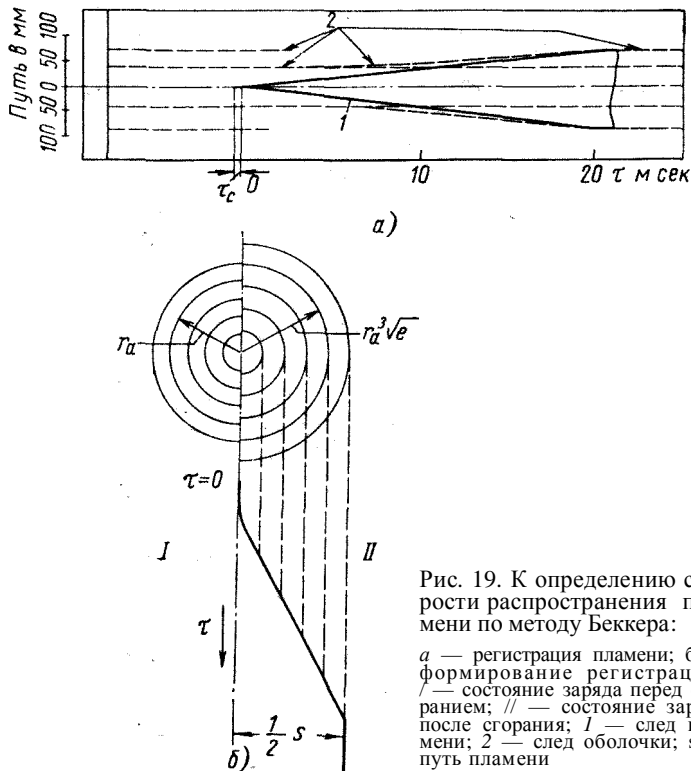


Рис. 19. К определению скорости распространения пламени по методу Беккера:

а — регистрация пламени; б — формирование регистрации; / — состояние заряда перед сгоранием; // — состояние заряда после сгорания; 1 — след пламени; 2 — след оболочки; s — путь пламени

получения сферического распространения взрыва при постоянном давлении. В числе других Фиок и его сотрудники, используя этот метод, провели очень точные измерения скоростей и температур пламени [2, 4].

При применении этого метода каждый сферический слой подвергается последовательно воздействию возрастающего давления изнутри, и мыльный пузырь расши-

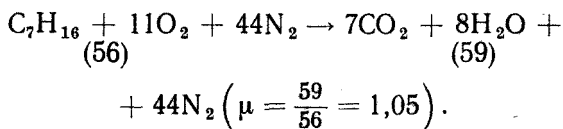
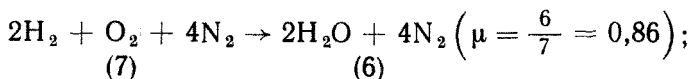
рется приблизительно по следующему закону: степень расширения

$$e = \frac{\Delta V_{ce}}{\Delta V_{нсе}} = \frac{T_{ce}}{T_{нсе}} \mu,$$

где μ — коэффициент молекулярного изменения или отношение числа молей после и до сгорания.

Этот коэффициент может существенно различаться в действительных процессах сгорания.

Пример:



После сгорания каждая сфера, имевшая радиус r_a , занимает сферу с радиусом $r_a \sqrt[3]{e}$ (рис. 19, б), причем только сгоревшая часть с радиусом $r = r_a \sqrt[3]{e}$ оказывается видимой. Выяснилось, что после короткого начального периода устанавливается постоянная видимая скорость пламени $v_s = \frac{dr}{dt} = \text{const}$. Так как $dr = dr_a \sqrt[3]{e}$, то абсолютная скорость пламени $v_a = v_s \frac{1}{\sqrt[3]{e}} = \text{const}$, чего и следовало ожидать, так как условия сгорания смеси остаются неизменными. Исключение составляет только смесь, расположенная непосредственно вокруг электродов, где сильное искривление поверхности сферы может приводить к более благоприятным условиям охлаждения и соответственно к меньшей скорости распространения пламени.

50. Явления воспламенения и распространения пламени оказываются значительно более сложными и в большей мере приближающимися к имеющим место в двигателе в случае сферической бомбы с центральным зажиганием, использованной Льюисом и фон Эльбе, которые рассмотрели, в частности, количественный пример взрыва озона [2]. В этом случае наблюдения проводились не

с помощью кинорегистрации, а путем точных замеров давления (рис. 20, а) и соответствующих расчетов. Этот метод отличается от метода мыльного пузыря тем, что в случае использования мыльных оболочек сгорание могло вызывать расширение несгоревшей сферической оболочки при пренебрежимо малом увеличении давления, в то время как бомба препятствует расширению. Диа-

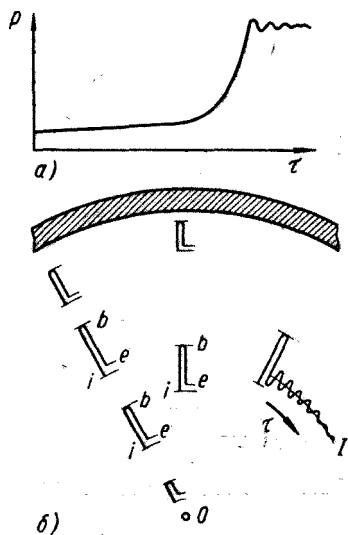


Рис. 20. Исследование процесса сгорания в бомбе Льюиса и фон Эльбе:

а — регистрация давления газа; б — схема движения газа в различных точках объема; / — равновесное состояние

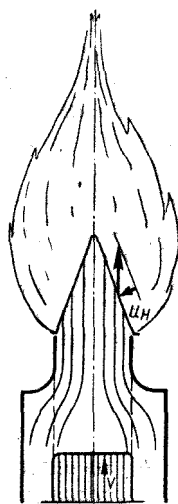


Рис. 21. К определению скорости распространения пламени с помощью горелки Бунзена

грамма давления в бомбе в каждый момент времени⁴ отвечает давлению сгорающего слоя газа и одновременно также является давлением сжатия как не сгоревшего, так и уже сгоревших газов. Первоначально процесс развивается почти так же, как и в случае мыльных оболочек. Однако радиальное расширение быстро уменьшается по мере развития сгорания по сравнению с тем, которое имеет место при сгорании внутри мыльной оболочки. Учитывая заметное повышение общего давления в бомбе, легко понять, что сгорание каждого последующего сферического слоя газа вызывает сжатие как несгоревшей

смеси, так и той части заряда, которая уже сгорела раньше. Из рис. 20, б видно, что в период, когда сгорание распространяется от центра O до конкретной элементарной части заряда, последняя движется по направлению от центра до момента, когда ее нагоняет фронт пламени (точка b) и она начинает гореть (i — начальное положение каждой из элементарных частей газа). После этого сгорание происходит вне сферического слоя, к которому принадлежит рассматриваемая малая часть заряда, и последняя будет двигаться по направлению к центру до положения e , являющегося конечным.

51. Конечное положение элементарной малой части заряда не совпадает полностью с начальным. Температура частей заряда, лежащих ближе к центру и, следовательно, сгоревших раньше, относительно выше температуры частей заряда, лежащих ближе к оболочке бомбы. Это может быть объяснено тем, что часть газа, сгорающая в первую очередь, горит при давлении p_0 , и температура ее возрастает с T_0 до $T_0 + \Delta T$. Затем следует сжатие до конечного давления p_k , когда температура

$$T_k = (T_0 + \Delta T) \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k_1 - 1}{k_1}},$$

где k_1 — показатель адиабаты, относящийся к продуктам сгорания.

Газ, сгорающий в последнюю очередь, сначала сжимается от состояния, определяемого давлением p_0 и температурой T_0 , до состояния, характеризуемого давлением p_k и температурой

$$T_c = T_0 \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}},$$

где k_2 — показатель адиабаты, относящийся к несгоревшей смеси

После сгорания температура

$$T_k = T_0 \left(\frac{p_k}{p_0} \right)^{\frac{k_2 - 1}{k_2}} + \Delta T.$$

При этом принимается, что теплоемкость неизменна. В случае реального газа будут иметь место некоторые небольшие отклонения от значений, подсчитанных с таким допущением.

В зависимости от природы рассматриваемой газовой смеси и начальных условий, разница в температуре газа, сгорающего в начале и конце процесса, лежит в пределах $300\text{—}700^\circ\text{C}$. В двигателях с искровым зажиганием отличие температуры части газа, сгорающей в начале процесса, от температуры части газа, сгорающей в конце, достигает $300\text{—}400^\circ\text{C}$, причем газ, сгорающий первым, имеет наивысшую температуру.

52. Описанное в предыдущем абзаце движение газа не имеет места в непосредственной близости от стенок сосуда и поэтому оно не вызывает дополнительных потерь от конвекции. Кроме того, в целом потери от конвективного теплообмена имеют небольшое значение, так как стенки не омываются горячими газами до момента, когда сгорание заканчивается. В конце сгорания имеет место скачок: фронт пламени, приближающийся с конечной скоростью и толкающий назад газ также с конечной скоростью, останавливается теоретически мгновенно у стенки. Результатом является возникновение концентрических колебаний массы газа вокруг положения равновесия e , проиллюстрированное на рис. 20, *б* и заметное также на диаграмме давления (рис. 20, *а*). Рассмотрение последней с точки зрения динамического эффекта сил давления газа показывает, как и следовало ожидать, что характер роста давления неблагоприятен для практики. Рост давления происходит неравномерно, выделение наибольшей энергии оказывается сдвинутым в значительной мере к моменту завершения процесса.

53. При рассмотрении методов определения нормальной скорости сгорания следует упомянуть также метод горелки Бунзена, при котором измерения производятся в условиях ламинарного течения газовой смеси. При определенной форме выходного отверстия горелки (рис. 21) образуется стационарный конический фронт пламени. Измеряя угол конуса и зная скорость смеси v на выходе из горелки, можно определить нормальную скорость сгорания u_n , как показано на рис. 21.

54. Механизм постепенного взрыва, по существу, такой же, как тот, с которым мы уже познакомились, а именно — цепные реакции с участием радикалов.

Большое отличие от одновременного взрыва состоит, однако, в том, что в данном случае имеется обильный источник радикалов и других активных (быстродвижу-

щихся частиц) во фронте пламени. В нем происходят реакции, связанные с полным выделением скрытой химической энергии смеси. При этом в большом количестве образуются радикалы, остальные частицы ускоряются — имеет место интенсивный перенос энергии и частиц в направлении к несгоревшему газу. Поэтому последний нагревается и активируется, в результате чего в нем реакция

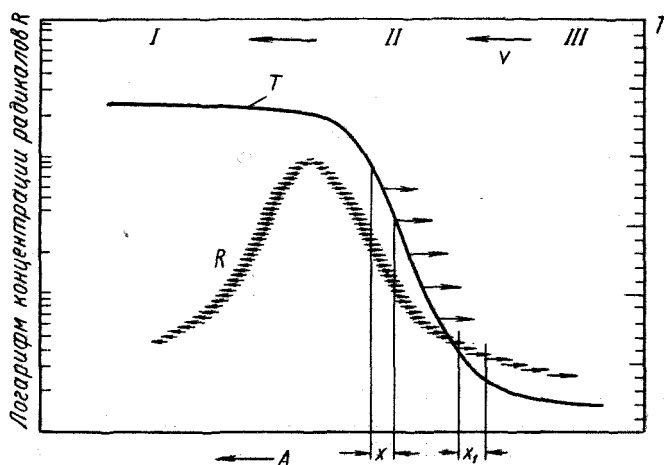


Рис. 22. Схема механизма распространения пламени при пространственной цепной реакции:

I — зона со стойкими продуктами сгорания; II — зона реакции; III — зона со свежей смесью. Стрелкой A показано направление движения фронта пламени; стрелками от сплошной кривой — направление передачи теплоты. χ — видимый фронт пламени; χ_c — критическая зона или истинный фронт пламени

начинается быстро. При атмосферном давлении и более высоких давлениях свободный пробег диффундирующих частиц невелик, но имеет место интенсивный обмен вследствие пространственной цепной реакции (рис. 22), при которой непрерывно образуются новые радикалы. Эта цепь распространяется от сгоревшего к несгоревшему газу; где-то вблизи несгоревшего газа достигается критическая концентрация радикалов, вследствие чего реакция распространяется в эту зону, не встречая сопротивления. Из-за необычно высокой концентрации радикалов во фронте пламени здесь не представляется возможным

применение концепции температуры, поэтому чисто тепловая теория распространения пламени представляется недостаточной.

55. При постепенном взрыве источник радикалов находится в сгорающей газовой смеси, где реакция развилась значительно и, как следствие, температура очень высока (на практике доходит до $1500\text{--}2500^\circ\text{C}$). Поэтому легко понять, что эти радикалы отличаются по природе от тех, которые являются причиной развития одновременного взрыва, так как при столь высоких температурах в наличии оказываются только очень простые части первоначально существовавших сложных молекул. Поэтому исходная структура углеводородов не является более решающим фактором. Более важен в данном случае элементарный состав или, еще проще, отношение содержания углерода к содержанию водорода. В самом деле, очень важной оказывается максимальная концентрация атомов водорода, так как при равной кинетической энергии они, будучи наиболее легкими частицами, обладают наибольшей скоростью (почти в 4 раза большей, чем скорость любого другого радикала). Содержание водорода в пламени определяет в большой мере скорость его распространения.

56. В качестве примера малого влияния структуры молекул на скорость нормального сгорания отметим отсутствие различия в скоростях нормального сгорания нормальных и изоалканов (абзац 101), хотя они существенно различаются по склонности к самовоспламенению. Бензол обладает даже несколько более высоким значением нормальной скорости сгорания, чем нормальный гептан. Это, вероятно, связано с тем, что при реакции его сгорания образуется большее число свободных атомов H, в то время как при сгорании алканов образуется больше радикалов C—H. Чистый водород имеет заметно более высокую нормальную скорость сгорания, чем все известные топлива. Ацетилен C_2H_2 из-за скрытой энергии тройной связи C—C, а также из-за обильного образования атомов водорода в процессе термического распада, имеет необычно высокую для углеводородов нормальную скорость сгорания.

57. Во многих исследованных газовых смесях при очень низких давлениях длина свободного пробега молекул больше и видимая скорость движения пламени также

значительно увеличивается. Однако при этом реакции уже не завершаются в тонком слое. Степень полноты реакции пропорциональна p^2 , так что при нормальных давлениях и свойственных им сравнительно низких значениях нормальной скорости сгорания реакция завершается в слое, имеющем толщину в несколько десятых миллиметра, в то время как при очень низких давлениях (равных, например, нескольким миллиметрам ртутного столба) зона реакции может иметь толщину в несколько сантиметров.

58. Путем сравнения фотографий пламени и измерений давления было найдено, что в двигателях внутреннего сгорания реакция практически завершается за фронтом пламени. В небольшой степени явления догорания продолжают в массе сгоревшего газа, но это может быть объяснено частично смещением состояния химического равновесия, частично же также реакциями, продолжающимися в пограничном слое, через который ведутся наблюдения и в котором также высвобождается некоторая энергия.

59. В общем случае нормальная скорость будет зависеть от концентрации и состава радикалов, образующихся в момент, близкий к завершению сгорания, а следовательно, от:

- 1) природы топлива (от отношения $\frac{C}{H}$);
- 2) достигаемой температуры сгорания (влияние начальной температуры и состава смеси);
- 3) состава смеси, выраженного коэффициентом использования воздуха (влияние температуры и образования большего числа и другого качества радикалов при богатых смесях).

При сравнении нормальной скорости сгорания бедной и богатой смесей при равных температурах сгорания было найдено, что нормальная скорость сгорания богатой смеси выше, чем скорость сгорания бедной смеси. Учитывая, что углеводороды являются основным источником радикалов, этого результата следовало ожидать.

60. Из сказанного выше понятно, почему всегда имела тенденция применения богатых смесей в бензиновых двигателях. Богатые смеси значительно легче воспламеняются и при их применении различия в составе смеси в отдельных цилиндрах ведут к меньшей нестабильности

работы двигателя¹. При работе двигателя на бедных смесях повышается его экономичность, однако при этом для достижения удовлетворительной работы двигателя необходимо уделять большое внимание технике подачи топлива и смешения его с воздухом, а также конструкции камеры сгорания.

61. Очень мало известно о нормальной скорости сгорания при таких высоких начальных температурах, которые имеют место в двигателях с искровым зажиганием после сжатия смеси, но и то немногое, что известно, свидетельствует о том, что скорость рассмотренного выше механизма реакций недостаточна для обеспечения распространения пламени по пространству камеры сгорания в необходимый для этого короткий интервал времени,

В 1881 г. Дугалд Клерк описал ставший теперь знаменитым эксперимент, выполненный на четырехтактном двигателе и заключавшийся в том, что после тактов наполнения и сжатия заряд в цилиндре расширялся без сгорания, потом вновь сжимался, и только после этого происходило зажигание. В этом случае сгорание протекало очень медленно. Этот эксперимент позволил Клерку сделать вывод, объясняющий сущность процесса сгорания в поршневых двигателях, и выявившиеся позднее возможности достижения высоких чисел оборотов, а именно, что турбулизация массы заряда способствует быстрому распространению пламени. Тогда же эта точка зрения была поддержана и другими исследователями [5].

62. Сделанный вывод не противоречит приведенному выше рассмотрению распространения фронта пламени. Из-за турбулизации элементы газа смещаются один относительно другого так, что плавная поверхность фронта пламени, которую можно было бы себе представить в каждый момент времени при отсутствии турбулизации, искривляется, образуя складки, языки и даже изолированные очаги горения. Таким образом, первым результатом турбулизации является увеличение поверхности фронта пламени, а так как количество энергии, выделяющееся в единицу времени, пропорционально произведению повер-

¹ Так как такие смеси дают более низкие температуры заряда (см. абзац 182), то Применение их облегчает задачу конструктора. Только требование экономии топлива может препятствовать использованию этого легкого пути.

ности фронта пламени на его скорость, то при турбулизации происходит увеличение скорости сгорания.

Можно исходить также из рассмотрения длины пути смешения, учитывая при этом, что молекулярная диффузия в течение определенного интервала времени способна распространяться лишь на относительно небольшое расстояние, в результате чего сгорание происходит в ограниченном пространстве. В течение того же времени турбулентность вызывает перемещение заряда на значительно большее расстояние, и горящий элемент газа пронесется как факел вдоль этого пути, вызывая повсюду развитие молекулярного процесса.

63. Реакция распространяется, следовательно, в результате действия двух механизмов: турбулентность вызывает быстрое, хотя и кратковременное перемещение языков пламени или элементов смеси с определенным, достаточно существенным содержанием радикалов (абзац 54) и поэтому в действительности создает скорее условия для воспламенения, чем возможности для завершения сгорания, в то время как молекулярная диффузия радикалов обеспечивает местное проникновение реакции в небольшие неподвижные зоны и завершение сгорания.

64. Существенным моментом здесь является то, что уже в простейшем случае турбулентность создается при подаче заряда через впускной канал и клапан, а также то, что энергия, которая затрачивается на ее создание, увеличивается по мере возрастания числа оборотов двигателя. Другим интересным моментом является то, что номинальная скорость впуска заряда при оптимальной конструкции двигателя оказывается около 50 м/сек, и при этой скорости впуска скорость пламени, оцененная на основе полной длительности сгорания и максимального расстояния, пройденного пламенем в камере, имеет почти такое же значение.

65. При переносе частиц за счет турбулентности, естественно, не имеет большого значения атомный или молекулярный вес топлива. Собственно, то же относится и к другим факторам, оказывающим влияние на нормальную скорость сгорания, так что действительная продолжительность сгорания при турбулизированном заряде в значительно меньшей степени зависит от факторов, оказывающих заметное влияние на нормальную скорость сгорания.

66. Выше было приведено описание процесса сгорания, происходящего в основной массе газа в камере сгорания. Следует, однако, отметить, что непосредственно у стенок камеры сгорания находится более или менее толстый пограничный слой неподвижных газов, в котором сгорание происходит почти исключительно за счет молекулярной диффузии. Это утверждение применимо также к начальной фазе сгорания, когда размеры пламени еще очень малы. Поэтому развитие именно этих фаз сгорания в наибольшей степени зависит от состава смеси. Этот вопрос будет разобран детально в дальнейшем при рассмотрении сгорания в двигателях с искровым зажиганием.

ЗНАЧЕНИЯ НОРМАЛЬНОЙ СКОРОСТИ СГОРАНИЯ. ПРЕДЕЛЫ ВОСПЛАМЕНЯЕМОСТИ

67. Наибольшее число известных значений нормальной скорости сгорания было получено путем измерений при комнатной температуре (см. табл. 1); при сгорании бутана

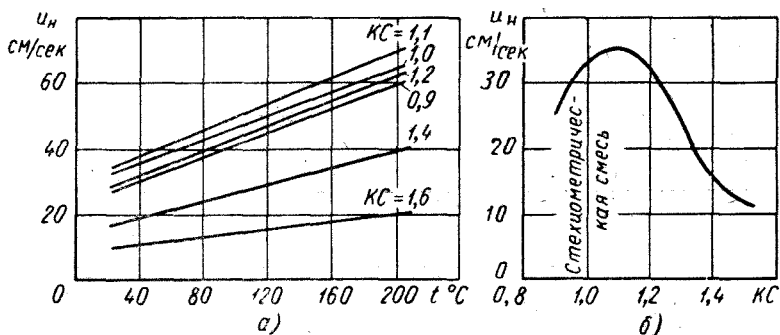


Рис. 23. Зависимость скорости распространения пламени в бутано-воздушной смеси:

0 — от температуры; б — от коэффициента использования воздуха при $t = 24^\circ \text{C}$

(рис. 23, а) наблюдалось значительное увеличение нормальной скорости сгорания с ростом температуры. Эксперименты с керосином, выполненные на решетчатой горелке типа Мекера до очень высоких температур (600°C и выше), дали значения нормальной скорости сгорания, подсчитанные по углу конуса пламени, порядка 5 м/сек . В целом же имеется очень мало точных данных о нормальной скорости сгорания различных углеводородов при температурах,

2*

Таблица 1

Группа	Название	Формула	Нормальная скорость сгорания в см/сек ($T_0 = 20^\circ \text{C}$)	K_{C_0}	K_C при максимальном значении нормальной скорости сгорания
Парафиновые углеводороды	Метан	CH_4	37	0,53	1,10
	Этан	C_2H_6		0,57	
	Пропан	C_3H_8	35	0,61	1,12
	Бутан	C_4H_{10}		0,60	
	i-бутан	C_4H_{10}	35	0,58	1,14
	Пентан	C_5H_{12}		0,55	
	i-пентан	C_5H_{12}	32	0,52	
	Гексан	C_6H_{14}		0,58	
	Гептан	C_7H_{16}		0,54	
	Октан	C_8H_{18}		0,58	
Нонан	C_9H_{20}		0,56		
Декан	$\text{C}_{10}\text{H}_{22}$		0,50		
Ненасыщенные углеводороды	Этилен	C_2H_4	63	0,42	1,08
	Пропилен	C_3H_6	43,5	0,45	1,07
	Бутилен	C_4H_8		0,50	
	Пентилен	C_5H_{10}		0,59	
Ряд ацетилена	Ацетилен	C_2H_2	131	0,52	1,30
Ароматические углеводороды	Бензол	C_6H_6	38,5	0,52	1,11
	Толуол	C_7H_8		0,56	
	Ортоксилол	C_8H_{10}		0,51	
Циклические углеводороды	Циклопропан	C_3H_6	35	0,54	1,09
	Циклогексан	C_6H_{12}		0,58	
	Метилциклогексан	C_7H_{14}		0,59	
Спирты	Метиловый спирт	CH_3OH	—	0,55	—
	Этиловый спирт	$\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$		0,50	
—	Водород	H_2	267	0,14	1,42
	Окись углерода	CO	41,5	0,42	1,80

имеющих место в двигателях внутреннего сгорания в конце сжатия. Это показывает, что для развития техники не всегда требуется предварительное получение детальных научных знаний; когда проблема очень сложна, экспериментирование в сочетании с разумным минимумом гипотез дает вполне достаточные результаты.

68. Знание пределов воспламенения смеси важно для практического применения смесей. Пределы воспламенения, так же как и температура самовоспламенения и нормальная скорость сгорания, в определенной мере зависят от использованной для измерений аппаратуры. Наиболее интересным для инженеров-двигателистов является так называемый нижний предел воспламенения, который представляет собой состав, при котором еще возможно распространение пламени при сгорании наиболее бедной смеси.

Значение этого предела обычно известно только для атмосферных условий. В двигателях внутреннего сгорания при более высоких температурах и давлениях значение нижнего предела воспламенения отличается от этих значений. На практике, однако, необходимо обеспечить определенный запас для достижения достаточной скорости сгорания. Величина этого потребного запаса в большой степени зависит от конструкции камеры сгорания. В противоположность практике, принятой в литературе по химии, нижние пределы воспламенения здесь даются непосредственно в виде коэффициента $KC_0 = \frac{1}{\alpha}$ (абзац 41).

69. Из приведенной табл. 1, так же как из рис. 23, б, ясно, что максимальное значение нормальной скорости сгорания имеет место при KC , несколько большем 1 (а несколько меньше 1), и что нормальная скорость сгорания значительно снижается при обеднении смеси. Значения KC_0 отвечают нижним пределам воспламенения.

ИНИЦИИРОВАНИЕ ПОСТЕПЕННОГО ВЗРЫВА (ЗАЖИГАНИЕ)

70. Рассмотрим, как происходит зарождение постепенного взрыва. Явление электрического разряда, производимого системой зажигания, включающей обычную высоковольтную катушку и прерыватель, состоит как бы из двух частей, а именно: из очень быстрого разряда (длительностью около 10^{-6} сек) колебательного характера (так назы-

ваемая емкостная составляющая) и следующих за ним более длительных затухающих колебаний напряжения (продолжительностью около 10^{-3} сек), которые еще способны вызывать разряд (индуктивная составляющая).

71. Для того чтобы выяснить, какую функцию каждый из этих компонентов должен выполнить при зажигании, было проведено много исследований. При исследованиях, выполненных Финком и его сотрудниками, было выяснено, что главное действие искры связано не с ее тепловым эффектом, как это считалось раньше. При искровом разряде образуются электроны, ионы, активированные молекулы и части молекул. Именно образование активированных молекул и частей молекул является наиболее важным для зажигания, а не ионизация. В соответствии с этим может считаться доказанным, что индуктивная составляющая более существенна в возбуждении зажигания, чем емкостная составляющая, имеющая чрезмерно малую продолжительность.

72. Эти выводы существенны только на границе зажигаемости, т. е. при разрядах, намного более слабых, чем те, которые применяются на практике. При сильных искровых разрядах, используемых в двигателях, тепловое воздействие также оказывается в некоторой мере важным. При интенсивном движении заряда в камере сгорания число последующих разрядов, обеспечиваемых индуктивной составляющей, может иметь заметное влияние на возбуждение сгорания, так как каждая из последующих искр может образовывать новые очаги в движущейся мимо свечи газовой смеси.

73. В зоне, близкой к искровому зазору, скорость сгорания намного меньше нормальной скорости сгорания. Это может быть объяснено большой кривизной фронта пламени и, как следствие, более неблагоприятными условиями, к которым относятся потери тепла и диффузия активных частиц (см. рис. 19, б). Далее образуется зона в виде совершенной сферы, при которой достигается нормальная скорость сгорания; однако влияние турбулентности еще не ощутимо из-за трения вблизи стенки (включая трение об электроды). Для газа, сгоревшего в период прохождения пламенем первых нескольких миллиметров пути, скорость превращения энергии будет очень низкой (абзац 66). Из-за этой низкой скорости и малого объема

газов, сгоревших в течение начального периода, на диаграммах давления отражено явление, именуемое периодом задержки или задержкой воспламенения (рис. 19, а), хотя оно ни в коей мере не идентично периоду задержки или индукционному периоду при одновременном взрыве (объемном самовоспламенении). Сходство лишь в том, что в течение этого периода также не наблюдается ощутимого увеличения давления. Указанному явлению экспериментаторами не уделялось достаточного внимания, и это очень жаль, так как доказано, что оно очень важно для изучения специальных проблем в двигателях с искровым зажиганием (см. абзац 156),

ДИФфуЗИОННОЕ ГОРЕНИЕ

74. Как следует из самого определения, этот тип горения имеет место при условиях, когда скорость реакции значительно выше скорости смешения реагентов. В этом случае исследование полностью сводится к изучению процесса смешения, который можно представить как смешение двух концентрических потоков газа (см. рис. 8). При этом принимают, что газ, протекающий внутри, должен смешиваться с газом, текущим снаружи, проникая в него с одинаковыми во всех направлениях скоростями. Если оба потока ламинарны, то смешение происходит за счет молекулярной диффузии, когда скорость диффузии для каждого компонента газа пропорциональна градиенту концентрации и его частному коэффициенту диффузии D . Последний зависит от средней скорости диффундирующих частиц, и так как в случае газа энергия в среднем всегда распределена одинаково, то D оказывается более высоким для малых легких частиц, чем для тяжелых. Как широко известно, H_2 диффундирует очень быстро, а тяжелые углеводороды значительно медленнее. Для метана коэффициент диффузии D примерно равен $0,5 \text{ см}^2/\text{сек}$.

75. Реакция горения происходит в полученной таким образом зоне смешения, причем вопрос о том, каким образом развивается процесс, важен только с точки зрения излучения и возможности сажеобразования (см. абзац 128 и дальше). Было найдено, что кислород диффундирует в зону смешения быстрее, чем азот, вследствие того, что он существует не только в виде молекул O_2 , но также в форме O и OH .

76. За исключением маленьких газовых горелок, в которых выключена подача воздуха, процесс смешения, описанный выше, на практике не осуществляется; потоки обычно турбулентны. При этом части объема одного газа переносятся в другой, и наоборот, за счет турбулентности.

Вследствие этого, как и в случае фронта пламени при постепенном взрыве (абзац 62), площадь поверхности, разграничивающей два потока газа, значительно увеличивается; при этом ускорения процессов смешения и сгорания оказываются совершенно аналогичными. Следует помнить, что при таком характере движения газов и соответствующем ускорении процесса исчезают различия в поведении газовых компонентов. Тоул и Шервуд [6], например, обнаружили одинаковую диффузию CO_2 и H_2 , имеющих резко различные значения коэффициента диффузии D , в сильно турбулизованный воздух ($\text{Re} = 90\ 000$). При умеренной турбулентности и наличии ламинарного пограничного слоя скорости диффузии различных газов могут быть различны в соответствии со значениями D . То же самое происходит со скоростями постепенного взрыва: в камерах сгорания с повышенной турбулизацией различия в значениях нормальной скорости сгорания практически не влияют на действительную скорость сгорания, в то время как при слабой турбулентности это влияние обнаруживается.

77. Сгорание в дизеле, начиная с момента, когда произошло воспламенение, в большой мере имеет характер диффузионного. Достижение быстрого и полного сгорания зависит в основном от смешения. Проблема смешения становится особенно трудной, если процесс горения должен проходить при использовании наибольшей части воздушного заряда для того, чтобы обеспечить достижение максимально возможного среднего давления цикла при одновременно высокой экономичности. Степень требований в отдельных случаях различна. Так, крупные дизели для поддержания в них термических напряжений на приемлемом уровне работают с большим избытком воздуха, в то время как в малых быстроходных дизелях часто особенно важно достигнуть максимальной удельной мощности, а для этого нужно использовать как можно лучше располагаемый кислород.

Смешение топлива с воздухом в первую очередь достигается за счет значительных относительных перемещений:

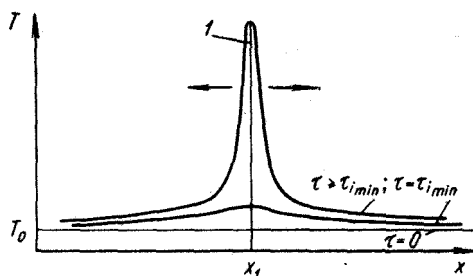
струи топлива проникают в глубь пространства сгорания, а воздух сам в ряде случаев приводится в сильное движение. Завершению горения способствует молекулярная диффузия, обеспечивающая смешение в самых небольших вихревых и неподвижных зонах смеси (абзац 63).

ПРОМЕЖУТОЧНЫЕ ПРОЦЕССЫ МЕЖДУ ОДНОВРЕМЕННЫМ И ПОСТЕПЕННЫМИ ВЗРЫВАМИ

78. Из-за специфических условий, таких, например, как высокая начальная температура, неравномерное распределение температур и неоднородность составов смеси, могут иметь место промежуточные процессы, которые соче-

Рис. 24. Переход от самопроизвольного к постепенному взрыву:

l — оптимальные условия по составу смеси и температуре. Стрелками показано направление развития постепенного взрыва



тают два рассмотренных выше типа горения. Остановимся вкратце на этих процессах ввиду их практической важности.

79. В случае неравномерного температурного поля одновременный взрыв произойдет раньше в той части заряда, где температура была максимальной. Из-за изменения температуры по времени, происходящего, как описано в абзаце 37, образуется постоянно возрастающий градиент температуры, так что создавшиеся условия благоприятствуют распространению постепенного взрыва, инициированного в одной точке (очаге зажигания, рис. 24). Скорость распространения постепенного взрыва в этом случае будет выше, чем в смеси, в которой не было предпламенных реакций. В разбираемом случае в смеси перед распространением пламени уже образовались более или менее значительные количества радикалов. Кроме того, вследствие внезапного расширения в очаге зажигания может возникнуть и распространиться волна давления, которая

через адиабатное сжатие способствует одновременному воспламенению смеси и таким образом обеспечивает распространение горения со скоростью звука (или с большей скоростью в случае большой амплитуды давления). Распространение горения этого типа оказывается сходным с распространением детонации (абзац 46), но в данном случае импульс давления не является носителем всей энергии, а лишь возбуждает начало процесса.

80. В таких случаях может иметь место не распространение пламени, а самоуправляемое перемещение зоны реакции, что и наблюдается при сгорании смеси в трубах,

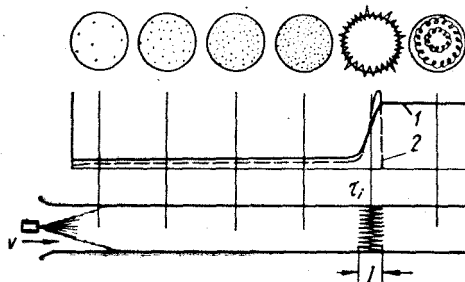


Рис. 25. Схема самопроизвольного взрыва в трубе по методу Петера Ллойда:

/ — зона горения; 1 — температура; 2 — скорость реакции

возникшем в результате самовоспламенения [7]. Если гомогенная смесь пропускается через трубу в виде турбулентного потока, имея достаточно высокую начальную температуру, то за период индукции потоком будет пройдено определенное расстояние, в конце которого образуется зона реакции (рис. 25). Здесь имеется внешнее сходство с возникновением постепенного взрыва, однако на самом деле условия существенно иные. Скорость движения смеси может регулироваться по желанию в широких пределах, и при этом перенос тепла или радикалов из зоны реакции не будет влиять на несгоревшую смесь.

81. Упомянутое явление может представлять интерес для осуществления непрерывного горения в камерах сгорания газовых турбин и реактивных двигателей, где трудно поддерживать режим постепенного взрыва, для которого необходимы либо сравнительно низкие скорости течения и, следовательно, очень большие проходные сечения, либо в противном случае очень высокая степень турбулентности, связанная с большими потерями энергии. Вследствие того, что термодинамические циклы упомяну-

тых двигателей основаны на использовании сравнительно бедных смесей и обладают до настоящего времени относительно низкой экономичностью, такие потери недопустимы. Поэтому на практике приходится сохранять сравнительно низкую интенсивность сгорания.

82. Однако и в поршневых двигателях внутреннего сгорания могут иметь место различные комбинации процессов. Представляется, например, сомнительным, чтобы при детонации имело место самопроизвольное воспламенение одновременно по всему объему конечного заряда; в действительности, видимо, имеют место взрывы, инициированные в определенной точке и мешающие нормальному ходу горения.

83. В дизелях условия сгорания в период индукции не одинаковы в различных точках объема, поэтому всегда появляется один или несколько очагов воспламенения. Эта неоднородность заряда весьма выгодна и ее нужно разумно использовать для достижения мягкой работы дизеля (см. абзац 286).

84. Следует уделить некоторое внимание также калильному зажиганию и зажиганию от раскаленных частиц нагара. Под калильным зажиганием понимается воспламенение от горячих поверхностей (камеры сгорания, выпускного клапана или деталей свечи зажигания), а также и от раскаленных отложений сажи. Все горючие смеси могут в течение длительного времени противостоять воспламенению от контакта со стенками (поверхности, проволоки, сферические предметы), имеющими температуру, значительно превышающую температуру самовоспламенения. Это связано с градиентами температуры и концентрации радикалов, которые образуются вокруг горячего предмета, из-за которых реакция, инициированная непосредственно у стенки, не может тем не менее распространяться. Для газовой смеси определенного состава, содержащей топливо определенного сорта, температура, при которой происходит воспламенение, зависит от размеров и формы горячей стенки и времени контакта. Выпуклые поверхности, такие как поверхность проволоки или шара определенного размера, вызывают воспламенение при более высоких температурах, чем плоские или вогнутые (щели, сверленные отверстия).

85. Из практически применяемых топлив наиболее склонен к калильному зажиганию водород (рис. 26). Было

замечено, что в двигателях, работающих на коксовом газе, происходит калильное зажигание, если, например, в камере сгорания имеются горячие части со щелями или отверстиями (отверстия для демонтажа поршня и др.). Изношенные прокладки блока также могут явиться источником преждевременного воспламенения.

86. В глубоких отверстиях (например, таких как каналы к индикатору) может сохраняться горячий заряд, который затем вытекает из отверстия в один из периодов, например, в период такта впуска при пониженном давлении в цилиндре. Это явление

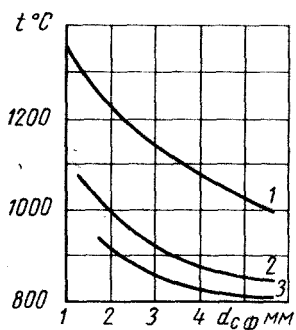


Рис. 26. Влияние диаметра раскаленной сферы на температуру воспламенения:

1 — пентана; 2 — городского

использовалось в качестве регулярного источника воспламенения в некоторых калоризаторных двигателях, причем в этом случае не может быть речи о калильном зажигании; температуры металлических частей здесь вполне умеренные.

87. Воспламенение от химически активных стенок камеры сгорания происходит в двигателях при наличии обильных отложений продуктов неполного окисления смазочного масла, которые, например, могут накопиться в случае, если автомобильный двигатель эксплуатировался в течение длительного времени на малых нагрузках. При работе двигателя на более высоких нагрузках отложения нагара нагреваются настолько, что вблизи них начинают развиваться предпламенные реакции, а в случае достижения высокой температуры накала этот нагар может воспламенить свежий заряд до начала или в процессе нормального сгорания. Некоторые присадки к топливу могут предотвратить это явление. Они адсорбируются в отложениях на стенках камеры и препятствуют воспламенению смеси от раскаленных отложений. В частности, подобным действием обладает трикрезилфосфат¹.

¹ Марка соответствующей присадки фирмы Шелл—ИСА отвечает сочетанию заглавных букв английских слов «воспламенение», «конт-роль», «присадка».

СТАБИЛЬНОСТЬ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ КАК ОСНОВА ИХ ПРАКТИЧЕСКОГО ПРИМЕНЕНИЯ

88. Наиболее важной характеристикой процесса сгорания применительно к двигателям внутреннего сгорания является его стабильность. Это означает, что процесс должен быть в состоянии равновесия при всех числах оборотов и нагрузках и проходить в полном соответствии с условиями, характерными для этих режимов. Если имеют место нарушения, процесс должен обладать тенденцией возвращаться к этому равновесному состоянию.

Как будет показано, стабильность достигается правильным сочетанием процессов сгорания и смешения, конструкции двигателя и применяемого топлива.

89. Наиболее важное отличие условий протекания процесса при одном и том же сочетании числа оборотов и нагрузки при нормальной работе органов настройки двигателя связано с температурой стенок. Это становится очевидным из сравнения работы только что пущенного двигателя с работой полностью прогретого двигателя. Различия в температуре стенок пространства цилиндра могут достигать до нескольких сотен градусов по Цельсию. Увеличение температуры внутренней стороны стенки по отношению к температуре охлаждающей среды является функцией теплопроводности и полного теплового потока.

90. Одновременный взрыв наиболее нестабилен, особенно если смесь уже приготовлена внутри или вне цилиндра. В последнем случае период индукции τ_i будет длительным, соответствуя по меньшей мере 180° угла поворота коленчатого вала. Следует также отметить, что теплообмен между стенками и смесью, приготовленной вне цилиндра, происходит в течение более длительного интервала времени. Могут иметь место следующие случаи.

91. Увеличение температуры внутренней стенки цилиндра при прогреве очень невелико. Это может иметь место при малой тепловой нагрузке или интенсифицированном контроле температуры двигателя (постоянная температура охлаждающей среды, тонкие стенки). При этом условия равновесия процесса воспламенения еще возможны, так как было показано, что момент воспламенения не очень зависит от температуры стенок и поэтому незначительное изменение последней будет вызывать лишь допустимые изменения τ_i . Такие процессы на практике почти

не применяются, так как соблюдение требования очень низкого теплового потока ведет либо к низкой удельной мощности двигателя, либо к чрезмерно усложненной в отношении теплового контроля конструкции двигателя. Более того, для поддержания τ_i в необходимых узких пределах нужно было бы выдерживать очень жесткие требования к свойствам топлива. Это экономически не оправдано, и поэтому рассматриваемый процесс осуществляется только в тех случаях, когда таким путем разрешается проблема, иначе не разрешимая. В качестве примера можно привести маленькие карбюраторные двигатели с воспламенением от сжатия, используемые для авиамodelей, уже упомянутые в абзаце 34, а.

92. Иногда объемное самовоспламенение при низкой теплонапряженности допускается как дефект, накладывающийся на нормальный процесс. Так как при этом процесс самовоспламенения сам по себе является достаточно стабильным, то степень, до которой допускается его вмешательство, находится под контролем и имеет место детонация при сравнительно малой-тепловой нагрузке. Допускаемая интенсивность детонации ограничивается при этом не термическими нагрузками, а шумом и более высокой механической нагрузкой на детали двигателя. При процессе этого типа предпочтительной является камера сгорания, исключая возможность возникновения больших колебаний газа. Хорошо известный двигатель CFR, предназначенный для определения октановых чисел, имеет такую регулировку, при которой в нормальных условиях его работы около 40% топлива сгорает по механизму одновременного воспламенения (см. рис. 64, б). Эти двигатели характеризуются исключительно высокими стабильностью и сроком службы, однако отличаются шумностью работы.

93. **Увеличение температуры внутренней стенки цилиндра при прогреве значительно.** Этот случай встречается наиболее часто. В этом случае температура всех стенок камеры сгорания или части их будет зависеть от того, происходит воспламенение раньше или позже, причем степень этой зависимости пропорциональна возрастанию температуры на режимах прогрева. При этом наиболее важным является влияние продолжительности периода прогрева, менее важным — изменение в условиях движения газа и пр. Уменьшение периода индукции по мере прогрева

по сравнению с его значением при пуске двигателя приводит к увеличению теплопередачи и, как следствие, вызывает дальнейшее повышение температуры стенки. Этот процесс может быть сходящимся или расходящимся, причем всегда имеется опасность, что он может оказаться расходящимся вследствие значительной теплопередачи в период, когда поршень находится вблизи в. м. т. Теплопередача эта так значительна, что изменение термической нагрузки на детали, связанное с опережением воспламенения на один градус, является уже относительно большой величиной. Объемное самовоспламенение при высокой теплонапряженности никогда не было реализовано на практике. В какой-то мере похожие процессы имеют место в калоризаторных двигателях. Но при этом обычно часть процесса смещения переносится на более поздний период с тем, чтобы внести дополнительные контролируемые факторы. При этом само сгорание является частично диффузионным.

94. Описанный процесс очень опасен в случае, когда он возникает при нормальном процессе — происходит детонация в условиях высокой термической нагрузки. Как показано далее, на термическую нагрузку особенно влияет движение заряда, вызванное детонацией. Наличие горячего выпускного клапана и свечи зажигания увеличивает в этом случае опасность возникновения калильного зажигания и разрушительного преждевременного сгорания. Иногда все предпламенные процессы происходят при этом за столь короткий промежуток времени, что воспламенение наступает уже в период впуска (хлопки в карбюраторе).

95. Ни постепенный взрыв, ни диффузионное горение не зависят в заметной степени от температуры стенок. При постепенном взрыве такая зависимость имеется только для частей заряда, которые могут рассматриваться как пограничный слой. При соответствующей конструкции двигателя и достаточной турбулизации с точки зрения стабильности процесса этими эффектами можно пренебречь.

96. Резюмируя сказанное, можно утверждать, что следует избегать процесса сгорания по типу одновременного взрыва, а в случае, если этот процесс принят в проектируемом двигателе, нужно добиться короткого периода задержки воспламенения, т. е. впрыск топлива следует производить незадолго до в. м. т.

Таким образом, на основе большой исследовательской работы для практического применения остались пригодными лишь следующие два стабильных процесса горения.

А. Двигатель со сжатием горючей смеси и искровым зажиганием, в котором вследствие тщательного конструирования и подбора топлива не происходит одновременного взрыва (детонации) и калильного зажигания. Внешний источник энергии (искра) инициирует процесс постепенного взрыва в желаемый момент незадолго до в. м. т.

Б. Двигатель со сжатием воздуха и впрыском топлива незадолго до в. м. т., в котором происходит самопроизвольное воспламенение за счет тепла сжатия, иногда без участия горячих стенок. В этом случае самопроизвольное воспламенение обычно относится к небольшой части впрыснутого топлива и служит только для инициирования дальнейшего более усложненного процесса сгорания.

97. Еще большая степень стабильности процесса может быть достигнута путем комбинации внешнего источника энергии (искры) для возбуждения процесса с образованием смеси к моменту воспламенения, что в принципе предотвращает каковую-либо неопределенность в отношении τ_i . Такие процессы были предложены Гессельманом, Барбером и др. (см. абзац 221 и далее), однако на практике эти процессы не оказали заметного влияния на общее развитие двигателей. Основной трудностью, возникающей при использовании этого процесса, всегда было то, что требуемый поздний впрыск ограничивает значение коэффициента использования воздуха, который может эффективно применяться без заметного дымления.

При наивысшем достигнутом значении коэффициента K_C наблюдается весьма заметное уменьшение экономичности, являющееся результатом чрезмерно затянувшегося смещения. Уменьшение экономичности до некоторой степени компенсируется высокой степенью сжатия, что, естественно, приводит также к возможности использования метода самопроизвольного воспламенения без каких-либо серьезных затруднений (особенно в случае, если используются рыночные высококачественные топлива).

Необходимость во «всеядных» двигателях (двигателях, которые могут работать эффективно на большом диапазоне

топлив различного фрикционного состава) для военных целей или для использования в недостаточно экономически развитых странах не привела еще к большой степени развития этого третьего главного типа двигателей, потому что дизели некоторых вариантов (с предкамерами, двигатели с М-процессом) могут сами по себе быть в высокой степени «всеядными». В то же время в дизеле, естественно, нет необходимости в использовании свечей зажигания.

ХИМИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ СГОРАНИЯ

98. Уже упоминалось, что все, даже на первый взгляд очень простые реакции проходят как цепные реакции с соответственно достаточно сложным механизмом. В реагирующей смеси могут содержаться различные промежуточные продукты, которые, если только они окажутся стойкими, могут образовывать отложения в камере сгорания и присутствовать в качестве вредных примесей в отработавших газах. Изучение природы промежуточных продуктов сгорания может дать интересные сведения о характере отклонения действительного процесса сгорания от теоретически вообразимого идеального процесса. Как следствие, во многих случаях могут быть сделаны выводы о методах улучшения процессов. Таким образом, можно также составить по меньшей мере некоторое представление о различиях в поведении тех или иных химических веществ в процессах сгорания отдельных типов, обсужденных выше.

99. Наряду с топливами, с поведением которых в упомянутой связи нужно познакомиться, следует также рассматривать и смазочные масла, которые проникают в камеру сгорания, сгорают и могут образовывать отложения. Масла очень близки по химическому составу к наиболее широко применяемым топливам, состоящим в основном из углеводородов.

100. Рассмотрим кратко свойства веществ, участвующих в рассматриваемых процессах. Помимо элементарных газов, таких как водород (H_2) и окись углерода (CO), основная группа веществ включает весь диапазон углеводородов и, кроме того, некоторые их производные, особенно спирты и жирные кислоты. Углеводороды подразделяются на две большие группы — цепные соединения и цикличе-

ские соединения; имеются также многочисленные комбинации циклических соединений с ответвлениями в виде цепей. Углеводороды могут быть либо насыщенными, если между двумя атомами углерода имеется только одна связь

(схематически $\begin{array}{c} | \quad | \\ -C-C- \\ | \quad | \end{array}$), либо ненасыщенными, если в мо-

лекуле имеется двойная или тройная связь между двумя атомами углерода (соответственно схематически $-C=C-$

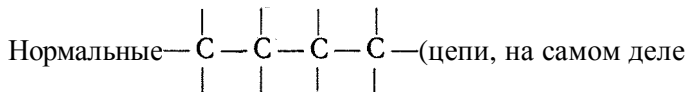
или $-C\equiv C-$). В общем случае двойная связь в цепи (олефиновая связь) делает молекулу более склонной к химическим взаимодействиям, в особенности в случае процессов окисления, идущих при низких температурах. При более высоких температурах вероятность разрушения молекул вследствие колебаний преобладает над вероятностью строго локализованного столкновения, так что в этом случае определяющим фактором является в первую очередь общее строение молекулы. Экзотермические энергии связей $C-C$, $C=C$ и $C\equiv C$ имеют относительно небольшое значение, в результате чего теплотворная способность большинства углеводородов приблизительно равна сумме значений теплот сгорания количеств углерода и водорода, содержащихся в топливе.

Тройная (ацетиленовая) связь характеризуется высокой эндотермичностью, вследствие чего ацетилен (и в меньшей степени его производные) обладает теплотворной способностью намного более высокой, чем та, которая отвечала бы просто сгоранию содержащихся в нем углерода и водорода в CO_2 и H_2O . При сгорании скрытая энергия, аккумулированная в связи $C\equiv C$, высвобождается, существенно увеличивая общее количество выделенного тепла (известно, что ацетилен склонен к взрыву). Двойные связи бензола (C_6H_6) не следует рассматривать как нормальные (олефиновые) двойные связи. Здесь шесть свободных валентностей шести атомов углерода образуют совместно в целом одну сильную связь (известно, что шестигранник атомов углерода является основой графита — весьма огнеупорного вещества).

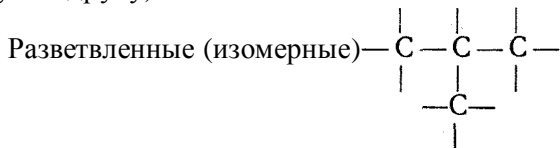
101. Рассмотрим некоторые углеводороды и органические соединения кислорода (ниже атомы водорода иногда опускаются; следует иметь в виду, что они заполняют все остающиеся свободными валентности).

А. Углеводороды

1. Алифатические соединения или соединения с открытой цепью.



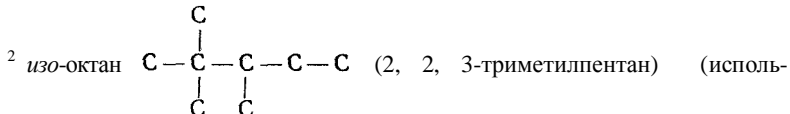
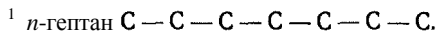
не прямые, и последовательные связи С—С из-за внутримолекулярных сил расположены под небольшим углом друг к другу).



1. Насыщенные: алканы или парафины (C_nH_{2n+2})

Только нормальные	$\left. \begin{array}{l} \text{Метан} \\ \text{Этан} \\ \text{Пропан} \end{array} \right\}$	Газообразные	
Сжижаемые нефтяные газы			
Нормальные и изомерные	$\left. \begin{array}{l} \text{Бутан} \\ \text{Пентан} \\ \text{Гексан} \\ \text{Гептан}^1 \\ \text{Октан}^2 \\ \text{Нонан} \\ \text{Декан} \\ \text{Гексадекан}^3 \\ \text{и т. д.} \end{array} \right\}$	В бензине	
			В дизельном топливе

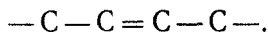
Радикалы называются алкильными группами C_nH_{2n+1} ($-\text{C}_n\text{H}_{2n+1}$ метил-группа; $-\text{C}_2\text{H}_5$ этил-группа и т. д.).



зуются вместе в качестве эталонного базового топлива при определении октанового числа).

³ *n*-гексадекан или цетан, используемый как верхний стандартный эталон при определении цетанового числа в смесях с α -метилнафталином).

2. Ненасыщенные: **алкены** или **олефины** (C_nH_{2n}).
 Имеют где-либо двойную связь (этилен C_2H_4 , пропилен C_3H_6 и т. д.):



Диолефины имеют пару двойных связей



и химически очень активны; они удаляются из бензина из-за склонности к смолообразованию.

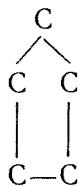
Алкены или **производные ацетилена** (C_nH_{2n-2}) имеют тройную связь (ацетилен C_2H_2):



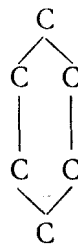
Таких соединений в химии известно немного и они не имеют практического значения в качестве компонентов топлива.

II. Цикланы или **нафтенy.**

Это в основном соединения, включающие пять или шесть атомов углерода и содержащие насыщенные кольца (C_nH_{2n}):

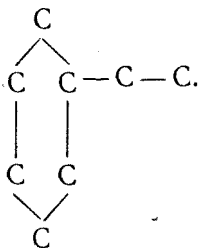


Циклопентан



Циклогексан

Могут содержать алкильную группу



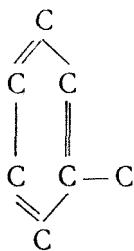
III. Ароматики или производные бензола.

Имеют шесть атомов углерода и содержат ненасыщенные кольца с типичной бензольной связью (радикал C_6H_5 называется фенильным):

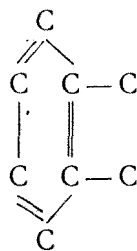


Бензол

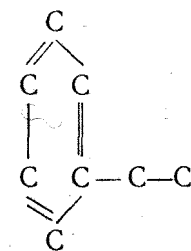
и несколько производных, таких как



Толуол



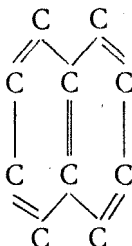
Ксилол



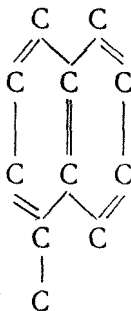
Кумол

IV. Составные циклические соединения

1. Бициклические и полициклические ароматики



Нафталин (тверд при комнатной температуре)

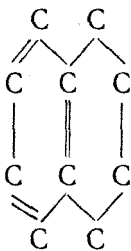


α — метилнафталин ¹.

Бициклические ароматики обнаруживаются среди прочих соединений во фракциях смазочного масла, причем они являются нежелательными компонентами вследствие их сильной склонности к образованию шламов (отложений в виде продуктов окисления).

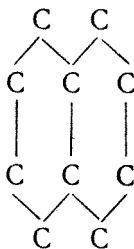
Полициклические ароматики и их соединения получают как продукты конденсации при пиролизе соединений, состоящих из простых циклов. Они образуют углеродистые отложения.

2. **Циклано-ароматические соединения.** К ним относится тетралин, легко образующий тетралиновый пероксид, являющийся стимулятором стуков и опасным ускорителем воспламенения.



¹ Нижний стандартный эталон при определении цетанового числа.

3. Бицикланы. К ним относится декалин — компонент бензина, синтезированного из угля.

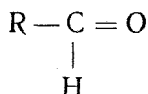


Б. Органические соединения кислорода.

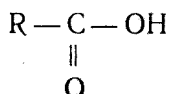
Они состоят из радикала одной из упомянутых выше групп, обозначаемого R, и характерной группы (тоже радикала), как, например:

Спирты: R—ОН (СН₃ОН метиловый);
(С₂Н₅ОН этиловый);
(С₃Н₇ОН пропиловый).

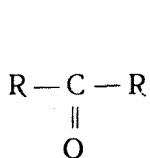
Последний спирт является присадкой, препятствующей замерзанию.



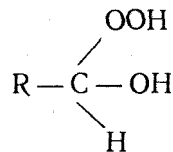
Альдегиды



Жирные кислоты



Кетоны



Оксикислоты



Эфиры

102. В ряде соединений кислорода, особенно в кислотах, природа химической связи отличается от той, которую имеют сами углеводороды, что объясняется переходом электронов между определенными атомами. Вследствие этого такие соединения способны ионизироваться, т.е.

в определенной среде они расщепляются на электрически отрицательно заряженную частицу (ион), содержащую избыточный электрон, и положительный ион. Даже при нерасщепленной молекуле отмеченное свойство вещества проявляется в том, что между положительными и отрицательными зарядами или электрическими полюсами молекул имеется определенное расстояние. Таким образом создается электрический диполь. Произведение смещенного заряда на упомянутое расстояние называется дипольным моментом.

103. Молекулы, имеющие большие дипольные моменты, могут взаимодействовать вследствие того, что отрицательный заряд одной из них притягивается к положительному заряду другой. Поэтому такие вещества имеют тенденцию образовывать комплексы молекул, обладающие достаточно большими силами связи.

Вода как простейшая молекула, способная ионизироваться (H^+ и OH^-), имеет очень сильный диполь и поэтому может способствовать концентрации продуктов окисления в масле. В холодном двигателе определенное количество воды конденсируется из продуктов сгорания и может содержаться в масле в виде очень мелких капель. Поверхность этих капель очень активна в упомянутом смысле (абзац 282).

Так образуется водосодержащий шлам: после испарения воды продукты окисления остаются в двигателе в виде отложений, например, в фильтрах.

104. Процессы окисления углеводородов различных групп (алканов, цикланов, ароматических) имеют различный характер и, более того, протекают по-разному при изменении температурного интервала. Это утверждение следует понимать так: из многообразия возможных звеньев цепных реакций в зависимости от различных температурных условий, концентрации реагентов и т. п. может преобладать влияние тех или иных звеньев.

Следовательно, завершение цепной реакции, являющееся в данном интервале температур однозначной функцией последней при возрастании температуры сверх пределов этого интервала, может происходить совсем по-иному. В этом новом интервале температур могут образовываться другие промежуточные и конечные продукты сгорания из-за вмешательства в процесс новых разветвляющих или обрывающих цепь реакций (звеньев).

В дополнение ко всему скорость реакции, рассматриваемая в целом, может даже уменьшаться при увеличении температуры (абзац 3б).

Одно из веществ, будучи более склонным к реакции в данном интервале температур, чем какое-то другое, может в ином интервале температур вести себя противоположным образом. Однако в первом приближении скорости реакций растут с температурой, и в диапазоне температур от комнатной до 1000° С достаточно хорошее представление о скорости реакций дает таблица, приведенная ниже (табл. 2).

Т а б л и ц а 2

Температура , в °С	Скорости реакций окисления	Примечание
До 50	Медленное окисление. Заметное окисление происходит в течение нескольких лет. Полное окисление происходит за столетия	Смазочное масло в крейцкопфных поршневых двигателях. Тепловыделение не обнаруживается
100—150	Окисление. Заметное окисление происходит в течение часов (определение времени старения)	Смазочное масло в тронковых поршневых двигателях. Тепловыделение не обнаруживается
250—350	Реакции происходят в течение секунд и долей секунд с образованием альдегидов и пероксидов	Предварительные реакции при самопроизвольном воспламенении; реакции в смазочном масле, попавшем на верхнюю часть поршня. Выделение тепла может привести к повышению температуры
500 и выше	Реакции происходят в течение миллисекунд	Реакции полного распада в присутствии кислорода (горение). Выделение тепла приводит к заметному повышению температуры и почти всегда к видимому сгоранию

106. Из табл. 2 ясно, что в низкотемпературных интервалах эффект окислительных процессов проявляется только спустя длительное время в результате накопления

продуктов окисления; пример — старение смазочного масла.

При температуре несколько выше 250°C реакции проходят настолько интенсивно, что способны коренным образом воздействовать на топливо-воздушную смесь за период одного оборота двигателя. Они все еще недостаточно интенсивны с точки зрения собственно процесса сгорания в двигателе, но могут серьезно влиять на состояние масла, смазывающего поршень. Что же касается топлива, то реакции при рассматриваемых температурах достаточно интенсивны, чтобы влиять на следующую стадию его самопроизвольного воспламенения.

Во всех этих случаях, однако, в продуктах реакции существенным образом распознается базовое вещество, и поэтому для характеристики процесса используется более мягкий термин — окисление. В некоторых случаях в результате взаимодействия реагентов происходит соединение продуктов окисления в большие молекулы (полимеризация).

107. Пропорционально росту температуры и, следовательно, кинетической энергии молекул возрастает вероятность их разрушения при энергичном столкновении, а также вследствие колебания молекул, в результате чего может происходить отщепление частиц от молекул (крекирование) даже при отсутствии кислорода. Чем выше температура, тем меньше частица, которая может еще существовать. При температуре около 350°C , например, алканы и прочие соединения, имеющие длинные цепи (20 атомов C и более), начинают разрушаться; при температуре 1000°C только метан, не имеющий связи C—C, может сопротивляться крекингу. При промежуточных температурах сопротивляются разрушению молекулы со все более короткими цепями, а также циклические молекулы бензольного ряда, которые затем полимеризуются. При температуре выше 1500°C только CO, CO₂, H₂, H₂O, O₂, N₂ будут устойчивы наряду с некоторыми очень простыми радикалами. В присутствии O₂ горение в действительности начинается лишь при температурах выше $500\text{--}600^{\circ}\text{C}$.

108. Рассмотрение столь широких пределов температур является следствием того, что в двигателях внутреннего сгорания не достигается состояния равновесия: циклы реакций проходят столь быстро и, кроме того, условия протекания реакций в различных зонах камер сгора-

ния столь неоднородны как по температуре, так и по составу, что всегда имеются в наличии следы и даже заметные количества продуктов, которые никогда не имели бы места в состоянии равновесия. Даже отработавшие газы дизеля, например, могут иметь в большей или меньшей степени специфический запах топлива, если последнее содержит много ароматических соединений.

Рассмотрим более подробно некоторые процессы, происходящие в наиболее важных температурных интервалах.

109. Медленное окисление. Чистые алканы довольно устойчивы против окисления при комнатной температуре; отсюда термин «парафины», что означает «имеющие малое влечение к другим телам». При повышении температуры тенденция к окислению увеличивается, причем оно идет в принципе как цепная реакция образования окислов через посредство менее устойчивых промежуточных продуктов¹. В отработавшем масле кислотное число, показывающее число миллиграммов КОН, которое нейтрализует один литр окисленного масла, является критерием процесса окисления. При температурах 120—150° С окисление и побочные реакции имеют такую интенсивность, что чисто парафиновое масло превращается в густую вязкую массу в течение нескольких часов.

110. В этом процессе некоторые вещества являются не только промежуточными или конечными продуктами окисления, но также активными звеньями цепи. Поэтому очень важно удалять летучие компоненты вентиляцией картера, особенно муравьиную кислоту (СНООН), которая в очень большой мере ускоряет окисление. В противоположность тому, как иногда считают, вентиляция картера не приводит к увеличению интенсивности окисления в рассматриваемом интервале температур, так как и без вентиляции картера при разбрызгивании масло находится в контакте с кислородом. В двигателе невозможно оградить масло от попадания в него кислорода, и оно обычно полностью насыщено последним.

111. Окисление ароматических соединений идет интенсивнее, чем окисление алканов с образованием окисленного шлама (шлам — общее название комплекса соединений, которые осаждаются из масла, но растворимы в бензоле).

¹ Согласно правилу, применяемому химиками, скорость реакции удваивается при каждом увеличении температуры на 8—10° С.

Далее оказывается (и это типично для природы цепных реакций), что цепь реакции, при которой из ароматических соединений образуется окисленный шлам, может вызывать обрыв цепной реакции окисления масла, состоящего в основном из алканов. Зависимость скорости окисления $v_{ок}$ определяемой по количеству использованного для этого в единицу времени кислорода, от количества ароматических соединений в масле, основной состав которого составляют парафиновые углеводороды, показана на рис. 27. Из рисунка видно, что при небольшом количестве ароматических соединений скорость окисления минимальная.



Рис 27. Зависимость скорости окисления масла с парафиновой основой от количества ароматических соединений

Это следует учитывать при очистке смазочных масел (обычно очистка сводится к удалению сильно подверженных окислению бициклических ароматических и других соединений).

112. Эффект, аналогичный эффекту, вызываемому малым содержанием ароматических соединений, может быть

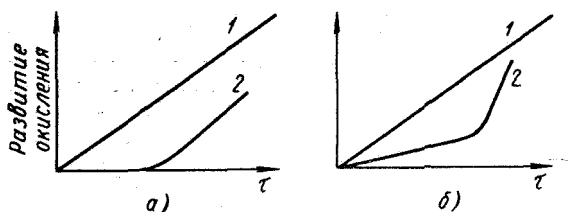


Рис. 28. Действие присадок;

a — антиокислительной; *б* — задерживающей развитие окисления; 1 — масло без присадки; 2 — масло с антиокислительной присадкой

получен за счет других, имеющих более специфическое действие соединений, применяемых в еще меньших количествах и называемых присадками. Присадки, препятствующие окислению, называются антиокислительными. Эти вещества оказывают эффект через обрыв цепи, особенно через обрыв первого ее звена. Если отложить по оси ординат скорость окисления при отсутствии и наличии в масле присадки, а по оси абсцисс — время процесса (рис. 28, *a*),

то получим зависимости, из _ анализа которых следует, что в течение определенного времени реакция окисления совсем не идет. Присадки, называемые тормозящими, влияют на процесс окисления иначе (см. рис. 28, б). При использовании таких присадок реакция хотя и идет, но задерживается в своем развитии. Можно предположить, что в этом случае воздействие оказывается на более позднее звено цепи. Типичным примером масла с естественным содержанием антиокислительного компонента является пенсильванское смазочное масло, которое при алифатической базе содержит некоторые смолистые кислоты.

113. Все реакции, о которых здесь говорилось, происходят в жидкой фазе, что означает, что кислород растворяется в масле и реагирует с ним в растворенном состоянии. При более высоких температурах преобладают реакции, происходящие в паровой фазе, когда масло переходит в парообразное состояние и уже в паровой фазе контактирует с кислородом. Одной из характерных черт цепных реакций является большая зависимость их природы, механизма развития от соотношений концентраций реагентов.

РЕАКЦИИ ОБРАЗОВАНИЯ АЛЬДЕГИДОВ И ПЕРОКСИДОВ

114. При температурах выше 250°C для алканов, имеющих достаточно длинную цепь (C_5 и более), начинается практически очень важный температурный интервал, а именно интервал, в котором идут реакции, возбуждающие самопроизвольное воспламенение, так называемые подготовительные или предпламенные реакции (см. абзацы 35—41). Если при температуре, равной около 300°C , пары алкана в смеси с кислородом или воздухом пропускаются через кварцевую трубку, то начинается интенсивная экзотермическая реакция, сопровождающаяся слабым зеленовато-голубым излучением, т. е. так называемой хемилюминесценцией. Реакцию эту называют также «холодным пламенем», так как излучение свидетельствует о том, что имеется пламя, вызванное не высокой температурой, а специфической активностью определенных частиц. Помимо CO_2 , большого количества CO и легких углеводородов в результате этой реакции получаются два типичных продукта — альдегиды и пероксиды, причем именно эти продукты определяют характер реакции. Наличие этих веществ было обнаружено также в пробах газа, взятых из

двигателей, и, кроме того, путем спектроскопического наблюдения непосредственно в камере сгорания, снабженной для этой цели окнами с кварцевыми стеклами (см. абзац 198). Развитие холоднотламенных реакций было отчетливо продемонстрировано также с помощью диаграмм давления (рис. 29). Двигатель при определенных условиях мог работать вхолостую только за счет повышения давления, вызываемого этими реакциями (а следовательно,

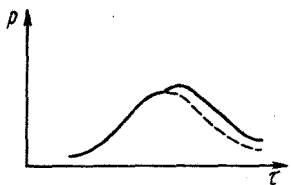


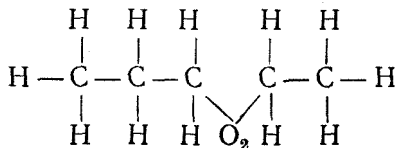
Рис. 29. Повышение давления сгорания, вызываемое предпламенными реакциями

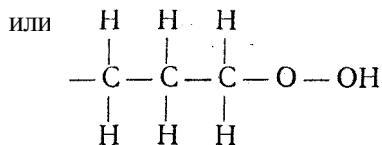
без настоящего горения [8]). Как было отмечено в абзаце 36, эти реакции могут ввиду их экзотермического характера вызвать также настоящий взрыв, в результате которого температуры продолжают подниматься до значений, определяемых калорийностью смеси при полном ее превращении; очевидно, однако, что имеются определенные условия, при которых реакция может приостановиться.

115. Как правило, случай прекращения реакции на стадии холодного пламени не представляет интереса. При этом образуются только вредные продукты, которые, кроме загрязнения двигателя и весьма неприятного запаха, могут вызывать также значительную коррозию деталей. Следует, однако, помнить, что в небольшой мере такие реакции в определенных условиях идут, например, в пространствах за поршневыми кольцами.

Хотя в большинстве случаев альдегиды и пероксиды встречаются вместе, они по-разному влияют на самовоспламенение. Было показано, что в этом смысле альдегиды в качестве случайных вспомогательных продуктов неактивны (за исключением того, что они выделяют при своем образовании тепло), в то время как пероксиды очень активно способствуют самовоспламенению топлива.

116. Пероксид можно в первом приближении представить себе следующим образом:





(так называемая гидроперекись).

Характерно, что при образовании пероксидов не происходит заметного выделения тепла; напротив, не исключено, что имеет место некоторое поглощение тепла. Распад же пероксида идет с выделением тепла (экзотермически).

Пероксиды поэтому в концентрированном виде нередко имеют чрезвычайно ярко выраженную взрывную природу. Предполагается, что такие распады сообщают рассматриваемой молекуле столь высокую энергию, что она становится чрезвычайно активной и может крекироваться или терять простые радикалы; кроме того, при этом либо выделяется кислород, находящийся в очень активном состоянии, либо кислород этот немедленно соединяется с частями рассматриваемой молекулы, обладающими свободными энергиями связи.

117. Пропорционально уменьшению длины цепи молекул нормальных алканов уменьшается предел температур, в котором происходят реакции образования пероксидов, и последние становятся менее интенсивными. На рис. 30 показано изменение скорости расхождения кислорода (скорости реакции) в функции температуры для двух идентичных опытов, поставленных с различными алканами. Изоалканы, так же как и цикланы, обнаруживают заметно меньшую склонность к реакциям рассматриваемого рода, чем нормальные алканы. В случае ароматических углеводородов реакции в этом диапазоне температур практически отсутствуют, если только они не происходят с их боковыми цепями.

118. Весьма характерно, что в основном склонность к реакциям образования пероксидов углеводородов раз-

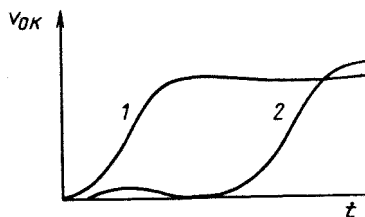


Рис 30. Зависимость скорости предпламенных реакций от температуры нормального гептана и изооктана:

1 — нормальный гептан; 2 — изооктан

личных групп, приведенных выше, выражает также их склонность к самопроизвольному взрыву, с которой встречаются при классификации их по цетановым числам (для дизельного топлива) или октановым числам (для бензинов).

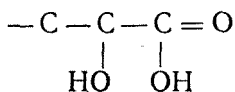
119. В полном соответствии с этим находится факт заметного уменьшения склонности к образованию пероксидов при добавке в топливо в малых концентрациях (около 1%) тетраэтилсвинца (ТЭС), используемого в качестве присадки к топливу для подавления детонации. Присадка ТЭС действует как антиокислитель, замедляющий развитие предварительных реакций. Это можно обнаружить также по диаграмме давлений. Эффективность присадки ТЭС в столь малых концентрациях связана с его собственной высокой активностью — она полностью разлагается в рассматриваемом диапазоне температур, а также с тем, что она воздействует на начало реакционной цепи. Присадка ТЭС либо предотвращает, либо замедляет образование пероксидов, или же способствует их распаду с образованием стабильных соединений при концентрации, далекой от опасной.

120. Некоторые углеводороды, особенно алкены, дают эффект, аналогичный эффекту присадки ТЭС, действуя в сравнительно малых концентрациях (хотя уже равных нескольким процентам) так же, как замедлители воспламенения, по-видимому, по тому же механизму, что и ТЭС: будучи в ненасыщенном состоянии, они поглощают кислород с образованием стабильных соединений.

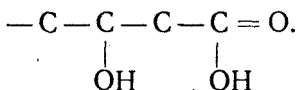
121. Помимо пероксидов, заслуживает внимания также образование альдегидов, так как они придают отработавшим газам острый запах, раздражают слизистую оболочку носа и глаз, если только альдегиды, образовавшиеся в начальных реакциях, позднее не сгорают. Их присутствие в отработавших газах указывает на то, что часть горения протекала при очень низкой температуре. Часто это является следствием местного охлаждения пламени холодными поверхностями, когда из-за недостаточной турбулентности продукты, содержащиеся в пограничных слоях, не сгорают в пламени. Это может иметь место и в основной массе заряда в случае низких температур горения (малых значений коэффициента KC).

122. Другой причиной, по которой представляются важными реакции образования альдегидов, является

образование лакообразных продуктов, состоящих из довольно нечетко определяемых групп, таких как оксикислоты. Эти продукты образуются в результате сложных процессов последующего окисления и полимеризации наименее летучих альдегидов. Примеры оксикислот:



или



Такие лаковые отложения образуются главным образом на стенках камеры сгорания, цилиндра и на поршне в результате, например, горения, происходящего при низких температурах, или при пропусках вспышек. В последнем случае лаковые отложения могут приводить к очень неприятным последствиям. Они могут также образовываться в канавках поршневых колец из-за окисления попавшего туда масла, причем необходимо иметь в виду, что горячие газы при утечке через неплотности проникают в зоны вокруг поршневых колец и вызывают там реакции, идущие при температурах более высоких, чем температуры поршня или колец. В основном именно эти реакции приводят к опасному явлению пригорания колец. В таких случаях едва ли может идти речь о повышении температуры в результате реакций и связанном с ним тепловом ускорении последующих процессов, так как из этих зон тепло интенсивно отводится за счет высокой теплопроводности.

123. В рассмотренных выше интервалах температур углеводороды, кроме воздействия кислорода, подвергаются сильному воздействию SO_3 , который может образоваться при горении топлива с большим содержанием серы (в основном дизельного топлива, см. абзац 384).

124. Реакции, рассмотренные в абзацах 114—123, являются типичными парофазными реакциями. При достаточно высоких температурах реакции идут в жидкой фазе лишь в наименее испаряемых фракциях, как правило, в так называемых остаточных фракциях нефти. «Остаток»

3 Д. Д. Брoze

включает все, что не дистиллируется технически и имеет температуру кипения, превышающую 350° С при атмосферном давлении. Такие остаточные фракции содержатся в смазочном масле, в котором после очистки они могут явиться весьма ценными компонентами, так же как и в тяжелых дизельных топливах. Тяжелые нефтяные топлива состоят в основном из таких остаточных фракций.

125. Скорость реакций, идущих в жидкой фазе, определяемая диффузией кислорода в топливо, очень низка и не оказывает заметного влияния на процесс воспламенения. Следует, однако, уделять внимание тому, например, чтобы большие количества смазочного масла в течение длительного времени не подвергались действию высоких температур. В противном случае в результате фракционной возгонки, которая происходит частично вследствие испарения, частично из-за крекинга и также, в известной мере вследствие окисления, жидкость загустевает в окислившийся остаток, который в конце реакции превращается в сухую «углеродистую» массу. Термин «углеродистый» может создать впечатление, что эти массы состоят в основном из углерода, но следует отметить, что он весьма условен; термин «угольный» был бы ближе к истине, так как в этих массах велико содержание кислорода (выше 20%). Анализ показывает, что в них также присутствуют гумикислоты, как и в естественном ископаемом угле.

В заключение следует отметить, что при высоких температурах жидкофазное окисление ведет к «карбонизации». Только путем быстрого испарения жидкости можно предотвратить образование остатков. Этот процесс будет проанализирован ниже при рассмотрении сгорания тяжелых топлив в дизелях (см. абзац 358) и условий смазки поршня (см. абзац 395).

РЕАКЦИИ РАСПАДА

126. С рассмотренными выше реакциями связаны реакции распада, происходящие в интервале температур, частично перекрывающем рассмотренный выше. В абзаце 107 было отмечено, что даже при отсутствии кислорода большинство углеводородов распадается при температуре 300° С и выше. В присутствии кислорода процесс значительно ускоряется: кислород легко соединяется с молекулами, подверженными значительным напряжениям; наоборот,

энергия, освобожденная в результате соединения с активной частицей кислорода, естественно, достаточна для того, чтобы превратить малоустойчивое состояние возбужденной молекулы в полностью неустойчивое, т. е. вызвать в ней разрыв одной или нескольких связей. При такой реакции, которая может считаться наиболее вероятной при температурах выше $400\text{--}500^\circ\text{C}$ (в зависимости от природы вещества), образуются разнообразные продукты; только самые простые из них устойчивы, большинство же являются случайными промежуточными продуктами реакции. Высокоактивные радикалы с атомами кислорода ускоряют цикл превращений. Поэтому при достаточной концентрации топлива эти реакции идут быстро с образованием пламени и резким повышением температуры до $1500\text{--}2500^\circ\text{C}$ (в зависимости от теплотворности смеси).

127. Если же концентрации таковы (очень бедная смесь), что достигается заметно меньшая температура, чем 1500°C ($1000\text{--}1200^\circ\text{C}$), то реакции распада идут в двигателе довольно медленно. Не следует поэтому концентрировать внимание на таких терминах, как «температура самопроизвольного взрыва» и т. д., и считать, что если только реагенты смешиваются при этой температуре или температуре более высокой, то реакция быстро завершается. Скорость реакции всегда контролируется температурой, достигаемой после горения, которая иногда может уменьшаться за счет одновременного с реакцией отвода тепла. Для эффективного же использования углеводородов в двигателе температура пламени должна составлять по меньшей мере около 1500°C . При горении водорода достаточна более низкая температура.

ДВА ТИПИЧНЫХ СЛУЧАЯ ГОРЕНИЯ УГЛЕВОДОРОДОВ: ГОЛУБОЕ И ЖЕЛТОЕ ПЛАМЕНА

128. При техническом использовании горения углеводородов различают два случая, а именно: горение с голубым пламенем и горение с желтым или светящимся пламенем. В соответствии с существовавшей ранее точкой зрения голубое пламя является результатом реакций образования альдегидов и пероксидов (а следовательно, реакций, идущих без какого-либо заметного распада - крекинга молекул углеводородов), в то время как желтое пламя считалось следствием крекинга с образованием углерода.

Предполагалось, что эти процессы протекают параллельно при высоких температурах примерно с одинаковой скоростью.

129. Термин «голубое пламя» ошибочно связывали с голубой люминесценцией при предпламенных реакциях (абзац 114). В действительности пламя имеет голубой цвет вследствие газовой радиации в области длин волн, определяемых характеристикой компонентов заряда, в основном отвечающих излучению C_2 , и радикалом CH . C_2 является газообразным радикалом углерода, а следовательно, и здесь состав газовой смеси свидетельствует о наличии как реакций распада, так и чисто окислительных реакций.

130. Радиация желтого пламени обязана наличию в пламени твердых частиц углерода (сажи), которые образуются в результате конденсации элементов C_2 после или во время распада углеводородов. Следует полностью отказаться от простой концепции, согласно которой цепочка углеродных атомов молекулы может образовываться в результате отщепления от нее атомов водорода, во всяком случае в применении к алифатическим соединениям. Это явление может, однако, иметь место в случае ароматических соединений, в которых шесть атомов C жестко связаны один с другим. Во многих случаях при сгорании ароматических соединений также образуется голубое пламя. Из этого следует, что их ядро также распадается на радикалы $C-C$.

Спектр желтого пламени является сплошным; пламя представляется просто раскаленным облаком пыли, состоящим в принципе из черного вещества. Это облако не является, однако, абсолютно черным телом; при малых размерах, имеющих место в двигателях внутреннего сгорания, оно достаточно прозрачно (серое тело). При рассмотрении больших желтых нефтяных пламен (котлы, печи, большие газовые турбины) облако можно приближенно считать абсолютно черным из-за значительной толщины (1 м или более), так же как и в наиболее мощных дизелях вследствие высокой плотности заряда.

131. Очевидно, что полное исчезновение атомов водорода из структур молекул углеводородов и, как следствие, конденсация (уплотнение) связей $C-C$ происходит только тогда, когда температура в пламени достаточно высока и имеется местный временный недостаток кислорода (следует иметь в виду очень короткие расстояния и интервалы

времени). Поэтому желтое пламя просто свидетельствует о том, что смесь не гомогенна¹

132. Для каждого углеводорода существует определенный состав смеси, очень богатой, при котором даже в случае гомогенной смеси пламя из голубого становится желтым. Это относится, например, к реакции



При большем содержании метана происходит крекинг в пламени, что придает последнему желтую окраску. Аналогичное явление возможно и по отношению к другим углеводородам, хотя критический состав смеси неизвестен. Негомогенность смеси является следствием несовершенного смешения, особенно если углеводород находится в жидком состоянии, так как в этом случае образуются зоны с очень богатой смесью вокруг отдельных капелек, причем эти зоны продолжают существовать в течение небольшого отрезка времени даже после завершения горения. Смеси, содержащие жидкое топливо, обычно горят желтым пламенем, так что горение в дизеле практически всегда сопровождается желтым излучением. В бензиновом двигателе пламя обычно голубое, но при низкой температуре на впуске и в случае богатой смеси оно также может быть желтым.

133. Все это важно не только из-за излучения, несмотря на то, что оно может быть намного интенсивнее при желтом пламени. Последнее важно при сгорании в печах, котлах (положительное влияние)² и в газовых турбинах (отрицательное влияние), но в двигателях внутреннего сгорания явления конвекции имеют намного большее значение, чем потери тепла лучеиспусканием. Даже в наиболее мощных двигателях лучеиспускающая толща заряда слишком мала для того, чтобы оказывать значительное влияние на тепловую нагрузку стенок. По последним

¹ В действительности сажа содержит некоторое количество водорода, и при анализе она может оказаться соответствующей формуле C_3H_2 .

² При той же температуре желтое пламя будет иметь большее лучеиспускание, чем голубое, и поэтому будет передавать больше тепла (благоприятный момент). В действительности все гораздо сложнее, и специальные горелки с очень короткими пламенами могут на практике работать при коэффициенте использования воздуха, равном единице. Вследствие этого температура пламени, а также радиация его выше и, кроме того, чище поверхности теплообмена.

данным доля лучеиспускания в теплоотдаче составляет около 15% [9].

134. Крайне важно то, что при желтом пламени имеется органическая тенденция к дымлению; оно уже содержит мелкие частицы сажи, которые непрерывно растут в течение всего периода их существования. Поэтому если местный недостаток кислорода продолжается до конца процесса, то частички сажи будут содержаться в сгоревших газах. Если даже смешение окажется к концу процесса достаточно совершенным, эти частички могут остаться в несгоревшем виде из-за низкой скорости сгорания, которая для твердых частиц невелика, особенно если учесть, что углерод при температурах ниже 800°C и между 1200 и 1400°C в большой мере стоек против окисления.

135. Сажа из желтого пламени легко осаждается на холодных стенках. Это означает, что в дизеле осаждение сажи происходит часто. Если стенкой камеры сгорания является цилиндр, то сажа будет осаждаться на пленке смазочного масла и проникнет в масло, содержащееся в картере (абзац 394).

136. Кроме того, несмотря на большое количество воздуха, подаваемого в дизель, выпуск его может быть дымным; сажа, образовавшаяся в местах, где смесь очень богата, попадает в смесь с большим содержанием кислорода только на более поздней фазе цикла, когда уже и оставшееся время и температура недостаточны для ее окисления. В газовой турбине это явление может наблюдаться при взлете самолета вследствие переохлаждения пламени из-за чрезмерно большого излишка воздуха. Образующиеся при этом CO и H_2 в основном успевают сгореть.

137. При сгорании гомогенной смеси и обычных для техники значениях коэффициента KC , близких к единице, пламя голубое и отложения сажи не происходит, но альдегиды и прочие соединения могут образовываться при переохлаждении пламени холодными стенками. Такие пламена могут также быть получены в случае жидкого топлива при его испарении и постепенном смешении паров с воздухом (фитильная керосиновая горелка) или при однородном распыливании и последующем быстром смешении. Распылители, обычно применяемые в дизелях, не совершенны в этом отношении, но следует иметь в виду, что они должны выполнять и другие, более важные функции (см. абзац 303 и дальнейшие).

138. Диффузионное пламя почти всегда желтое, имеет тенденцию к образованию дыма, и если только оно не переохлаждается, то в нем не образуются альдегиды, так как термический распад всегда слишком глубокий. У двигателей внутреннего сгорания иногда желтое пламя и дымность выпуска выражены отчетливо, например, в дизелях, но одновременно также образуются альдегиды, особенно, если стенки холодные (лакообразование, запах; см. абзацы 121, 122, 298, 386).

139. В бензиновом двигателе стремятся получить горение с голубым пламенем, приводящее к меньшему загрязнению.

Для этого смесь необходимо предварительно достаточно подогреть, чтобы она была сухой. Альдегиды летучи, и так как бензин обычно сжигается при коэффициенте KC , близком к единице, то температура газов получается достаточно высокой для вовлечения альдегидов в реакции. Но только при неблагоприятных условиях, которые часто встречаются на практике, а именно, когда при работе двигателя на богатых смесях внезапно «сбрасывается газ», имеет место такое неполное или позднее горение, что может образовываться большое количество альдегидов и других продуктов, таких как олефины (установлено, что это обстоятельство является главной причиной образования ядовитых туманов, именуемых «смог», в Лос-Анжелосе). Это, к сожалению, имеет место также в двигателях, работающих с расслоением смеси (абзац 227), когда некоторая ее часть очень обеднена. Такие двигатели могут быть намного более экономичными, чем двигатели, использующие гомогенную смесь, но в них трудно достигнуть совершенного горения при всех нагрузках.

140. Тенденция к дымлению различна для различных углеводородов и их соединений. Ароматические соединения склонны к дымлению больше остальных веществ при равных условиях смешения. В дизеле, однако, можно наблюдать парадокс, когда при высокой нагрузке ароматическое топливо дает меньшее дымообразование, чем парафиновое. Это происходит из-за более длительного периода индукции в случае ароматического топлива, вследствие чего смесь в камере сгорания имеет больше шансов стать гомогенной до начала горения (абзац 277).

141. При добавлении к богатой смеси воды уменьшается склонность к образованию сажи. Это использова-

лось в нефтяных двигателях для того, чтобы сделать возможным форсирование по нагрузке, причем имел значение также охлаждающий эффект добавки воды.

АНАЛИЗ ОТРАБОТАВШИХ ГАЗОВ

142. Исследование процесса горения требует применения специального лабораторного оборудования и даже более или менее радикального изменения конструкции двигателя. Однако о результатах горения можно судить относительно просто по составу отработавших газов. Анализ состава отработавших газов не позволяет определить продолжительность горения. Последнее можно сделать с помощью термодинамического анализа по очень точным диаграммам давления.

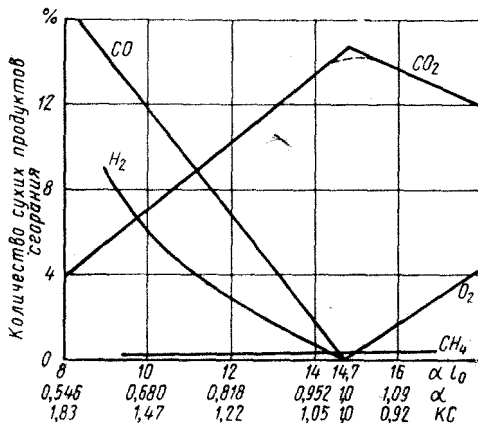
143. С помощью анализа отработавших газов и исследования степени отклонений реальных результатов горения от желаемых могут быть разрешены различные проблемы. В большинстве случаев, однако, ограничиваются суждением об окраске, запахе и раздражении слизистых оболочек. При определении склонности к дымлению по степени окраски отработавших газов используются фотометры, работающие по принципу поглощения (в этом случае фотометры могут быть заменены простым аппаратом, где сажа откладывается на бумажном фильтре) или по принципу отражения при определении степени «синевы», которая обнаруживается в дыме вследствие наличия в нем тонкодисперсного тумана масла. В большинстве случаев в эксплуатации даже столь простые количественные определения не проводятся.

144. В основном определяется общий состав отработавших газов и расход топлива, что позволяет судить о составе смеси, расходе воздуха, который не поддается прямым измерениям¹. Для заданного элементарного состава топлива состав отработавших газов, согласно Д'Аллеву и Ловеллу [10], является точной функцией состава смеси независимо от конкретного двигателя, использованного при исследовании, и даже независимо от того, дизель это или бензиновый двигатель, если только качество горения во всех случаях одинаково.

¹ При подобном методе непрямого определения расхода воздуха возможны ошибки, так как состав газов в месте отбора пробы может не соответствовать среднему составу.

145. Это утверждение поэтому действительно для двигателей с практически совершенным горением, которого можно достичь надлежащей регулировкой и подбором топлива, а в случае дизелей — при отсутствии в отработавших газах значительного количества сажи. На графике рис. 31, полученном на основании анализа отработавших газов при использовании определенного топлива, показано содержание в отработавших газах основных компонен-

Рис. 31. Содержание основных компонентов в отработавших газах при сжигании конкретного углеводородного топлива



тов, а именно CO₂, O₂, H₂, CO и CH₄ во всем практически используемом диапазоне изменения составов смеси. Вода не была обнаружена, так как она конденсируется до анализа.

В отработавших газах найдены следующие соединения: при бедных смесях O₂ и CO₂, при богатых смесях CO₂, CO и H₂ и во всех смесях CH₄ в небольших незаконномерных количествах.

Содержание CH₄ связано с охлаждающим эффектом стенок.

При горении богатых смесей в отработавших газах увеличивается число молей вследствие образования CO и H₂ по сравнению с числом молей в свежей смеси. Это своеобразный полезный эффект, так как энергия горения используется при более низкой температуре, что ведет к более низкой тепловой нагрузке деталей двигателя. При этом увеличение числа молекул компенсирует снижение температуры, так что на единицу массы смеси производится та же работа.

146. Дизель в основном работает со значительным избытком воздуха, а следовательно, на бедных смесях. Стационарные и судовые двигатели имеют избытки воздуха, равные около 100% (коэффициент $KC = 0,5$). Эти значения коэффициента KC на рис. 33 не показаны, но имеются другие графики, охватывающие и этот диапазон. Теоретические значения коэффициента KC могут быть подсчитаны на основании газового анализа по методу В. Оствальда, предложившего для этой цели хорошо известный треугольник сгорания [11]. В области сгорания с избытком топлива, однако, где образуется CO , при составлении треугольника сгорания В. Оствальдом было принято, что H_2 сгорает полностью. Это неверно применительно к горению углеводородов в двигателях, поэтому треугольник сгорания в этом случае не может быть использован. Применение его допустимо только в области с избытком воздуха.

147. Большая теплопроводность H_2 положена в основу электрического метода определения состава смеси при избыточном количестве топлива (богатая смесь) с помощью простого шкального прибора с прямым считыванием параметра (кэмбриджский газоанализатор). Недостаток этого метода состоит в том, что при бедных смесях стрелка отклоняется в противоположную сторону, и использование прибора становится невозможным. В авиационных двигателях использование этого прибора в целом не вызвало возражений, но сейчас от него отказались и прибегают к помощи точного измерения расхода топлива и к графикам, по которым можно определить расход воздуха или количество топлива, необходимое для работы при различных эксплуатационных режимах.

Сгорание в бензиновых и газовых двигателях

148. В этих Двигателях, иногда объединяемых под термином двигатели со сжатием смеси или двигатели с искровым зажиганием, процесс сгорания смеси имеет характер постепенного взрыва, в большинстве случаев начинающегося от одной или двух свечей зажигания.

В последние годы нашло применение также инициирование горения за счет самовоспламенения небольшого количества жидкого топлива, в большинстве случаев дизельного, а иногда и специальной зажигающей жидкости. Этот метод осуществления процесса будет разобран отдельно.

Практически во всех этих случаях горючая смесь, которая в момент воспламенения может рассматриваться как гомогенная, образуется в период процесса впуска. С точки зрения горения безразлично, осуществляется ли приготовление смеси вне цилиндра (карбюратор, смесительный клапан, впрыск во впускную трубу) или непосредственно в цилиндре двигателя (впрыск в период впуска).

В дальнейшем такие проблемы, как неравномерное распределение, из-за которого отдельные цилиндры получают смесь различного состава или смесь, обладающую различной антидетонационной стойкостью, будут затрагиваться в связи с их влиянием на горение.

НОРМАЛЬНОЕ ГОРЕНИЕ

149. Как уже было отмечено, постепенный взрыв в двигателе происходит в смеси, которая была приведена в интенсивное движение или турбулизована, а иногда

характеризуется и направленными потоками, возбужденными в период впуска или во время сжатия. Это приводит к тому, что скорость пламени существенно превышает нормальную скорость горения и достигает значений порядка от 30 до 40 м/сек и более, вследствие чего сгорание может быть завершено в течение времени, соответствующего нескольким десяткам градусов поворота коленчатого вала. Так как указанные движения заряда большей частью вызваны движением поршня (абзац 64), они усиливаются при увеличении скорости вращения коленчатого вала, что приводит к высокой степени приспособляемости скорости пламени к скоростному режиму двигателя, делая возможным получение эффективного процесса в широком диапазоне изменения чисел оборотов. В то же время при усилении турбулизации, которая в первом приближении пропорциональна скорости вращения, увеличивается теплоотдача в стенки камеры "сгорания. Можно принять, что теплоотдача пропорциональна числу оборотов коленчатого вала двигателя в степени $2/3$.

150. Различные наблюдения: визуальные — через маленькие кварцевые окна, установленные в нескольких местах головки, и позднее — через большие окна, позволяющие наблюдать горение целиком, а также с помощью так называемых ионизационных промежутков (датчиков), установленных в нескольких точках камеры, которые последовательно становятся токопроводящими из-за продвигающегося фронта пламени, сделали возможным изучение горения в двигателях с искровым зажиганием, причем полученные результаты оказались в соответствии с теоретически ожидаемыми. На рис. 32 показаны фотографии процессов горения, ясно иллюстрирующие направление потоков, имеющихся в камере (три различных взрыва). Еще лучшие результаты были получены в случае применения так называемого Шлирен-метода, основанного на использовании преломления света от сильных источников, таких как электрические разряды. Так как степень преломления света является следствием различий плотности газового заряда, то оказывается возможным наблюдение переменной плотности смеси в камере сгорания. При этом методе используются короткие выдержки (10^{-6} сек) и поэтому оказывается возможным наблюдение влияния даже очень малых пульсаций в турбулирован-

ной массе заряда (рис. 33). Фронт пламени, имеющий наибольшие отличия плотности от остального заряда, оказывается, имеет большую ширину (толщину) в неко-



Рис. 32. Фотографии пламени, полученные на двигателе фирмы Дженерал Моторс, иллюстрирующие влияние турбулизации заряда

торых местах, что могло бы свидетельствовать о более продолжительном времени реакции. Хотя это находится в соответствии с представлениями некоторых исследова-



Рис. 33. Шлирен-фотографии, полученные на двигателе NASA при единичном взрыве, иллюстрирующие турбулентный характер горения. Используются две свечи зажигания

телей, более простым объяснением этого факта может служить трехмерность фронта пламени, регистрируемого на фотографиях, что делает возможным получение частично косой его проекции.

151. Использование фотографий, подобных приведенным на рис. 32, и диаграмм давления, полученных одновременно с фотографиями, позволило оценить количества энергии, выделенные в единицу времени, причем для каждого момента времени общее количество сгоревшей смеси получалось из диаграмм давления, а объем сгоревшей смеси определялся по фотографиям [12]. Было получено весьма хорошее совпадение, указывающее на то, что превращение энергии завершается уже достаточно

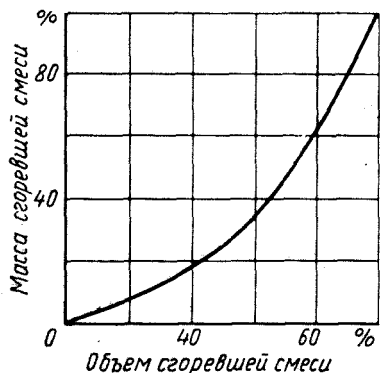


Рис 34. Зависимость между массой и объемом сгоревшей смеси

близко за фронтом пламени. Также было выявлено, что отношение объемов газов до и после горения находится в соответствии с термодинамическим расчетом, проведенным при помощи графиков Хоттеля [13].

152. Если в экспериментальном двигателе со степенью сжатия $\epsilon = 5$ на основании эксперимента построить зависимость массы уже сгоревшего заряда от объема заряда после сгорания, то получается кривая (рис. 34), характер протекания которой показывает, что значительная часть энергии претерпевает превращение в последней части объема полости камеры сгорания. Это объясняется предварительным сжатием несгоревшего заряда в этом объеме (см. абзац 52).

153. Требования к бездетонационному сгоранию были изложены в абзаце 9. Из них здесь одно подчеркнем особенно. В авиационном двигателе, например, учитывая необходимость достижения в нем высокой литровой мощности, а также принимая во внимание тепловую напряженность, с одной стороны, упор делается на достижение высокого наполнения (за счет относительно умеренных скоростей впуска) и снижение тепловых потерь (слабая турбулизация). С другой стороны, стремятся достигнуть максимальной экономии топлива при полетах на дальние расстояния, что достигается увеличением степени сжатия ϵ и применением более стойкого к детонации (более

дорогостоящего) топлива. Баланс экономики в авиации с точки зрения уменьшения общих расходов в первую очередь требует экономии в массе (как двигателя, так и топлива). Наконец, соображения прочности, помимо тех, которые имеют отношение к наполнению (большие клапаны), и высокая тепловая нагрузка требуют применения очень простых конфигураций камеры сгорания. Сочетание этих требований (особенно ограниченная турбулентность) приводит к тому, что горение иногда может протекать очень нестабильно (рис. 35). Позднее стабильность была увеличена в результате тщательного изучения турбулентности, возникающей при впуске. Установка двух свечей зажигания в каждом цилиндре из условий большей надежности также способствует более стабильной работе двигателя и ускоряет горение.

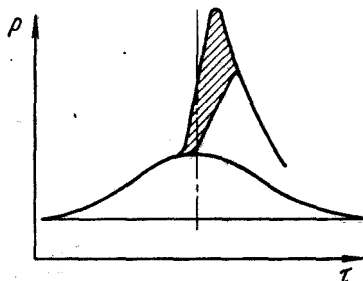


Рис. 35. Разброс циклов давление — время за определенный отрезок времени в двигателе с искровым зажиганием и слабой турбулизацией заряда

154. В автомобильном двигателе наибольшее значение имеют: высокая приемистость, высокая топливная

экономичность при постоянных эксплуатационных скоростях движения и мягкая работа двигателя. Мягкая работа двигателя — очень общее понятие. Оно включает в себя весьма различные факторы. В первую очередь мягкая работа определяется равномерной работой двигателя в целом; поэтому во всех цилиндрах должен происходить идентичный процесс так, чтобы ритм работы, например шести цилиндров (три цилиндра на каждый оборот в случае четырехтактного двигателя), не модулировался бы ритмом, имеющим частоту, равную одной шестой от этой основной частоты. Практически все современные авиационные и автомобильные двигатели имеют основную частоту колебаний крутящего момента выше собственной частоты подвески двигателя на шасси автомобиля или самолета. Поэтому возмущение со значительно более низкой частотой будет явно обнаруживаться (рис. 36), если частота этого возмущения близка к собственной частоте подвески двигателя. Это приводит к тому, что

на шасси передаются значительные реактивные моменты.

155. Понятие «мягкая работа» включает действительное повышение давления в том смысле, как это уже обсуждалось в абзаце б. Для мягкой работы двигателя, особенно при полной нагрузке (ускорении), требуется равномерное повышение давления. Для этого нужно уметь управлять горением в широком диапазоне чисел оборотов, плотности заряда и состава смеси. С этой точки зрения представляется особенно важным более глубокое изучение



влияния

Рис. 36. Иллюстрация причин жесткой работы четырехцилиндрового двигателя, имеющего частоту колебания на подвеске ниже частоты вынужденных колебаний при ненормальном сгорании в одном из цилиндров:

/ — резонанс (собственная частота); // — частота возбуждающего импульса при одном ненормально работающем цилиндре; /// — частота вынужденных колебаний при работе четырехцилиндрового двигателя

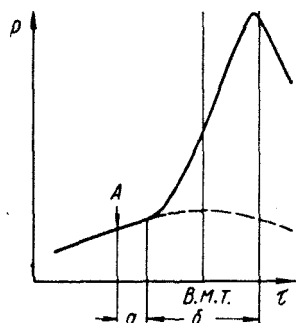


Рис. 37. Диаграмма давление — время двигателя с искровым зажиганием, иллюстрирующая запаздывание повышения давления:

A — пробой искрового промежутка; a — «задержка» повышения давления; $б$ — время сгорания

турбулизации и конструкции камеры сгорания на процесс, чем в случае авиационных двигателей.

Так как для достижения минимальной стоимости двигателя и обеспечения высокого механического к. п. д. число опор коленчатого вала делается как можно меньшим, а диаметр подшипников также ограничивается, приобретает особую важность влияние повышения давления в камере сгорания на работу двигателя.

156. В первую очередь рассмотрим процесс сгорания в одноцилиндровом двигателе, в котором количество и состав смеси остаются неизменными в течение всех рабочих циклов.

При дальнейшем рассмотрении будем базироваться на диаграмме давление—время (рис. 37). Как уже отме-

чалось выше (абзац 73), на диаграмме должен быть выделен период весьма незначительного повышения давления, следующий за проскоком искры (время задержки, но не индукционный период), и весь процесс может быть разделен на:

1) период времени, в течение которого не происходит заметного повышения давления;

2) собственно период горения или период, в течение которого происходит повышение давления.

Представляются важными следующие параметры: продолжительность задержки повышения давления; продолжительность собственно процесса горения; форма кривой давления; достигнутое давление сгорания.

Очень трудно определить задержку теоретически, так как ни теоретически, ни даже по фотографии пламени невозможно достаточно точно наметить критическую точку. Но так как задержка повышения давления является характерным периодом диаграммы давления и, как будет показано далее, величиной, зависящей от изменения определенных факторов, представляется необходимым использование и объяснение этого термина.

Чем больше задержка, тем больший угол опережения зажигания должен быть установлен, чтобы повышение давления происходило в требуемый интервал времени. Нежелательность длительной задержки связана с тем, что она изменяется с плотностью заряда, составом смеси и скоростью вращения коленчатого вала, и поэтому соответственно возрастают трудности регулирования угла опережения зажигания в зависимости от этих факторов. Задержка возрастает при уменьшении плотности заряда, при более низкой степени сжатия и меньшей степени турбулизации заряда. Более того, задержка зависит от состава смеси, так что минимум ее наступает где-то при значении коэффициента $KC = 1,1$. Задержка увеличивается особенно при обеднении смеси, в связи с чем обычно приходится применять относительно богатую смесь в тех случаях, когда прочие условия вызывают удлинение задержки. Как следствие этого, при экономической регулировке, которая включает использование бедных смесей на частичных нагрузках, необходимо найти способы сокращения задержки и использовать их при обедненной смеси.

157. Опыты, проведенные на одноцилиндровом двигателе [14] размерностью: диаметр 82,5 мм, ход 114,3 мм,

работавшем при $n = 1720$ об/мин, расширили представление о природе задержки. При использовании сухой смеси, полученной подогревом заряда до необходимой температуры, и гомогенизирующего сосуда, установленного между карбюратором и двигателем, имеющего объем, в 40 раз больший рабочего объема двигателя, были проведены измерения продолжительности задержки и всего остального периода горения при различных условиях работы двигателя. Изменялись давление и температура на впуске, степень сжатия, состав смеси, а также степень и характер турбулизации заряда.

Было найдено возможным объединить влияние давления и температуры на впуске и степени сжатия в комплексе, так как важными оказались лишь температура и давление в конце сжатия (более точно в момент проскакивания искры). Период горения, следующий за задержкой, оказался зависящим от упомянутых факторов в значительно меньшей степени.

Интересные результаты были получены при изменении состава смеси. С точки зрения экономического регулирования важно знать наименьшее значение коэффициента KC , которое может быть применено на практике. 158. С обычным впускным клапаном (рис. 38, 1) и каналом, не имеющим специально спрофилированные очертания и предположительно создающим незначительное направленное движение заряда и умеренную микротурбулентность (скорость впуска, оцененная по диаметру горловины клапана и средней скорости поршня, составляла 50 м/сек), были получены значения задержки и длительности горения, показанные на рис. 38 кривыми 1, причем здесь каждому составу смеси соответствует оптимальный угол опережения зажигания. Было найдено, что даже при оптимальном составе смеси продолжительности задержки соответствует значительное число градусов поворота коленчатого вала. При коэффициенте $KC = 0,91$ достигался минимальный расход топлива, в то время как при коэффициенте $KC = 0,83$ наблюдался предел устойчивых вспышек, и дальнейший подбор угла опережения зажигания оказывался невозможным.

При этом следует отметить весьма значительный разброс точек, отвечающих продолжительности задержки, так что приходилось пользоваться средними значениями (абзац 162). Вследствие этого разброса на диаграммах

давления также обнаруживались различия, особенно в зоне максимальных давлений сгорания; именно в этом, следовательно, уже можно усмотреть первую причину недостаточно мягкой работы двигателя, несмотря на то, что само по себе горение не было резким. Примечательно, что продолжительность собственно горения в функции состава смеси изменяется в значительно меньшей степени, чем время задержки.

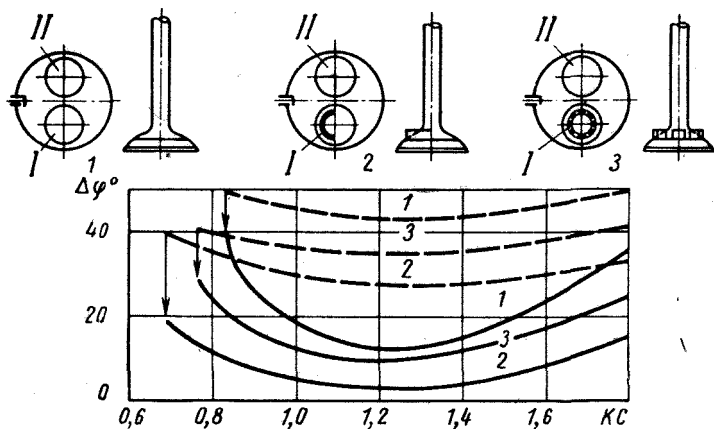


Рис. 38. Влияние турбулентности на задержку повышения давления, время сгорания и минимальные практические значения коэффициента

/ — впуск; // — выпуск; 1 — при слабой турбулентности; 2 — при наличии направленного вихря; 3 — при высокой турбулентности. Сплошные линии — задержка повышения давления; штриховые линии — время сгорания (стрелками показаны минимальные практические значения $КС$)

159. Можно представить, что развитие горения в граничном слое у стенок камеры (рис. 39) в течение задержки определяется нормальной скоростью сгорания, так как заряд здесь практически неподвижен, в то время как развитие горения в остальной части заряда, в той или иной мере турбулизированной, определяется скоростью этого турбулентного движения. Как было установлено, это приводит к тому, что продолжительность горения оказывается в меньшей степени зависящей от нормальной скорости сгорания. Следовательно, типичное развитие процесса с некоторой задержкой повышения давления, видимо, связано с медленным горением начального

полусферического объема в граничном слое, в результате чего в течение некоторого периода времени выделение энергии весьма невелико.

160. После того как было обнаружено, что при работе вблизи зоны предельного обеднения смеси частичное закрытие дроссельной заслонки, расположенной непосредственно перед впускным клапаном, привело к улучшению работы двигателя, были проведены эксперименты с заширленным клапаном (см. рис. 38), который в принципе создавал направленное движение заряда вокруг

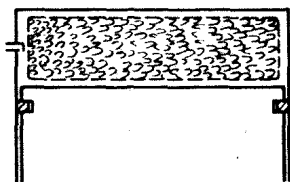


Рис. 39. Схематическое изображение пограничного слоя, в котором происходит зажигание смеси (начинается горение)

оси цилиндра. Увеличенное сопротивление этого клапана было скомпенсировано, так что достигалась та же плотность заряда, что и без ширмы на клапане. Из графика (кривые 2 на рис. 38) видно, что время задержки заметно снизилось, вследствие чего значения коэффициента KC , соответствующие минимальному расходу топлива и пределу устойчивого воспламенения, также уменьшились.

Продолжительность горения также сократилась из-за повышенной интенсивности движения заряда. Наиболее правдоподобное объяснение причин сокращения задержки сводится к предположению, что направленное движение заряда с высокой скоростью уменьшило толщину застойного пограничного слоя.

161. Улучшение работы двигателя при дросселировании вблизи впускного клапана произошло в результате увеличенной турбулентности, вызванной частичным прикрытием дроссельной заслонки. Это явление известно из практики (рис. 40), и большинство водителей знает, что для быстрого повышения числа оборотов нужно относительно плавно нажимать на педаль подачи топлива. При этом имеют значение и другие факторы, такие, например, как улучшенное распыливание и испарение топлива у кромок дроссельной заслонки, что было исключено в опыте Ван Хуугстратена.

162. Для выяснения того, влияет ли на работу двигателя направленное движение заряда в большей или меньшей степени, чем ненаправленная турбулентность, был изготовлен другой клапан, тоже частично экраниро-

ванных, но уже в виде шести отдельных равномерно расположенных по окружности маленьких экранов (см. клапан на рис. 38, 3). Размеры этих экранов были подобраны опытным путем так, чтобы клапан оказывал потоку такое же сопротивление, как и предыдущий обычный заширленный клапан. Это позволяет предположить, что в обоих случаях при впуске одинаковое количество

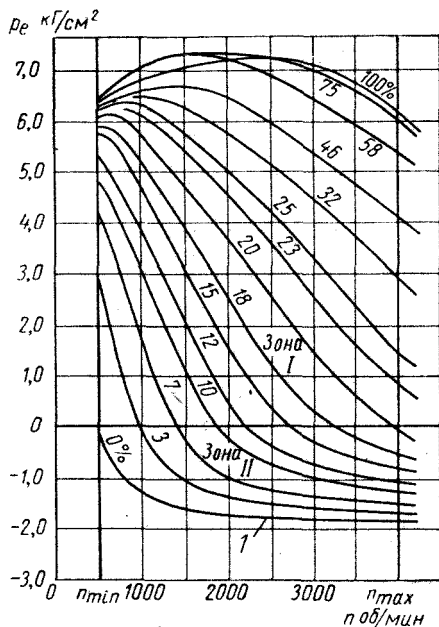


Рис. 40. Изменение среднего эффективного давления двигателя в зависимости от числа оборотов при различных положениях дроссельной заслонки:

I — линия среднего давления внутренних потерь при закрытой дроссельной заслонке

работы было превращено в энергию движения. Результат, как видно из кривых 3 на рис. 38, ясно свидетельствует о меньшем эффекте микротурбулентности. Задержка вновь заметно возросла во всем диапазоне составов смеси. Продолжительность горения также увеличилась. Это, вероятно, связано с тем, что в период между впуском заряда и проскакиванием искры имеют место потери энергии вследствие трения (см. опыт Клерка, абзац б1). Правдоподобным является предположение о том, что в случае направленного вращательного движения заряда вокруг оси цилиндра к моменту горения сохраняется не рассеянной большая часть первоначальной энергии, чем в случае ненаправленной, хаотичной турбулентности.

Во всех этих опытах было показано, что при меньших задержках уменьшается разброс диаграмм давления, что также наблюдалось в опытах НАСА при использовании вращающегося заряда [15].

163. Некоторое влияние оказывает длина искры, особенно при бедных смесях и слабой турбулизации (рис. 41). Следует также отметить тот факт, что напряжение пробоя искрового промежутка зависит от плотности заряда, величины искрового зазора, а также от состава смеси, причем напряжение это максимально в случае бедных

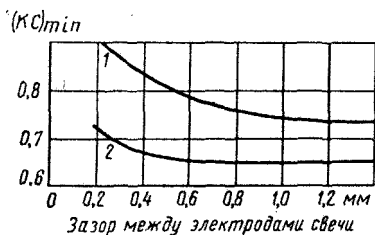


Рис. 41. Влияние величины зазора между электродами свечи на практические значения коэффициента $КС_{min}$:

1 — клапан обычного типа; 2 — клапан с ширмой

смесей. Следовательно, при применении бедных смесей повышаются требования к аппаратуре зажигания. Система зажигания с низким напряжением, включающая специальные свечи, дающие поверхностный разряд (предложение Бейджи Смитса), должна обеспечить определенное улучшение зажигания бедных смесей.

164. Из сказанного выше следует, что для эффективной и экономичной регулировки двигателя в широком диапазоне нагрузок и чисел оборотов нужно добиться необходимой степени турбулизации заряда. Рикардо [16] уже в начале двадцатых годов подчеркивал желательность последней, для того чтобы избежать затяжного горения и пропуска вспышек вследствие невозможности развития горения смеси в застойном пограничном слое. Он первым ввел дополнительную по отношению к той, которая создается при впуске, турбулизацию заряда с помощью поршня, снабженного вытеснителями, которые подходят близко к головке цилиндра и вытесняют часть заряда из пространства над вытеснителями в камеру сгорания, тем самым повышая турбулизацию заряда. Однако требования, возникающие при работе на частичных нагрузках с низким значением коэффициента $КС$ с целью достижения наибольшей экономичности, простираются значительно дальше. В этом случае необходимо добиться такого смешения свежего заряда со сгоревшими остаточ-

ными газами, которое обеспечивало бы создание у свечи оптимальных и стабильных условий для развития очага воспламенения, особенно при малой нагрузке.

165. Наилучший результат был бы достигнут, если бы смешение совсем отсутствовало (имело место так называемое расслоение смеси), т. е. чтобы только свежая смесь направлялась на свечу зажигания и оставалась там к моменту воспламенения. Последнее условие едва ли практически выполнимо, так как вслед за окончанием впуска следует длительный промежуток времени, в течение которого продолжается движение заряда. Поэтому это условие требует применения разделенной камеры сгорания (абзац 227), которая не нашла еще сколько-нибудь заметного применения на практике.

166. Альтернативным решением является интенсивное перемешивание за счет мелкокомасштабной турбулентности для достижения однородного состава смеси в камере, включая самые мелкие зоны. Такое интенсивное перемешивание должно иметь место по меньшей мере в объеме вокруг свечи зажигания. В современной практике создание турбулентности за счет вытеснения заряда поршнем (так называемый «сквиш» Рикардо) используется весьма широко. В результате достигается высокая степень гибкости (устойчивое горение даже при низких числах оборотов) в сочетании с высокой удельной мощностью, причем одновременно на частичных нагрузках оказывается возможным использование бедных смесей. Очевидным является благоприятное влияние высокой степени сжатия ϵ на снижение количества остаточных газов.

167. Важно то обстоятельство, что на практике не представляется возможным обеспечивать на всех режимах работы двигателя с достаточной точностью оптимальный угол опережения зажигания. В автомобильных двигателях изменение момента зажигания достигается с помощью комбинированного устройства, в котором опережение зажигания увеличивается посредством центробежного регулятора при повышении числа оборотов и дополнительно контролируется специальным устройством, работающим под действием разрежения во впускном трубопроводе таким образом, что опережение зажигания возрастает при низких давлениях (более высоком вакууме, рис. 42). Оба устройства, однако, обеспечивают лишь простейшую, обычно линейную зависимость опережения зажигания

от выбранного параметра, причем для их успешной работы желательно, чтобы диапазон изменения опережения зажигания не превышал суммарного значения в $15\text{--}20^\circ$. Автоматы контроля должны быть скомбинированы таким образом, чтобы обеспечить наиболее благоприятные условия работы двигателя на всех режимах с учетом изменения состава смеси при изменении нагрузки. Кроме того, они должны предотвращать возможность возникновения детонации при полном открытии дроссельной заслонки и на малых числах оборотов, обеспечивая запоздывание подачи искры по сравнению с моментом, оптимальным для случая, когда горение не сопровождается детонацией.

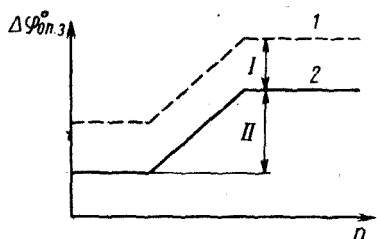


Рис. 42. Иллюстрация работы центробежного и вакуумного автоматов опережения зажигания:

I — область работы вакуумного автомата; II — область работы центробежного автомата; 1 — при высоком вакууме; 2 — Яри низком вакууме

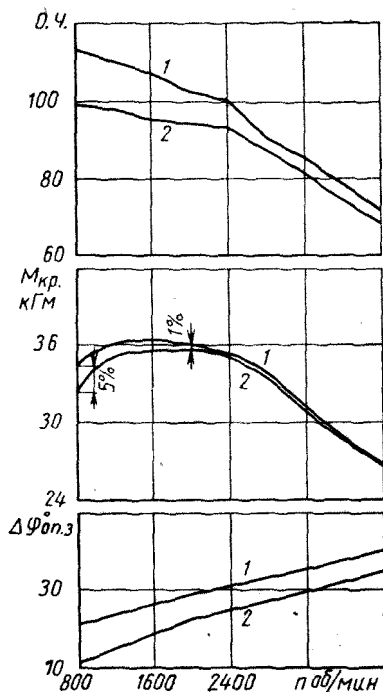


Рис. 43. Возможность изменения октанового числа топлива уменьшением угла опережения зажигания:

1 — при регулировке угла на максимальную мощность; 2 — при более поздней регулировке

В течение длительного времени, когда низкие антидетонационные качества коммерческого бензина препятствовали развитию двигателей, состав смеси и степень сжатия подбирались так, что с имевшимися тогда топливами достигался компромисс между хорошей экономичностью и благоприятным протеканием кривой крутящего момента. Нередко выбирали повышенные значения сте-

пени сжатия с целью достижения высокой экономичности и шли на уменьшение крутящего момента в зоне малых чисел оборотов. При этом в тех редких случаях, когда использовался полный крутящий момент, двигатель на малых числах оборотов работал с недобором мощности на несколько процентов из-за несколько заниженного угла опережения зажигания (рис. 43). В настоящее время при доступности высокооктановых топлив такая регулировка двигателя является менее распространенной.

168. Действительные моменты зажигания соответствуют оптимальным только при определенных условиях, причем чем меньше задержки начала заметного повышения давления, тем ближе действительные моменты опережения зажигания к оптимальным значениям и тем ниже потери по сравнению с оптимальными регулировками.

169. Трудности, связанные с достижением оптимальной регулировки двигателя, резко возрастают в случае многоцилиндровых двигателей вследствие различий в плотности и составе заряда, попадающего в отдельные цилиндры (эти различия иногда дополнительно усиливаются из-за частичного испарения легких фракций, см. абзац 213), которые могут зависеть от геометрии впускного трубопровода и колебаний столба газа в нем. В случае применения более богатой смеси эти трудности значительно уменьшаются. Однако это не является наилучшим решением задачи.

СОБСТВЕННО ГОРЕНИЕ (см. абзац 156)

170. Из приведенного выше ясно, что период горения не так подвержен изменениям, как время задержки. Он определяется условиями турбулентности и максимальным размером камеры сгорания, измеренным от электродов свечей. О продолжительности периода сгорания в качестве первого приближения можно утверждать, что она мало зависит от состава смеси и степени сжатия и увеличивается обратно пропорционально скорости вращения коленчатого вала. Полное повышение давления в результате горения, однако, возрастает прямо пропорционально плотности заряда и степени сжатия (что может быть рассчитано с помощью простых термодинамических соотношений), так что в целом повышение давления ускоряется с увеличением плотности разряда, повышением

степени сжатия и увеличением числа оборотов двигателя, в связи с чем, следовательно, также возрастает вероятность нежелательных динамических эффектов (абзац 6).

171. Попытки противодействовать этим эффектам привели к проблеме конструирования камеры сгорания. В свое время Рикардо [16] уделил большое внимание этой проблеме, вначале со специальной целью подавления детонации, а позднее — также для контроля степени турбулизации.

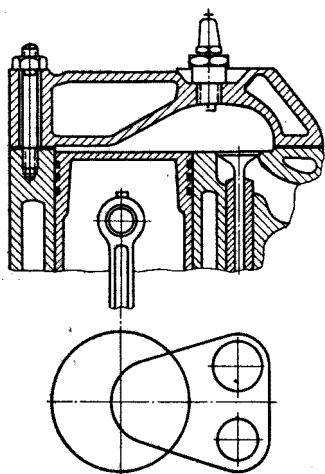


Рис. 44. «Турбулентная» головка Г. Рикардо

Уотмоу [17] добавил к этому контроль температуры стенок, причем он в основном имел в виду подавление предпламенных реакций в части заряда, сгорающей в последнюю очередь, которые могли бы усиливать уже имеющуюся тенденцию ускорения повышения давления к концу горения.

Рикардо также придавал значение так называемому охлаждению (гашению) конечной порции заряда; в его когда-то знаменитой «турбулентной» головке с нижним расположением клапанов конечная порция заряда оказывалась сжатой в относительно тонком слое между

частью поршня и головкой цилиндра (рис. 44). Это совместное действие завихривания, вызванного (в течение последней части сжатия) движением поршня (абзац 164) и той турбулентностью, которая уже была создана ранее при впуске, и охлаждения конечной порции заряда оказалось столь полезным (рассмотрим этот процесс в абзаце 175), что даже в двигателях с верхним расположением клапанов делались попытки применения аналогичных форм камер сгорания, что, однако, уже представляется ретроградством по сравнению с использованием простых и более компактных форм камеры. Необходимо принимать во внимание не только допустимую для бензина с заданным октановым числом степень сжатия, но и конечный результат процесса в виде достигаемого среднего эффективного давления. Можно усилить эффект охлаждения (гашения)

до такой степени, что при данном октановом числе окажется возможным использование более высокой степени сжатия, что, однако, будет сопровождаться большими тепловыми потерями и затянутым процессом горения. Кроме того, более высокая степень сжатия повлечет за собой необходимость использования более массивного коленчатого вала и, следовательно, вызовет повышение механических потерь.

172. Смещение периода создания турбулентности с такта впуска на конец сжатия имеет свои преимущества, так как при этом оказывается возможным увеличить диаметр впускного канала и вследствие этого повысить наполнение. Кроме того, на турбулизацию, создаваемую в период сжатия, требуется меньшая затрата энергии, так как меньше времени проходит между созданием и использованием вихрей. Более сложная форма камеры сгорания менее удачна с точки зрения тепловых потерь, причем это может особенно проявиться при низком числе оборотов. Однако одновременное с увеличением тепловых потерь улучшение протекания горения столь велико, что имеет преобладающее значение. Увеличенная конвективная теплоотдача от заряда к стенкам снижает предельные значения удельной мощности, что является решающим фактором, из-за которого подобные технические решения не применяются в авиационных двигателях. Для автомобильных двигателей это несущественно, так как на режиме полной мощности можно в крайнем случае прибегнуть к использованию богатой смеси в качестве своеобразного внутреннего охлаждения (абзац 182).

173. Весь комплекс факторов, с помощью которых осуществляется воздействие на процесс сгорания, требует длительных экспериментов и опытной доводки (это особенно справедливо в части достижения мягкого горения). Самуэльс, бывший конструктор фирмы Шевроле, ввел метод гипсовых моделей, который стал широко известен благодаря Таубу [18]. При использовании этого метода изготавливается гипсовая модель конструируемой камеры сгорания, которая устанавливается так, чтобы ее можно было вращать. Центр вращения располагается в той точке, где должна быть установлена свеча зажигания. С помощью небольшого резца с модели последовательно снимаются сферические сегменты, а остающаяся часть ее взвешивается. Исходя из простейшего предположения, что

в период горения поршень находится в в. м. т. и что фронт пламени всегда имеет сферическую форму, причем свеча расположена в центре этой сферы, определяется объем заряда, сгорающего на данном радиусе этого идеализированного фронта пламени, и строится график увеличения объема сгоревшего газа в зависимости от радиуса

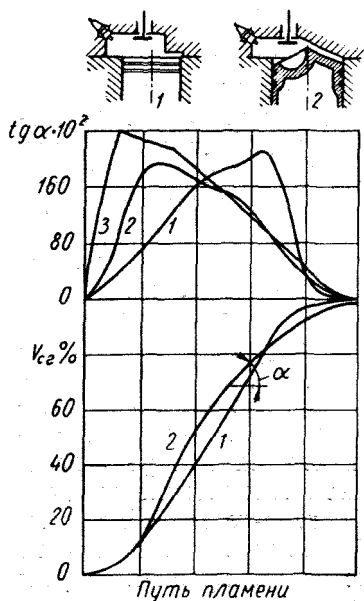


Рис. 45. Анализ камер сгорания по Самуэльсу:

1 — «жесткий» процесс; 2 — «мягкий» процесс; 3 — идеальный процесс

фронта пламени. Этот радиус является функцией видимой, а соответственно также и действительной скорости пламени, так что в итоге определяется объем сгоревшего заряда в функции времени. В принципе, если пренебречь сделанными упрощениями, таким образом можно определить повышение давления в функции времени. Опытным путем было найдено, что для получения мягкого горения увеличение объема V_{c2} сгоревшего заряда в функции радиуса сферы должно удовлетворять определенным требованиям (рис. 45). Это нередко приводило к принятию своеобразных форм головок цилиндров и поршней (рис. 46). Конструктор, однако, должен стремиться достичь цели наиболее простыми средствами, применив, в частности, поршни, имеющие плоские днища.

174. Изучая многочисленные конструкции двигателей, которые создавались на протяжении длительного времени, довольно трудно выяснить, чем именно были мотивированы в прошлом решения ряда конструкторов. В более поздних конструкциях можно обнаружить общий принцип, сводящийся к тому, чтобы сосредоточить возможно больший объем вокруг свечи зажигания и направить фронт пламени в сторону более узких объемов, таких как зазор между головкой цилиндра и поршнем. Так как мягкость работы двигателя является весьма

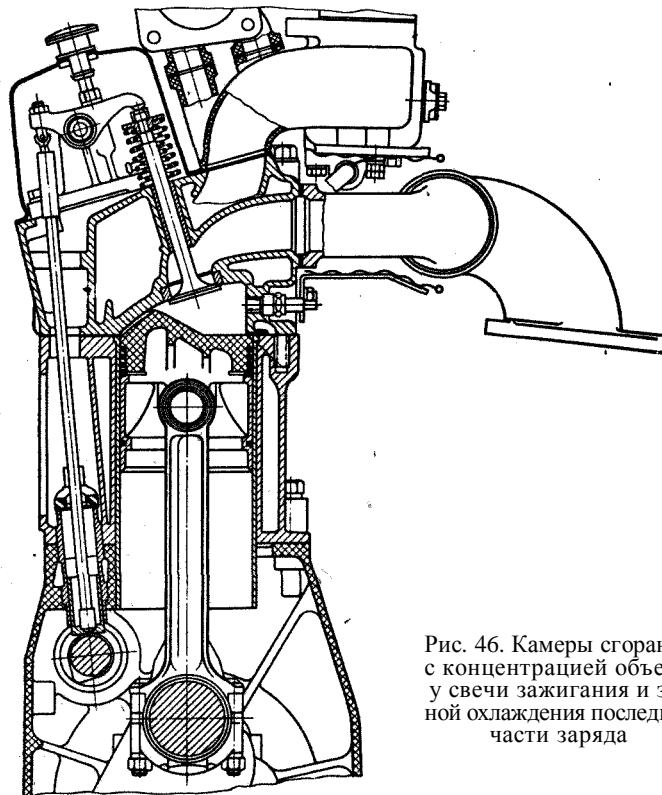
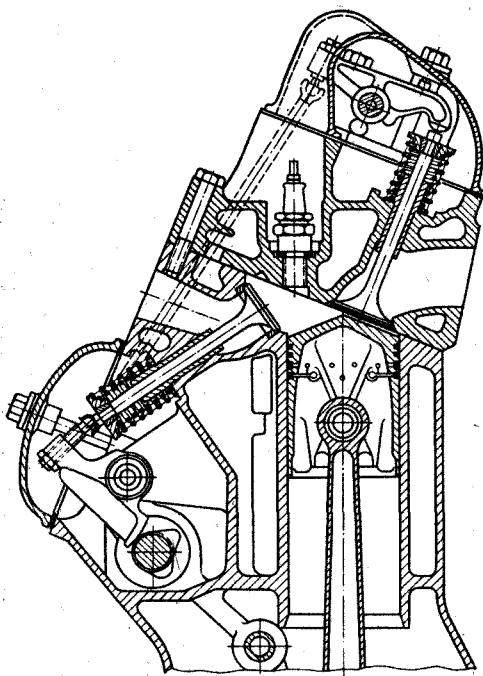


Рис. 46. Камеры сгорания с концентрацией объема у свечи зажигания и зоной охлаждения последней части заряда

субъективным фактором и, более того, внешнее ее проявление зависит также от конструкции деталей двигателя, понятно, что в принятых различными конструкторами решениях имеются большие различия. В настоящее время наблюдается тенденция обеспечивать мягкую работу двигателя даже при очень быстром горении за счет применения более жесткой конструкции коленчатого вала с большим числом подшипников (дизели).

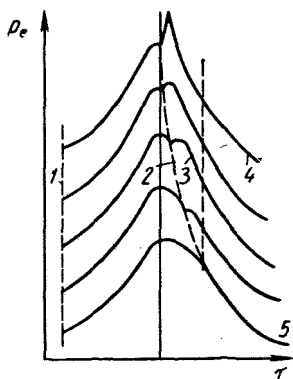


Рис. 47. Индикаторные диаграммы при различной интенсивности детонации:

1 — начало горения; 2 — начало детонации; 3 — конец нормального Горения; 4 — сильная детонация; δ — детонации нет

в зазоре между поршнем и головкой, дает хорошее конструктивное решение одновременно с точки зрения турбулизации заряда и охлаждения последней его части (абзац 171).

На рис. 47 показаны индикаторные диаграммы двигателя с боковым расположением клапанов, на которых хорошо обнаруживается закругление в конце повышения давления.

Характер повышения давления, определенный при различных интенсивностях детонации, выявляет наличие длительного периода догорания, являющегося характерным для рассматриваемой камеры со значительной протяженностью зоны, в которой сосредоточена последняя хорошо охлаждаемая часть заряда.

175. Из сказанного следует, что, кроме собственно формы камеры сгорания, очень важное значение имеет расположение свечи зажигания, так как в целом форма камеры как бы рассматривается из этой точки. Расположение свечи зажигания зависит от ряда дополнительных факторов. Помимо конструктивных соображений (доступность для обслуживания, условия охлаждения), важно, чтобы конечная часть заряда располагалась в месте, оптимальном в отношении стойкости против детонации, а следовательно, например, не там, где расположен выпускной клапан.

Наиболее желательное распределение объема заряда, сводящееся к сосредоточению части объема

176. Следует помнить, что в действительности взаимосвязь конструкции и процессов намного сложнее описанной выше связи, и на скорость превращения энергии влияют непрерывно изменяющиеся условия турбулентности и эффекты, связанные с локальными температурами стенок. В этом последнем аспекте важное значение имеет техника литья; смещенные стержни, ведущие к ненормально толстым сечениям металла, могут свести на нет эффект охлаждения последней части заряда в зазоре. Важно также обеспечить надлежащим образом направленное течение охлаждающей жидкости и применять мягкую воду, чтобы избежать осаждения накипи в интенсивно охлаждаемых местах.

177. В отношении ранней стадии горения Тауб указывает на преимущества так называемых «далеко достающих свечей» — свечей зажигания с электродами, сильно выступающими в камеру. Помимо преимущества, состоящего в том, что они выступают из неподвижного граничного слоя (абзац 159) и поэтому обеспечивают сокращение периода задержки повышения давления, подобные электроды также обеспечивают возможность вовлечения больших масс заряда в горение на ранней его стадии, так что благоприятным образом изменяется зависимость объема сгорающего заряда от времени. Практически, однако, возможности применения таких свечей весьма ограничены из-за высокой тепловой нагрузки, которой подвергаются свечи зажигания.

178. При обеспечении меньшей продолжительности горения максимальное давление, достигаемое при горении, все более приближается к теоретически возможному. В большинстве случаев, однако, для получения оптимума, отмеченного в абзаце 167, довольствуются более низкими давлениями, достигаемыми за счет более или менее позднего зажигания. Это запаздывание зажигания при высокой термической нагрузке имеет другое важное преимущество, а именно, снижение последней, так как

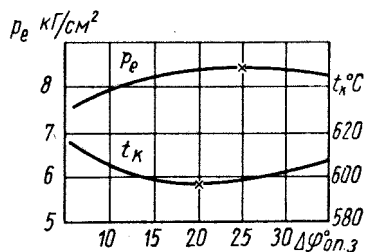


Рис. 48. Зависимость среднего эффективного давления и температуры выпускного клапана от угла опережения зажигания

уменьшается время контакта горячих газов при их максимальной плотности со стенками камеры сгорания. Даже выпускной клапан при этом оказывается в более благоприятных условиях, так как его тепловая нагрузка определяется тем, что он является частью стенки камеры сгорания, и тем, что он служит в качестве выпускного органа. Наинизшая температура t_k выпускного клапана поэтому наблюдается при угле $\Delta\varphi_{оп}$ опережения зажигания, более позднем, чем тот, при котором имеет место максимум среднего давления цикла (рис. 48).

ПРАКТИЧЕСКИ ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СОСТАВЫ СМЕСИ

179. Имеются различные методы выражения соотношения в смеси бензина и воздуха. Теоретически правильный (стехиометрический) состав смеси состоит из весового количества воздуха, примерно в 15 раз превышающего весовое количество топлива, причем соотношение это зависит от содержания углерода и водорода в топливе. В Англии и США обычно принято указывать отношение воздуха к топливу или топлива к воздуху. Тогда шкала соответственно меняется или от значения 20 для бедной смеси до 10 для богатой, причем значение 15 выражает теоретически правильный состав, или от 0,05 для бедной смеси до 0,1 для богатой, причем значение 0,066 отвечает теоретически правильному составу. Но предпочтительнее взять за основу теоретически правильный состав и выразить состав смеси как отношение между теоретически правильным и действительным соотношениями топлива и воздуха в смеси. Тогда получается шкала от 0,7 для бедной смеси до 1,5 для богатой смеси, причем 1 отвечает теоретически правильной смеси. В ГДР и ФРГ¹ обычно используется обратная шкала, в которой большие значения выражают избыток воздуха.

180. Отношение количества воздуха к количеству топлива 20 : 1 (коэффициент $KC = 0,73$) примерно выражает предел воспламеняемости смеси. В случае многоцилиндрового двигателя следует выбирать большие значения коэффициента KC ввиду неравномерного распределения, из-за которого один цилиндр может получить смесь с составом, отличным от того, который подается

¹ А также в СССР. Прим. ред.

в другие цилиндры. Поэтому обычно используются смеси с коэффициентом KC около 0,9, а в старых авиационных двигателях коэффициент KC в случае так называемой бедной смеси превышал единицу. С введением впрыска бензина оказалось возможным использовать более бедные топливом смеси.

АВИАЦИОННЫЕ ДВИГАТЕЛИ

181. Мощность двигателя обычно регулируется количественно с помощью дроссельной заслонки. Изменения в составе смеси создают возможность осуществления частично качественного регулирования. Ясно, что при уменьшении коэффициента KC ниже значения, соответствующего теоретически правильному составу, мощность теоретически уменьшается прямо пропорционально коэффициенту KC (дизель регулируется именно таким образом, так как он может работать при очень большом избытке воздуха). При коэффициенте KC выше единицы мощность (среднее индикаторное давление при постоянном числе оборотов) теоретически не зависит от состава смеси (рис. 49).

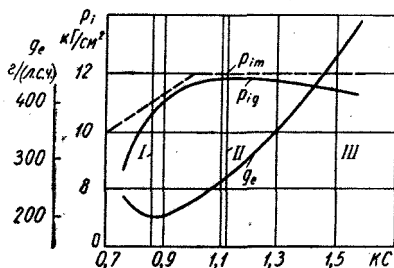


Рис. 49. Влияние коэффициента KC на расход топлива и мощность при постоянной плотности заряда на впуске:

/ — экономичная регулировка; // — мощностная регулировка; /// — зона составов с охлаждающим эффектом

Из-за диссоциации и изменения температуры действительная зависимость будет иной. Удельный расход топлива имеет минимум при составе смеси, несколько более богатой, чем предельный состав, на котором двигатель все еще работает без пропусков вспышек. Это связано с тем, что вспышки становятся все более неравномерными по мере приближения к предельно бедной регулировке.

182. Как можно было ожидать, удельный расход топлива резко растет при увеличении коэффициента KC . Тем не менее на практике богатые смеси используются в случаях, когда нужно получить дополнительную мощность, например, во время взлета, или в чрезвычайных

случаях. Это связано с температурами сгорания. Из-за избытка топлива число молекул в сгоревших газах значительно возрастает, образуются CO и H_2 (абзац 145), так что то же повышение давления достигается при меньшем росте температуры. Стенки двигателя подвергаются меньшей термической нагрузке при том же среднем индикаторном давлении (рис. 50), но, что еще более важно, при этом заметно снижается склонность к детонации (абзац 208), особенно если топливо содержит ароматические соединения. Поэтому оказывается возможным использовать более высокое:

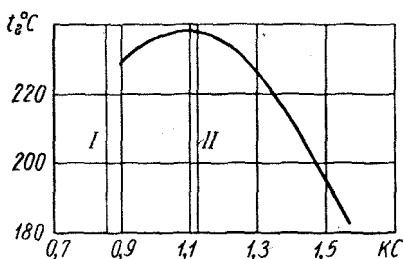


Рис 50. Зависимость температуры головки цилиндра от коэффициента $КС$, иллюстрирующая охлаждающий эффект богатых смесей:

I — экономичная регулировка; II — мощная регулировка

184. На наиболее длительных крейсерских режимах полета с мощностью, равной 50—60% максимальной, осуществляется регулировка на наиболее бедную, практически применяемую смесь. В принципе имеются три изменяемых параметра: число оборотов (с соответствующей установкой шага винта), давление на впуске и состав смеси, причем одна и та же мощность может быть получена при различном сочетании. Наиболее экономичными из них являются: низкое число оборотов, большой шаг винта, высокое давление на впуске и минимально возможное значение коэффициента $КС$. Степень реализации сочетания этих параметров зависит от конструкции двигателя, искусства управления им и качества обслуживания.

Автоматическая регулировка двигателя сильно отличается от этого оптимального сочетания. Поэтому оно должно определяться борт-инженером на месте с использованием характеристик двигателя.

использовать более высокое: давление впуска, что ведет к получению более высокого среднего индикаторного давления. Может быть также увеличено число оборотов двигателя без увеличения термической нагрузки.

183. Для еще большего (кратковременного) увеличения мощности добавляется смесь водного раствора метанола с ТЭС (абзац 210).

185. Обычно на практике при холостом ходе двигателя используется достаточно богатая смесь. Также обычным является переход к богатым смесям при снижении самолета для посадки. Последнее делается для того, чтобы избежать неравномерной работы двигателя после резкого открытия дроссельной заслонки (для преодоления той или иной критической ситуации) вследствие несколько более позднего по сравнению с подачей воздуха роста подачи топлива. Обычно имеется дополнительный насос для подачи добавочной порции топлива при внезапном открытии дроссельной заслонки.

Регулировка на богатую смесь при холостом ходе является просто мерой, способствующей стабилизации числа оборотов двигателя. Характеристика простого карбюратора всегда обеспечивает обогащение смеси при росте числа оборотов, так как сопротивление течению топлива следует линейному закону Пуазейля, а воздуха — закону второй степени Бернулли. Малое открытие дроссельной заслонки обеспечивает в принципе стабильность холостого хода, так как давление на впуске увеличивается при уменьшении скорости, и наоборот. Этому можно помочь, работая на смеси, более богатой, чем та, которая соответствует при рассматриваемых плотностях заряда максимуму среднего давления цикла, так как тогда изменение плотности будет сопровождаться изменением состава смеси, что окажет соответствующее влияние на среднее давление цикла (рис. 51). В случае работы на бедных смесях уменьшение числа оборотов сопровождалось бы обеднением смеси, что могло бы привести к падению среднего давления цикла вместо его повышения; следовательно, работа двигателя была бы нестабильной. При регулировке на очень богатую смесь при холостом ходе двигатель также может работать с сильно колеблющейся скоростью, так как в нем могут наблюдаться пропуски вспышек на максимальных числах оборотов, на которых смесь будет особенно богатой. При этом вслед-

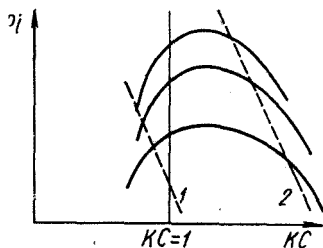


Рис. 51. Зависимость среднего давления цикла от состава смеси при различных плотностях смеси на впуске:

- 1 — нестабильная регулировка;
2 — стабильная регулировка

ствии пропуска вспышек число оборотов двигателя будет падать, а затем вновь расти из-за более благоприятного состава смеси на малых числах оборотов. Хотя и периодичная по характеру, такая работа двигателя может быть весьма стабильной.

АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДВИГАТЕЛИ

186. Автомобильный карбюратор, в принципе простой по конструкции, должен подавать экономичную, следовательно, бедную смесь для работы на нормальном эксплуатационном режиме, и богатую смесь для получения максимальной мощности при работе с ускорением и

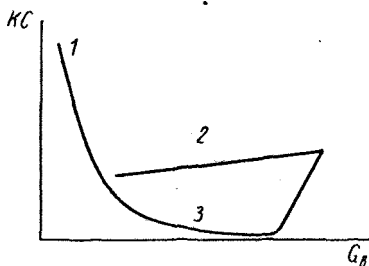


Рис. 52. Зависимость коэффициента $КС$ от расхода воздуха при различных эксплуатационных режимах работы автомобильного двигателя:

1 — холостой ход; 2 — ускорение при полном открытии дроссельной заслонки; 3 — эксплуатационные нагрузки

с полностью открытой дроссельной заслонкой. Характеристика карбюратора, отвечающая этим условиям, представится в виде двойной кривой в координатах: состав смеси — расход воздуха, как показано на рис. 52. Здесь по оси абсцисс отложен расход воздуха, что отвечает условиям испытания карбюратора на стенде. При полностью открытой дроссельной заслонке имеется определенная связь между расходом воздуха и числом оборотов двигателя, в то время как в случае «дорожной» характеристики эта связь между расходом воздуха и числом оборотов двигателя зависит также от таких свойств автомобиля, как сопротивление качению, аэродинамическое сопротивление и т. д. Кривые состава смеси применимы к определенному двигателю. Каждому расходу воздуха соответствует определенное значение коэффициента $КС$, при котором расход топлива минимален. При увеличении расхода воздуха этот минимум смещается в сторону меньших значений коэффициента $КС$. При определенном расходе воздуха максимальная мощность достигается всегда при более высоком значении коэффициента $КС$, чем наилучшая экономичность. Расход

воздуха в единицу времени зависит от положения дроссельной заслонки, а также от числа оборотов двигателя. Если двигатель работает с определенным расходом воздуха при экономичной регулировке карбюратора и затем он ускоряется при полностью открытой дроссельной заслонке, то коэффициент K_C должен автоматически возрасти, чтобы работа двигателя продолжалась в соответствии с верхней кривой на рис. 52 и чтобы далее поддерживалось почти постоянное значение состава смеси до достижения максимальной мощности. Для мягкой работы двигателя при холостом ходе специальное устройство должно обеспечивать получение достаточно богатой смеси (см. предыдущий абзац) и, как следствие, крутую кривую зависимости коэффициента K_C на рис. 52 в области очень малых расходов воздуха.

Так как частота всплеск при минимальных числах оборотов холостого хода мала, любая неравномерность в работе двигателя будет проявляться внешне в виде повышенных вибраций двигателя из-за появления низкочастотных импульсов, находящихся в резонансе с подвеской двигателя (абзац 154). Следовательно, действительно мягкая работа двигателя на холостом ходу может рассматриваться как самое лучшее свидетельство хорошей конструкции двигателя и системы карбюрации.

187. Для двигателей гоночных автомобилей иногда применялись специальные топливные смеси с целью подавления детонации и сведения к минимуму температуры на впуске. Вследствие увеличенной по сравнению с углеводородами теплоты испарения температура на впуске при использовании этих смесей может поддерживаться низкой, поэтому улучшается наполнение двигателя и понижаются температуры горения. Спирты, особенно метиловый (метанол), очень эффективны в рассматриваемом отношении. Теплота испарения метанола почти в 4 раза выше, чем у бензина, и при теоретическом составе смеси падение температуры за счет испарения топлива в 7 раз больше, чем в случае бензо-воздушной смеси.

Вследствие испарения внутри цилиндра тепло отбирается от стенок, и нагрузка на систему охлаждения заметно снижается. Радиатор может быть поэтому меньше, и следовательно, он оказывает меньшее сопротивление охлаждающему воздуху, что обеспечивает некоторую

экономии мощности. Переобогащенная смесь делает внутреннее охлаждение еще более эффективным и, кроме того, происходит увеличение числа молекул продуктов сгорания с соответствующим снижением температур, упомянутое уже в абзацах 145 и 182. Практика применения богатых топливных смесей приводит к перерасходу топлива. Следует иметь также в виду, что эксплуатация двигателя в условиях гоночных заездов, когда такая практика допустима, не дает каких-либо сведений о предельной способности двигателей выдерживать термическую нагрузку. По этим причинам в последние годы во всех наиболее важных гонках было сделано обязательным использование обычного, хотя и весьма высокооктанового бензина, а не специальных топливных смесей. Более того, обычно ограничивают также допустимый расход бензина, чтобы сделать обязательным применение «горячих» смесей, т. е. смесей, обеспечивающих высокие температуры.

НАРУШЕНИЯ НОРМАЛЬНОГО ГОРЕНИЯ

188. Конструктор должен обеспечить развитие горения в течение разумного интервала времени. Из предыдущего известно, что в результате слишком слабой турбулентности, чрезмерно бедных смесей или больших потерь в стенке горение может происходить в течение слишком длительного периода времени. Первым результатом такого медленного горения является уменьшение мощности и экономичности. В последней стадии процесса имеется опасность зажигания все еще горячей массой заряда следующей порции заряда (обратная вспышка в карбюратор), так как в случае смещения тепловыделения на такт расширения температура отработавших газов увеличивается по сравнению с нормальными условиями горения. Помимо более высокой температуры при этом важно, что газы все еще горят и поэтому содержат радикалы и, следовательно, более способны вызвать поджигание, чем «неактивные» отработавшие газы.

189. В случае медленного горения на стенках всегда будут образовываться такие промежуточные продукты сгорания, как кислоты и альдегиды, причем последние

могут вызвать лаковые отложения вследствие полимеризации. На рис. 53 проиллюстрирован эффект низкой температуры охлаждающей воды, а именно, показаны лаковые отложения на поршне. При этом также может быть обнаружен увеличенный износ поршневых колец и цилиндров.

190. Во избежание таких условий работы двигателя должны быстро прогреваться. Однако неправильно понимать это таким образом, что они должны нагружаться сразу после пуска, так как хотя в этом случае двигатель прогреется быстрее, но ему может быть нанесен еще больший ущерб, т. е. износ в стадии прогрева увеличится. В то же время любой конструктивный фактор, способствующий сокращению периода прогрева двигателя, будет полезным. Наилучшие условия для трогания с места при холодном двигателе следующие: пуск (при обогащенной смеси), работа двигателя при повышенных числах оборотов холостого хода (что достигается большей частью автоматически), затем медленное трогание с места на умеренных числах оборотов, после чего через 2—3 мин может быть установлена обычная рейсовая скорость. В случае очень холодной погоды требуется больший период разогрева после пуска двигателя.

191. Нарушения горения (нежелательное опережение или ускорение процесса горения) могут привести к серьезным поломкам деталей двигателя и к ограничению предельно достижимой мощности. К ним относятся:

- 1) несвоевременное воспламенение (преждевременное воспламенение, последующее воспламенение);
- 2) детонация.

192. Несвоевременное воспламенение связано с калильным зажиганием, которое может происходить либо

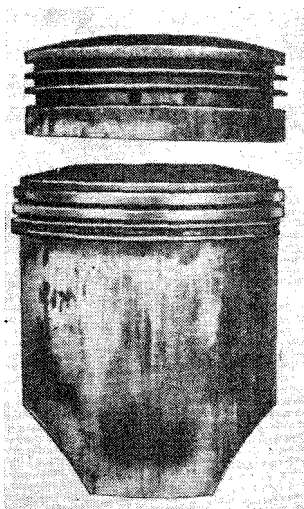


Рис. 53. Отложения на поршне, появляющиеся вследствие низкой температуры охлаждающей воды

до, либо после момента проскакивания искры (абзац 94). Оно возникает от очень горячих элементов поверхностей, окружающих пространство цилиндра двигателя. Это могут быть отложения нагара, неплотные и в связи с этим перегретые выпускные клапаны или дефектные прокладки головки блока, части которых выступают в камеру сгорания. В современных правильно обслуживаемых двигателях нарушения этого типа происходят чаще всего при очень высокой мощности в результате перегрева свечей

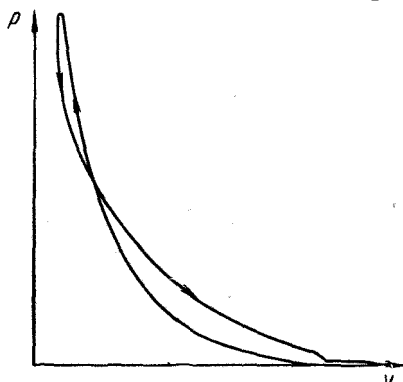


Рис. 54. Диаграмма давление — объем цикла с преждевременным воспламенением

зажигания. Свеча зажигания имеет центральный электрод, изолированный электрически, а значит и термически, являющийся элементом, который всегда дольше всего подвергается воздействию высоких температур горения. В дополнение к этому, как уже известно (абзац 51), температура газов, воспламененных вначале, самая высокая. Поэтому не является исключительным случаем, когда авиационный двигатель на испытательном стенде при работе на высокой мощности после выключения зажигания несколько снижает число оборотов и продолжает работать.

Этот пример показывает, что в двигателе, работающем на высокой скорости, заряд едва не воспламеняется от центральной части свечи. Иногда можно наблюдать, что после выключения зажигания вообще не обнаруживается каких-либо изменений в работе двигателя. Это бывает в тех случаях, когда калильное зажигание возникает как раз во-время, для того чтобы получалась нормальная индикаторная диаграмма. При дальнейшем увеличении термической нагрузки калильное зажигание начнется до проскакивания искры (преждевременное воспламенение), и работа двигателя станет неустойчивой, так как из-за раннего момента зажигания, сопровождающегося повышением температуры газов, воспламененных первыми (вследствие того, что они начинают гореть существенно

раньше, до в. м. т.), температура источника зажигания увеличится, что вызовет еще более раннее воспламенение.

193. В одноцилиндровом опытном двигателе мощностью и, следовательно, число оборотов при преждевременном воспламенении уменьшатся так, что сохранится баланс между производимой и затраченной работами. При этом диаграмма давлений будет иметь вид, как показано на рис. 54, с чрезмерно высоким давлением сгорания. Если двигатель многоцилиндровый и то же явление происходит в одном из его цилиндров, то может произойти авария из-за перегрева поршня. Уплотнение, обеспечиваемое поршневыми кольцами, особенно в зоне стыка их концов, оказывается весьма слабой защитой. На поршнях, которые разрушаются таким путем, обнаруживается начальное оплавление у стыка верхнего поршневого кольца, вскоре переходящее в полное оплавление поршня в этом месте, после чего может произойти взрыв масла в картере (рис. 55)¹.

Преждевременное воспламенение в одном из цилиндров многоцилиндрового двигателя проявляется внешне в виде очень сильной вибрации из-за несвоевременного повышения давления, что вызывает появление пика отрицательного момента (абзац 154). Если при этом термическая нагрузка в двигателе меньше допустимой и поршень еще не поврежден, то воспламенение может стать настолько ранним, что воспламенится поступающий свежий заряд и произойдет обратная вспышка в карбюратор. В свое время наблюдались частные случаи подобного нарушения

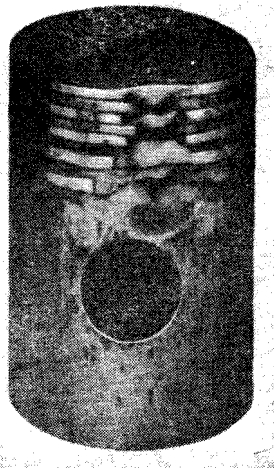


Рис. 55. Повреждение поршня вследствие резко выраженного преждевременного воспламенения

¹ Хотя на фотографии показан поршень одноцилиндрового двигателя, а именно двигателя CFR, это не находится в противоречии с высказанным, так как этот двигатель оборудован в качестве тормоза синхронным электрогенератором, и его число оборотов сохраняется неизменным при падении мощности.

сгорания при использовании свечей зажигания с фарфоровыми изоляторами, так как отрывающиеся от хрупкого изолятора частицы острой формы легко прогревались до высокой температуры. Это привело к использованию в качестве изоляционного материала прессованной слюды. Позднее нашли применение керамические изоляторы на алюминиевой основе, имеющие лучшую теплопроводность и прочность, вследствие чего они вытеснили изоляторы из прессованной слюды.

194. Свечи зажигания изготавливаются с различными тепловыми характеристиками для того, чтобы сделать

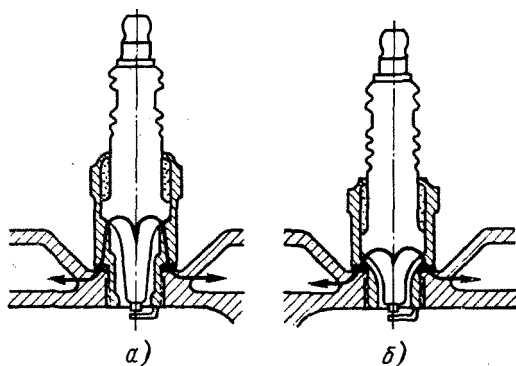


Рис. 56. Свечи:

a — горячая с длинным путем теплоотвода; *б* — холодная с коротким путем теплоотвода

возможным компромисс между описанным явлением и замасливанием свечи зажигания. Вообще, естественным является стремление создать наиболее эффективную изоляцию центрального электрода за счет увеличения, насколько возможно, пути утечки заряда (рис. 56, а). Это, однако, приводит к наличию внутри свечи большего объема газа и к большому повышению температуры изолятора. При увеличении термической нагрузки двигателя пропорционально уменьшается опасность появления на свече масляных отложений вследствие осаждения на изоляторе паров смазочного масла, а опасность несвоевременного воспламенения возрастает, поэтому длина свободной части изолятора (рис. 56, б) должна быть меньшей.

195. Кроме конструкции самой свечи, подбор оптимальных условий работы свечи зажигания на двигателе возможен при соответствующих условиях внешнего охлаждения свечи. В двигателе, часто работающем на малых нагрузках, свечи зажигания устанавливались так, чтобы в ме-

талле вокруг свечи имело место аккумуляирование тепла и этот участок вокруг свечи зажигания оставался горячим даже при низкой нагрузке. В современных автомобильных двигателях, однако, становится все более ясной необходимость обеспечивать наилучшие условия работы свечи зажигания только за счет конструкции ее изолятора, и принимаются меры для возможно лучшего охлаждения участка, окружающего свечу (см. рис. 56, б). Весьма низкий расход масла в современных двигателях облегчил проблему подбора свечи. В случае двигателей с высокой мощностью свеча должна особенно интенсивно охлаждаться снаружи. Так как такие двигатели обычно имеют алюминиевые головки, то легче организовать интенсивное охлаждение свечи.

196. Свеча зажигания с тепловой характеристикой, близкой к пределу, при котором возникает калильное зажигание, в действительности не влияет на процесс горения, так как воспламенение в любом случае возникает в месте ее расположения. Несвоевременное воспламенение, возникшее в других местах перед фронтом пламени, может вызвать ускорение горения в целом вследствие возникновения нескольких фронтов пламени. Вообще это явление последующего воспламенения; однако может случиться, что местный источник воспламенения не стабилен в термическом отношении, и тогда даже такой вид самопроизвольного воспламенения может перейти в преждевременное. Последующее воспламенение очень часто возникает у локально горячих частей камеры сгорания (хотя еще и не раскаленных), которые повышают температуру сжатия близлежащей смеси.

ДЕТОНАЦИЯ

197. Детонация является в той или иной мере одновременным взрывом последней части заряда, вызванным ее самовоспламенением (абзац 18). Она возникает тогда, когда полное давление сжатия этой части заряда (совпадающее с максимальным давлением нормального сгорания) и ее температура становятся слишком высокими с точки зрения минимально допустимого периода индукции воспламенения топливо-воздушной смеси. Рикардо первым понял, что именно это явление контролирует и ограничивает развитие бензинового двигателя. При детонации

ухудшается экономичность, поэтому, например, при повышении степени сжатия ожидаемое улучшение экономичности будет меньше, чем при бездетонационном сгорании. С увеличением интенсивности детонации улучшение экономичности из-за роста ε уменьшается до нуля и даже становится отрицательным. На рис. 57 показана зависимость среднего индикаторного давления от степени сжатия при детонации и без детонации. С помощью таких графиков Рикардо ввел понятие «максимальная полезная степень сжа-

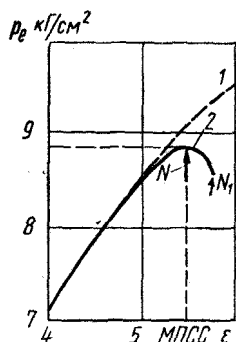


Рис. 57. Пояснение понятия максимальной полезной степени сжатия, введенного Рикардо:

1 — зависимость $P_e(\varepsilon)$ при отсутствии детонации; 2 — зависимость $P_e(\varepsilon)$ для испытываемого топлива. Стрелками показано: N — умеренная детонация; N_1 — сильная детонация

тия» (МПСС), которая является характеристикой топлива в определенном двигателе при определенных условиях. 198. Вначале при появлении слабой детонации можно теоретически ожидать некоторого улучшения экономичности вследствие менее продолжительного горения. Иногда это в действительности обнаруживается; вскоре, однако, потери становятся преобладающими. Эти потери вызываются быстрым сгоранием части заряда, приводящим к тому, что давление в объеме камеры сгорания не успевает выравниваться, как это имеет место при постепенном взрыве. При бесконечно быстром местном взрыве конечное давление в том месте, где находилась последняя часть заряда, может быть подсчитано по начальным давлению и температуре этой части заряда. В зависимости от принимаемого допущения относительно процентного количества смеси в конечной части заряда, взрывающейся таким образом, действительное локальное давление в газе может превышать в два и даже в три раза давление при обычном сгорании. Регистрация таких местных скачков давления весьма затруднительна, причем можно получить ложные показания из-за наличия газового кармана около датчика

давления. Только в одном случае автор наблюдал нечто похожее на такой пик давления (рис. 58). Часто вследствие имеющихся неоднородностей конечная часть заряда

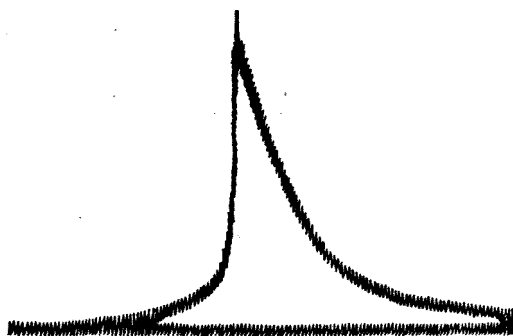


Рис 58. Индикаторная диаграмма с местным скачком давления

воспламеняется не одновременно (абзац 82), и иногда наблюдается явление, напоминающее постепенный взрыв. Для такого протекания процесса является достаточной уже небольшая степень неравномерности распределения температур.

На специальном двигателе с кварцевыми окнами, созданном в б. Дельфтской лаборатории испытания двигателей фирмы Шелл (рис. 59), были получены фотографии сгорания при различной интенсивности детонации. На рис. 60, а, б показаны фоторегистрации распространения пламени при взрыве конечной части заряда при различной степени его неомогенности. В случаях явной неоднородности заряда Серрюис [19], который очень много экспериментировал в этой области, говорит о псевдодетонации, когда нарушения равномерного распределения давления по объему камеры сгорания намного меньше. Обычно в любом двигателе наблюдается значительный разброс интенсивности детонации в последовательных

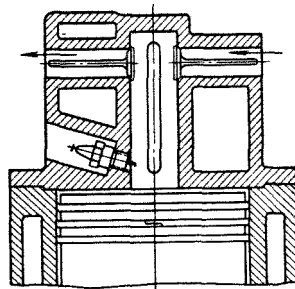


Рис. 59. Двигатель с кварцевыми окнами, предназначенный для исследования сгорания

циклах. Это можно приписать как факторам, вызывающим общую нестабильность горения (абзацы 153, 158), так и влиянию разброса в составе смеси.

199. Однако во многих случаях детонация сопровождается значительным нарушением равномерности распре-

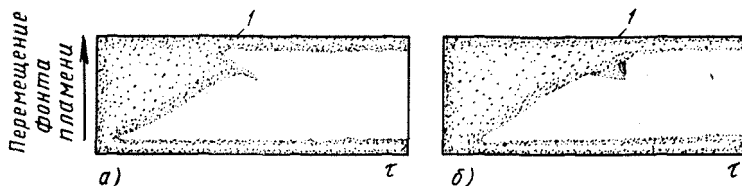


Рис. 60. Схема детонации в тихоходном двигателе со слабой турбулизацией при различной степени гомогенности заряда:

a — псевдодетонация, начинающаяся в какой-либо точке объема; *b* — одновременная детонация; 1 — начало детонации

деления давления в камере сгорания, вследствие чего возникает очень быстрое движение массы газа. Из-за упругости газа это движение вызывает колебания, которые могут продолжаться в течение какого-то периода

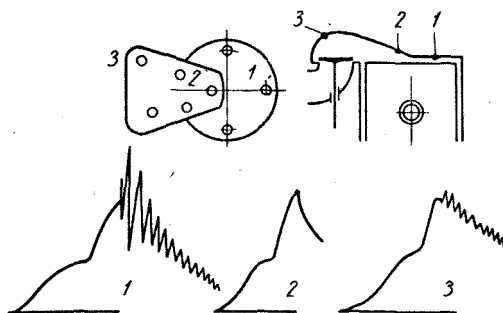


Рис. 61. Индикаторные диаграммы, определенные в трех точках камеры сгорания двигателя с нижним расположением клапанов:

Λ 2, 3 — точки установки датчиков

времени. Эти колебания имеют характер стоячих волн, что было доказано при проведении опытов в двигателе с боковыми клапанами (рис. 61, а также рис. 44). В точке 1 амплитуда колебания давления максимальна в связи с узким поперечным сечением камеры в этом месте.

Согласно опытам, проведенным также в б. Дельфтской лаборатории, характер таких колебаний, относительные амплитуды которых определяются формой камеры сгорания, оказался практически не зависимым от места расположения свечи зажигания (а значит, и конечной части заряда). Интенсивность движения заряда возрастает более или менее значительно из-за этих явлений, сопровождающих детонацию (рис. 62), и, как следствие, увеличиваются потери тепла в стенки. Поэтому наблюдается повышение температуры деталей, составляющих камеру

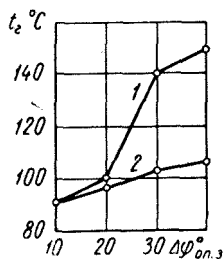


Рис. 62. Зависимость температуры головки цилиндра от угла опережения зажигания:

1 — при детонации; 2 — без детонации

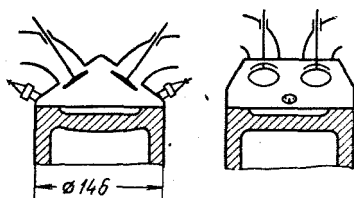


Рис. 63. Схема камеры сгорания авиационного двигателя с $\eta = 2000$ об/мин

сгорания, а увеличенные тепловые потери вызывают снижение мощности. Температура отработавших газов при детонации снижается из-за совместного влияния завершения сгорания у в. м. т. и повышенных потерь тепла в ходе расширения.

200. Степень проявления отмеченных последствий детонации может сильно варьироваться. В общем случае возможность колебания заряда возрастает пропорционально размеру камеры сгорания, так как при этом растет масса газа, а собственная частота его колебаний падает. Автор нашел, что на авиационном двигателе «Бристоль», имевшем камеру сгорания, показанную схематически на рис. 63, взрыв примерно 10% заряда (а следовательно, 10%-ная детонация) вызывает значительные колебания давления, а при взрыве от 15 до 20% уже невозможно было работать. Однако в двигателе CFR (рис. 64, а), широко используемом для определения антидетонационной стойкости топлив, не наблюдалось заметных колебаний

давления в объеме газа даже при детонации от 40 до 50% заряда (рис. 64, б) и, кроме того, имела место только небольшая потеря мощности, поэтому несмотря на возможность изменения степени сжатия этого двигателя, практически не удавалось определить МПСС топлива. Эти различия частично объясняются разницей в диаметрах цилиндра. Различие в числах оборотов также

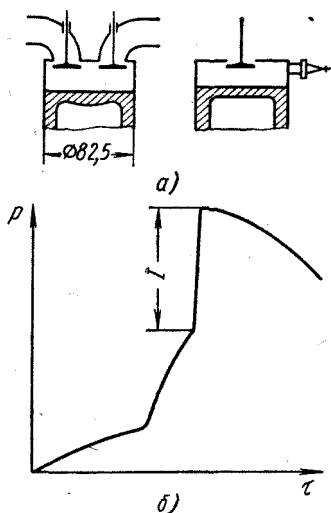


Рис. 64. Двигатель CFR
с я = 900 об/мин:

а — схема камеры сгорания;
б — индикаторная диаграмма,
снятая при определении октановых чисел

важно; на высоких числах оборотов турбулизация становится более интенсивной, и хотя это не может оказать влияния на скорость реакций самопроизвольного воспламенения (абзац 42), увеличение турбулизации улучшает равномерность распределения температур, вследствие чего более точно воспроизводятся условия одновременного взрыва, и детонация становится более интенсивной. 201. Колебания газа в двигателе обнаруживаются на слух из-за того, что изнутри стенки подвергаются воздействию значительных усилий. Вследствие высокой частоты [от 3000 до 6000 гц или примерно 450/D (D — в м)] этот звук привел к появлению термина «звон» (в Америке — «свист»). Еще в 1934 г. Боерледж [3] указал на то, что в двигателе CFR слышен не звенящий звук, а скорее стучащий. Это нужно отнести за счет вибрации подвижных частей под влиянием значительного и внезапного общего повышения давления, что вызывает звук значительно более низкой частоты, чем частота колебаний газа в цилиндре. Когда коленчатый вал начинает вибрировать в результате быстрого повышения нагрузки (см. индикаторную диаграмму с 40%-ной детонацией на рис. 64, б), то поршень может стать источником сильного стука. Однако даже при этом звук от колебаний газа все еще не прослушивается. Хотя в связи с этим и возникло сомнение в том, что в таком двигателе, как двигатель CFR,

имеет место и регистрируется то же самое явление, что и, например, в двигателе Е 35 большей размерности (который производил четкий звенящий шум) или во многих других двигателях, применяемых на практике, сейчас установлено, что во всех этих случаях имеет место только различное проявление того же самого взрыва конечной части заряда, причем различия определяются конструкцией двигателя и условиями эксплуатации.

202. Уместно отметить, что сравнительное измерение интенсивности детонации (так называемая оценка детонации) в двигателе CFR, для чего последний и был специально создан, всегда осуществляется с помощью специальной аппаратуры (например, так называемого подпрыгивающего стержня Миджлея), в то время как в случае авиационных двигателей, обладающих намного большей тенденцией к возникновению колебания газа, надежные сравнительные измерения могут быть сделаны просто на слух,

203. Внезапное повышение давления и колебания последнего приводят к увеличению опасности механических повреждений поршней, имеющих высокую температуру.

Процесс характеризуется слишком высокой частотой для возможности повреждения других деталей, если только, конечно, не имеет место очень сильная детонация. Возникают и другие трудности, в частности, в связи с прочностью поршневых колец. Внезапное нарушение равновесного распределения давления может вызвать прогиб верхнего поршневого кольца, в результате чего второе кольцо также, как правило, выходит из строя, причем любое из этих колец или же нижнее механически достаточно слабое масляное кольцо могут разломаться на части. Нарушение контакта между кольцами и стенкой цилиндра, в свою очередь, оказывает неблагоприятное воздействие на отвод тепла.



Рис. 65. Поломка поршня в результате интенсивной детонации

204. В случае очень интенсивной детонации, имеющей, например, место в авиационных двигателях, может наблюдаться типичный питтинг, который, вероятно, следует отнести за счет явления коррозии, возникающей из-за наличия радикалов в зоне последней части заряда. На рис. 65 показан пример таких повреждений, причем характер их здесь заметно отличается от характера повреждений, вызванных преждевременным воспламенением. Следует иметь в виду, однако, что при достаточно высокой термической нагрузке детонация может вызвать

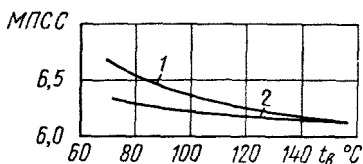


Рис. 66. Чувствительность различных углеводородных групп к температуре на впуске:

1 — ароматическое топливо; 2 — алифатическое топливо

преждевременное воспламенение.

205. Хотя детальное рассмотрение различных факторов, вызывающих появление детонации, не входит в задачу автора и, несмотря на то, что по этому вопросу уже опубликована обширная литература, некоторые моменты будут тем не менее здесь кратко рассмотрены.

Как отмечалось в абзаце 197, возникновение детонации определяется температурой и давлением конечной части заряда, но не все углеводороды одинаково чувствительны к этим двум факторам. При увеличении температуры на впуске в двигатель уменьшается степень сжатия ϵ , при которой наблюдается определенная интенсивность детонации (например, МПСС, а также ϵ для «зарождающегося» стука, что отвечает самому началу детонации, которая только начинает прослушиваться опытным экспериментатором или может быть зарегистрирована соответствующим прибором). На рис. 66 видно, что в случае топлива с высоким содержанием ароматических компонентов МПСС уменьшается на большую величину при увеличении температуры на впуске, чем в случае топлива с преобладающим содержанием парафиновых углеводородов. Представляется поэтому ясным, что такие характеристики топлив, как, например, октановые числа, полученные сравнением степени детонации при работе на данном топливе с детонацией, которая имеет место при стандартном топливе, не являются универсальными; они в достаточной мере

условны и зависят от особенностей опытного двигателя и метода испытания. На основе широких статистических экспериментальных данных периодически определяется в среднем наиболее надежный метод испытания. Это делалось более или менее регулярно для автомобильных двигателей (особенно начиная с 1932 г.). В случае авиационных двигателей так называемые корреляционные опыты также проводились, хотя и в значительно более умеренных масштабах. Но так как в этом случае эксплуатируется относительно небольшое число типов двигателей и условия эксплуатации ограничены более узким пределами, то подходящий метод испытания легко может быть подобран в каждом отдельном случае.

206. Хотя, как следует из сказанного, для каждого топлива имеется определенная связь между допустимой температурой и допустимым давлением конечной части заряда, невозможно установить такую связь вполне точно, так как подсчитать можно только среднюю температуру заряда. Но при этом имеется неопределенность в отношении ее локальных различий.

207. При увеличении числа оборотов детонация обычно ослабевает вследствие уменьшения длительности периода нормального распространения пламени до наиболее удаленных зон камеры сгорания, выравнивания температур в заряде (в случае, если детонация все же имеет место, выравнивание температур делает ее более интенсивной) и уменьшения плотности заряда (за исключением двигателей, снабженных центробежными нагнетателями). В случае увеличения числа оборотов автомобильного двигателя наблюдаемая интенсивность детонации обычно изменяется примерно так, как показано на рис. 67, а. Иногда, однако, зависимость между интенсивностью детонации и числом оборотов, бывает такой, как показано на рис. 67, б, когда с увеличением числа оборотов детонация вновь появляется или вообще наблюдается только при высоких числах оборотов. Связано это с двумя причинами. Первой

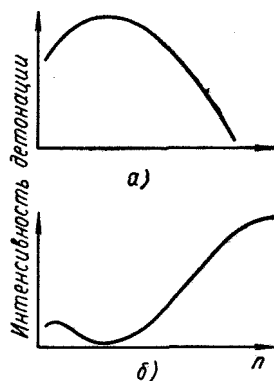


Рис. 67. Зависимость интенсивности детонации от числа оборотов двигателя

является автоматическая регулировка момента зажигания при растущих числах оборотов, как показано кривой на рис. 42. Такая зависимость обеспечивает моменты зажигания, приблизительно оптимальные с точки зрения наилучшей экономичности, но могущие, однако, существенно отличаться от значений, при которых достигается отсутствие детонации. Второй причиной является так называемая температурная чувствительность топлива. Если топливо с ростом температуры обнаруживает значительное увеличение склонности к детонации, то оно будет детонировать интенсивнее в более горячем быстроходном двигателе. Наиболее подвержены этому явлению топлива, полученные путем глубокого крекинга, содержащие высокий процент ароматических соединений, в то время как другие топлива, в основном состоящие из продуктов прямой гонки с добавкой или без добавки ТЭС, детонируют легче при низких числах оборотов.

208. Важное значение имеет поведение топлива при различном составе смеси, которое связано с температурной чувствительностью. Выше при рассмотрении детонации имела в виду смесь с наивысшей склонностью к детонации. Этот состав обычно совпадает с тем составом, при котором температура сгорания максимальна, а поэтому достигается и максимальное среднее индикаторное давление (в пределах значений $KC = 1,0 \div 1,1$ с небольшими изменениями). Как уже указывалось (абзац 182), с обогащением смеси температура может быть значительно снижена при относительно небольшом снижении среднего давления, если давление на впуске неизменно. При этом склонность к детонации уменьшается, поэтому представляется возможным увеличить давление на впуске. Эта возможность в значительной мере используется в авиационных двигателях для получения высокой мощности при взлете и наборе высоты.

209. На рис. 68 показаны различные зависимости достижимого при «зарождающемся» стуке среднего индикаторного давления от состава смеси. Видно, что в случае примерно одинаковых минимальных значений среднего индикаторного давления использование бензина, содержащего ароматические соединения, обеспечивает значительные преимущества в отношении повышения среднего индикаторного давления при обогащении смеси. Это вызвало широкое производство таких синтетических ароматиче-

ских соединений, как кумол (изопропилбензол). Выявилась также необходимость использовать для авиационного бензина два оценочных октановых числа: первое, характеризующее относительное положение минимальной точки, и второе — максимальной точки¹. Для определения этих двух точек применяются различные методы измерения и даже различные двигатели. Топливо может быть охарактеризовано, например, как имеющее октановое число 100—130.

210. Вместо значительного обогащения смеси можно впрыскивать воду, также обеспечивающую охлаждающий эффект вследствие испарения и диссоциации. Это имеет особое преимущество при работе на топливах, содержащих мало ароматических соединений, когда слишком большое обогащение ведет к тому, что вновь повышается тенденция к детонации. Вследствие опасности замерзания вода может быть заменена смесью воды с метанолом, к которой в случае надобности может быть добавлен ТЭС. Эта смесь применялась во всех мощных авиационных двигателях последнего периода (так называемый «мокрый» старт).

211. На крейсерских режимах, когда основным критерием является расход топлива, следует применять смесь, у которой значение коэффициента $KC < 1$. При этих значениях KC тенденция к детонации вновь понижается (рис. 69, см. абзац 184). Однако использовать эту рекомендацию на практике намного труднее, чем применять обогащение на полной мощности. При обеднении и соответствующем повышении давления на впуске (наддув) требуется использование точных приборов для

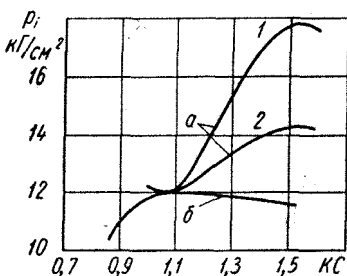


Рис. 68. Зависимость среднего индикаторного давления от коэффициента KC , иллюстрирующая различие антидетонационных характеристик топлив при обогащенных смесях:

a — по пределу детонации; b — при постоянной плотности на впуске; 1 — ароматическое топливо; 2 — алифатическое топливо

¹ Допустимых значений p_i при работе на обедненных и на обогащенных смесях. *Прим. ред.*

контроля состава смеси, в противном случае может иметь место резкая детонация.

212. Детонация и преждевременное воспламенение — близкие явления, так как они представляют собой процессы самопроизвольного воспламенения. Однако в случае дето-

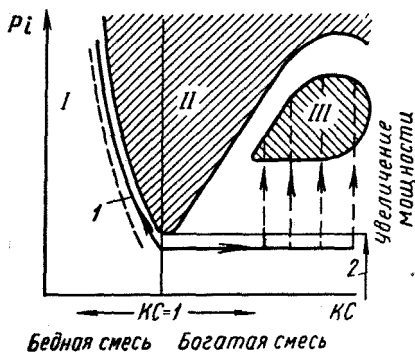


Рис. 69. Характерные области режимов работы двигателя:

I — зона пропусков; II — зона детонации; III — безопасная зона для взлета и набора высоты; 1 — кривая регулировки для экономичной работы на крейсерском режиме; 2 — предел среднего индикаторного давления, при котором двигатель работает без детонации на всех составах смеси

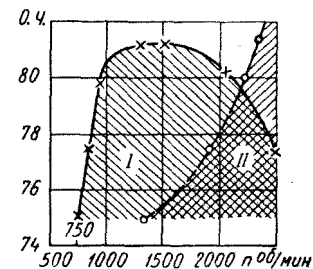


Рис. 70. Области режимов работы двигателя:

I — с детонацией; II — с преждевременным воспламенением

нации самопроизвольное воспламенение в основном определяется температурой и давлением смеси и может поэтому возникать также в холодном двигателе, в то время как для преждевременного воспламенения существенной является термическая нагрузка. Зависимость этих двух процессов от октанового числа топлива и числа оборотов приведена на рис. 70.

МНОГОЦИЛИНДРОВЫЙ ДВИГАТЕЛЬ. ПРОБЛЕМЫ КАРБЮРАЦИИ

213. Огромное число двигателей с искровым зажиганием является многоцилиндровыми и питается смесью либо от одного карбюратора на все цилиндры, либо от одного карбюратора или одной независимо действующей половины карбюратора на группу цилиндров. Это простое конструктивное решение является причиной многих недостатков, в первую очередь вредно отражающихся на

таких показателях двигателя, как среднее эффективное давление, максимальная мощность и расход топлива. Даже если карбюратор, имеющий правильную характеристику, сконструирован удачно (см. абзац 186), все же будет происходить отделение более или менее грубо распыленного топлива от остальной его части. Это происходит вследствие осаждения топлива на находящихся поблизости дроссельной заслонке и стенках впускного канала и отклонения потока топлива (в виде капель и пара) от течения воздуха. Для максимальной компактности требуется, чтобы в многоцилиндровом двигателе впускная труба разветвлялась сразу же за карбюратором в патрубки, ведущие к отдельным цилиндрам или группам цилиндров.

214. Отделение топлива ведет к количественно неравномерному его распределению, в результате которого одни цилиндры получают более богатую смесь, чем другие. Возможно также, что имеет место качественно неравномерное распределение топлива в том смысле, что цилиндры не получают топлива одинакового состава — из-за неполного селективного его испарения, за которым следует отделение пара от жидкости. Вследствие резкого ухудшения качества горения при обеднении смеси любой недостаток в подаче топлива к отдельным цилиндрам должен всегда компенсироваться общим обогащением смеси. Учитывая, что даже при хорошем распределении смеси двигатель может работать при коэффициенте KC , лишь немного меньшем единицы, в двигателе с плохим распределением смеси оказывается необходимым обогащать смесь до $KC > 1$ во всем диапазоне рабочих режимов. Вследствие этого он будет не экономичным. Различие в качестве топлива, поступающего в отдельные цилиндры, чрезвычайно важно вследствие того, что обычно применяемым антидетонатором является ТЭС, который значительно менее летуч, чем авиационный бензин, и даже в случае значительно менее легко испаряемого автомобильного бензина ТЭС обнаруживается только в концевой фракции¹. Этилен-дибромид — вещество, которое

¹ Неоднократно отмечалась желательность замены тетраэтилсвинца значительно более летучим тетраметилсвинцом, но эта замена задерживалась в течение долгого времени из-за боязни значительно большей токсичности последнего. Лишь недавно эти опасения были опровергнуты.

должно препятствовать отложению свинца, напротив, более летуч. Нарушение качественного распределения топлива поэтому вызовет не только разницу в детонационной стойкости, но также увеличенную тенденцию к образованию свинцовых отложений в отдельных цилиндрах.

215. Решением этих проблем, хотя и не свободным от недостатков, является применение индивидуального карбюратора для каждого цилиндра, как это делается на гоночных и спортивных автомобилях, или использование индивидуального впрыска либо непосредственно в каждый из цилиндров, либо в его патрубков. Впрыск бензина в цилиндры широко используется в авиационных двигателях, но применительно к автомобильным двигателям он чрезмерно дорог. В качестве паллиатива в автомобильных двигателях прибегают к предварительному нагреву смеси или стенок впускного канала, на которых происходит осаждение топлива. Это связано, конечно, с потерей в наполнении, особенно в случае бедных смесей (рис. 71), так как богатая смесь отнимает больше тепла от более горячего воздуха. Еще одно неблагоприятное влияние на наполнение вызывается использованием в карбюраторе диффузора, обеспечивающего относительно большое разрежение для улучшения точности дозирования и качества распыла, что приводит к потере среднего давления и максимально достижимой мощности. Предварительный подогрев смеси повышает склонность ее к детонации, что должно быть скомпенсировано применением более низкой степени сжатия (а значит, имеет место дополнительная потеря среднего давления, мощности и экономичности). Вторичным результатом является увеличение температуры отработавших газов и выпускных клапанов при подогреве смеси.

216. Цель предварительного подогрева смеси, а именно получение гомогенной смеси, более или менее достигается при сочетании подогрева с тщательно, на основе опыта, сконструированными впускными трубопроводами, но предварительный подогрев сам по себе увеличивает возможность самовоспламенения бедной смеси. Если бы только был возможен быстрый переход с частичной нагрузки на полную без задержки на установление нового равновесного состояния, связанной с тепловой инерцией горячих деталей, то переменный предварительный подогрев мог бы очень способствовать выполнению предъявляемых требо-

ваний. На практике преследуется достижение этой цели, но, естественно, достигается она только приблизительно.

При использовании топлива с одинаковым октановым числом по изложенным выше причинам

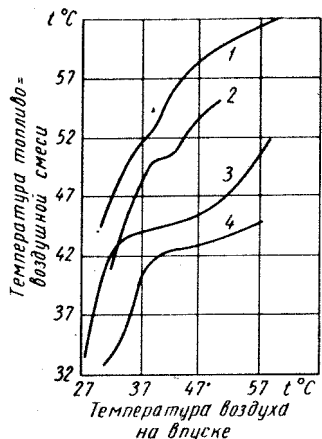


Рис. 71. Влияние температуры воздуха на впуске на температуру смеси при различном составе смеси:

1 — обедненная; 2 — бедная;
3 — богатая; 4 — обогащенная

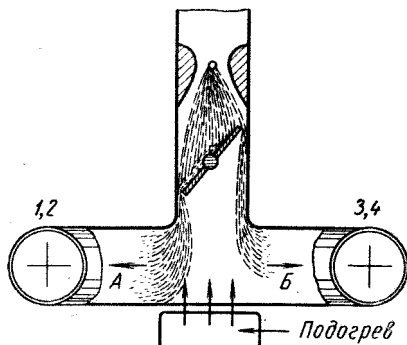


Рис. 72. Распределение топлива в смеси в зависимости от положения дроссельной заслонки:

A — богатая смесь; Б — бедная смесь;
1, 2, 3, 4 — номера цилиндров

показатели наиболее совершенных многоцилиндровых карбюраторных двигателей на 10—20% ниже, чем одноцилиндровых двигателей или двигателей с впрыском топлива.

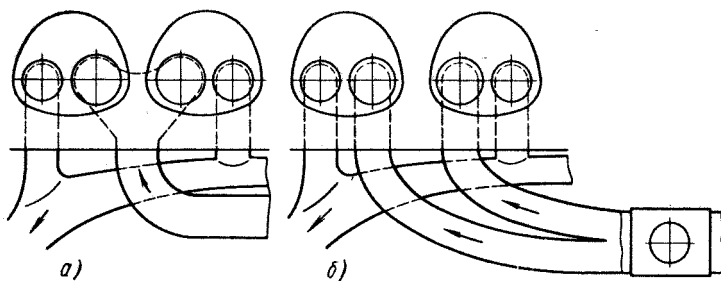


Рис. 73. Впускные каналы: а — неудачная конструкция; б — улучшенная конструкция

217. Проблема карбюрации и конструирования трубопроводов здесь не рассматривается; будут изложены лишь несколько примеров. Положение дроссельной заслонки

может вызвать неправильное распределение смеси, как это проиллюстрировано на рис. 72. Объединенный впускной канал, предназначенный для подачи смеси в два соседних цилиндра и часто применявшийся в ранних конструкциях, ведет к плохому распределению и к различию в наполнении, особенно в четырехцилиндровом двигателе, в котором процессы впуска двух смежных цилиндров несколько перекрываются (см. рис. 73, а). В настоящее время ответвления впускных трубопроводов к отдельным цилиндрам делаются обычно одинаковой длины (рис. 73, б).

**СГОРАНИЕ ГЕТЕРОГЕННОЙ
(РАССЛОЕННОЙ) СМЕСИ;
ВОСПЛАМЕНЕНИЕ ТОПЛИВНЫМ ФАКЕЛОМ
(впрыск вспомогательной поджигающей порции
топлива или двухтопливные двигатели)**

218. Неоднократно делались попытки создать двигатели, в которых заряд был бы негомогенным в момент воспламенения. В некоторых случаях это было результатом сознательного действия, т. е. таким способом хотели достичь определенной цели, в то время как в других случаях расслоение было вторичным, иногда даже нежелательным эффектом. Интересуясь расслоением заряда, следует вообще рассмотреть двигатели, в которых топливо впрыскивается внутрь цилиндров.

219. Если впрыск осуществляется прежде всего для избежания определенных недостатков системы карбюрации (предварительный подогрев и потеря давления во впускном трубопроводе, трудности дозировки, опасность обратных вспышек или даже пожара) и если твердо придерживаться использования в качестве топлива легкоиспаряемого бензина, то, как правило, применяется ранний впрыск (в такте впуска), и смесь успевает стать достаточно гомогенной к моменту воспламенения. При этом воспламенение не представляет особых проблем, и воздушный заряд может быть использован полностью. Экономическая регулировка возможна здесь, как и в обычных случаях; сами проблемы регулирования в данной книге не обсуждаются.

220. Можно попытаться задержать впрыск до момента, в какой-то мере следующего за окончанием такта впуска с целью:

- 1) улучшения воспламеняемости бедных смесей;
- 2) влияния на склонность к детонации, особенно при богатых смесях.

Кроме того, поздний момент впрыска делает возможным достаточно полную продувку камеры сгорания двигателя воздухом в случае наддува. Такие попытки были осуществлены в авиационных двигателях, в результате чего эти двигатели развивали высокие мощности при низких антидетонационных качествах имевшихся топлив. Эти двигатели имели плоские камеры сгорания с относительно слабой турбулизацией. Топливо впрыскивалось форсункой, расположенной между двумя свечами зажигания.

221. Примерно в 1930 г. шведский конструктор дизелей Гессельман [20, 21] создал двигатель с искровым зажиганием, работающий на легком дизельном топливе. Представляется очевидным, что при разработке этого двигателя он пытался путем выбора намного более низкой степени сжатия и давления сгорания избавиться от тех трудностей, с которыми сталкивались конструкторы первых быстроходных дизелей. Гессельман использовал вращающийся вихрь, полученный с помощью запатентованного им экранированного клапана, и защитил стенку цилиндра от осаждения на ней топлива при помощи высокого борта на поршне. Впрыск производился в конце такта сжатия, и для различных нагрузок он был отрегулирован так, что через небольшую выемку в борте поршня вершина струи всегда достигала свечи зажигания.

222. При этом оказалось невозможным работать на малых нагрузках без частичного дросселирования впускаемого воздуха, а также осуществлять пуск холодного двигателя без использования летучего вспомогательного топлива. В течение некоторого времени двигатель, разработанный Гессельманом, успешно применялся для работы при постоянном числе оборотов, но не для транспорта.

223. Вследствие диффузионного горения только часть подаваемого в этот двигатель воздуха может быть в принципе эффективно использована, так же как и в случае дизеля. Из-за низкой степени сжатия мощность и экономичность отставали от соответствующих значений у быстро

прогрессировавших дизелей. Эти последние не имели свечей зажигания, которые являлись очень чувствительным элементом в двигателях Гессельмана. После нескольких лет изготовления от подобных двигателей с искровым зажиганием практически отказались.

224. Примерно в 1950 г. Барбер [22], руководствовавшийся другими мотивами, опубликовал данные об аналогичном двигателе. Барберу удалось уменьшить склонность к детонации, применяя поздний впрыск, вследствие чего в двигателе не было конечной части заряда в общепринятом смысле этого понятия. Он столкнулся, однако, с теми же трудностями, что и Гессельман, а именно: с неэффективным использованием воздуха по сравнению с двигателем с гомогенным зарядом. При высокой степени сжатия в случае низкооктановых топлив имели место аномальные явления, связанные с самопроизвольным воспламенением. В целом двигатель этого типа также не представил особых преимуществ в сравнении с дизелями.

225. Другие попытки применения расслоения заряда были сделаны с целью использования чисто качественного регулирования (только изменением состава смеси), которое приводит к более экономичной работе на малых нагрузках.

Вследствие изменяющейся теплоемкости продуктов сгорания к. п. д. термодинамического цикла возрастает при уменьшении температур горения и, кроме того, одновременно исключаются потери за счет дросселирования, которые в виде затрат энергии на осуществление газообмена поглощают значительную часть индикаторной мощности бензинового двигателя на низкой нагрузке. Двухтактный двигатель в особенности требует такого способа регулирования, так как дросселирование подачи воздуха здесь приводит к особенно резкому увеличению количества остаточных газов. Из большого числа попыток применения расслоения смеси следует упомянуть две.

226. Двухтактный двигатель, сконструированный Рикардо и К^о [23], с полуразделенной камерой сгорания (рис. 74) предназначался для проведения первых экспериментов по созданию авиационного двигателя с высокой степенью наддува — Роллс Ройс Крэси.

Вследствие распространения в авиации газовых турбин этот двигатель достиг лишь стадии эксперименталь-

ного образца. Топливо впрыскивалось в верхнюю часть камеры, в которой осуществлялось зажигание. В этом случае преимущественно диффузионное горение не являлось серьезным недостатком, так как использование для наддува комбинации газовой турбины и воздушного компрессора требовало значительного избытка воздуха.

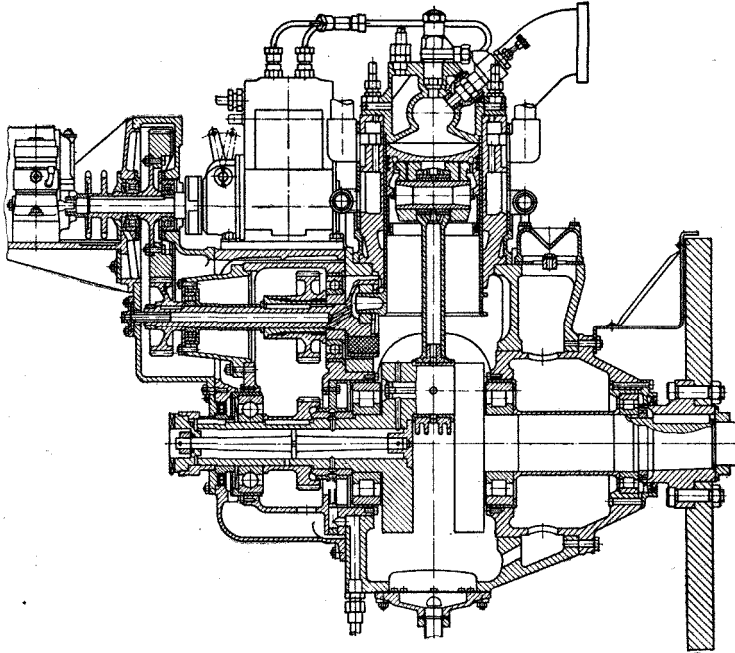


Рис. 74. Опытный двухтактный двигатель Рикардо с расслоением заряда

Однако вновь оказалось, что тот же результат мог быть получен путем конструирования двигателя как дизеля (Нэпир Номад), который также был создан, однако слишком поздно.

227. Двигатель с карбюрацией смеси и дополнительным впрыском, в котором карбюрация была правильно выбрана в качестве средства, позволяющего использовать весь воздух на полной нагрузке, был сконструирован Шламаном [24]. В форкамере (рис. 75) смесь обогащалась с помощью дополнительного впрыска для того, чтобы

обеспечить даже на низкой нагрузке воспламеняемость без дросселирования воздуха. Подобное регулирование было успешно осуществлено во многих конструкциях. Для этого, однако, пришлось преодолеть много трудностей. С одной стороны, иногда имело место очень медленное горение в определенном диапазоне нагрузок, когда смесь в основной камере оказывалась очень бедной, что не только вредно отражалось на расходе топлива, но также вызывало весьма нежелательное образование альдегидов. С другой стороны, горение оказывалось чрезмерно жестким на высоких нагрузках. Для преодоления этих двух не-

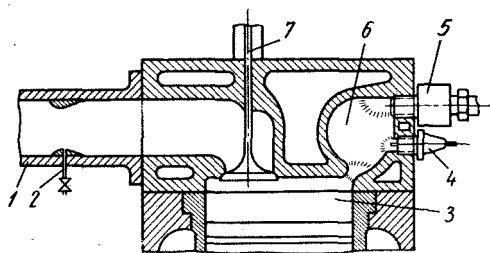


Рис. 75. Схема системы горения, предложенная Шламаном:

1—диффузор; 2—устройство для регулировки подачи топлива; 3—основная камера сгорания; 4—свеча зажигания; 5—форсунка; 6—фор-камера или камера для воспламенения смеси; 7—впускной клапан

достатков было выполнено много работ на экспериментальных стендах. Несмотря на эти основные и другие трудности, с которыми столкнулись, например, при обеспечении точной дозировки очень малой впрыскиваемой порции топлива (первоначально надеялись, что эта дозировка может быть постоянной при всех нагрузках), данный двигатель явился важным шагом вперед в отношении удельной мощности и расхода топлива при заданном низком октановом числе топлива (рис. 76).

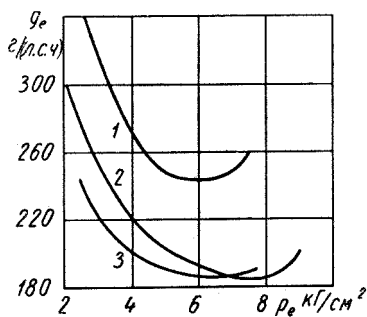
228. Очень интересный класс двигателей предназначен для использования попеременно дизельного топлива и газа (преимущественно природного, иногда канализационного, генераторного и др.). Такие двигатели, известные под названием двухтопливных, в действительности являются несколько модифицированными дизелями, в конструкции которых особое внимание уделено впрыску очень малых количеств топлива (5% на полной нагрузке и около 15% при работе без нагрузки). Это топливо, распределяемое обычно в виде ряда (от одной до пяти) струй, вполне нормально воспламеняется, пройдя стадию предпламен-

ных реакций. Остальная часть заряда — воздух с подмешанным к нему газом — воспламеняется от горящих струй в большом объеме.

229. При определенных условиях оказывается возможным качественное регулирование изменением количества газа при свободном впуске воздуха. В случае тихоходных двигателей и особенно когда применяются газы, богатые водородом (коксовый газ, обогащенный генераторный газ), при малых нагрузках может быть получено достаточно полное горение. При высоких нагрузках эти газы имеют тенденцию гореть слишком быстро, со стуком,

Рис. 76. Зависимость удельного эффективного расхода топлива от среднего эффективного давления двигателей:

1 — бензинового; 2 — с расслоением заряда; 3 — дизеля



вследствие чего они не очень подходят для использования в таком процессе. Газы, содержащие мало водорода, особенно природный газ обычного состава, обладают склонностью к замедленному горению на низких нагрузках, как уже отмечено выше. В этом случае необходимо использовать некоторую степень дросселирования в целях обогащения смеси. При больших нагрузках, однако, эти газы сгорают лучше. Применяя генераторный газ можно добиться низкого содержания водорода, подавая в генератор меньше воды, чем это теоретически необходимо, но при этом снизится к. п. д. генератора.

230. В быстроходных двухтопливных двигателях можно встретиться с трудностями, связанными с затянутым периодом задержки воспламенения впрыскиваемого топлива вследствие разбавления воздуха газом. Это имеет место особенно в случае использования низкокалорийного генераторного газа, когда вследствие очень малых количеств топлива диффузия топливных струй в окружающую среду успевает завершиться до начала воспламенения, что делает последнее невозможным (абзац 269). Это

затруднение удастся преодолеть увеличением количества впрыскиваемого дизельного топлива или коренным изменением всей структуры факела с использованием, например, одноструйного распылителя вместо многоструйного. Но тогда двигатель перестает быть в полной мере двухтопливным, так как резко ухудшается его характеристика при работе на дизельном топливе.

Способы комбинированного регулирования количеств подаваемого дизельного топлива и газа здесь не рассматриваются. Отметим лишь, что в большинстве случаев обеспечивается возможность быстрого перехода от питания газом на нефтяное топливо (иногда даже автоматически).

ИДЕАЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

231. Двигатель этого типа, называемый также двигателем со сжатием воздуха или двигателем с воспламенением от сжатия, характерен использованием диффузионного горения, что осуществляется вводом топлива в сильно сжатый воздух в момент, когда сгорание является желательным, а именно при положении поршня вблизи в. м. т. Топливо начинает реагировать с воздухом, находящимся в цилиндре, немедленно по поступлении в него. Однако проходит определенный промежуток времени (период индукции), после которого оно начинает гореть достаточно быстро. Таким образом, первоначально процесс сгорания не является чисто диффузионным [25].

232. Для идеализации процесс сгорания в дизеле представляют чисто диффузионным, идущим с бесконечно большой скоростью реакции, в то время как процесс смешения считается идущим одновременно с поступлением топлива, т. е. без каких-либо задержек, следовательно, каждая из поступивших в любой момент времени частиц топлива полностью сгорает в тот же самый момент. Повышение давления при идеальном процессе сгорания будет постоянно опережать повышение давления в действительном процессе. Давления сгорания в идеальном процессе будут выше и их изменения в функции времени или угла поворота коленчатого вала целиком будут определяться характеристикой впрыска топлива, так как в свете сделанного предположения любое количество поданного в объем камеры сгорания топлива эквивалентно подводу вполне определенного количества тепла, которое может быть вычислено по низшему тепловому эффекту реакции.

5 Д. Д. Брозе

Соответственно представляется возможным полностью контролировать величину давлений сгорания с помощью характеристики впрыска, если, конечно, действительный процесс достаточно близок к описанному идеализированному. В случае теперь уже не применяемого процесса с компрессорным впрыском и распыливанием топлива такой контроль достигался приданием кулачку, управлявшему открытием иглы форсунки, надлежащей формы, подобранной опытным путем.

233. В системах с механическим впрыском, которые только и используются в настоящее время, особенно

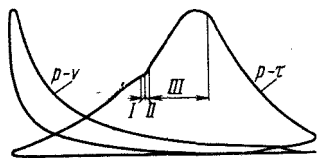


Рис. 77. Диаграмма действительного цикла дизеля с преобладающим диффузионным горением:

I, II, III — фазы сгорания

в двигателях с высоким числом оборотов, отклонения действительного процесса от идеального таковы, что контроль давления цикла отмеченным способом может быть успешным только в весьма ограниченных случаях, причем приходится идти на компромисс, исходя из приемлемого максимального давления сгорания. В общем случае для контроля диаграммы давления оказывается необходимым прибегать к весьма разнообразным средствам. Примером горения, в значительной мере контролируемого процессом впрыска, может служить цикл, реализуемый в тихоходном двигателе (судовом дизеле, рис. 77). Из-за большого числа различным образом влияющих факторов достижение мягкой работы быстроходного дизеля возможно лишь в итоге очень трудоемкой доводки. Поэтому на практике очень много двигателей работают с неприятным шумом.

234. Несмотря на то, что практически едва ли возможен контроль динамики тепловыделения по аналогии с идеальным процессом сгорания, последний все же сохраняет свое значение, во-первых, потому, что в случае не слишком больших отклонений от идеального процесса изменения параметров термодинамического цикла, являющиеся следствием применения различных характеристик впрыска, отражаются на действительном цикле качественно так же, как и на идеальном, и, во-вторых, потому, что особенности действительного цикла могут быть легче поняты при сравнении его с идеальным.

235. Идеальный процесс сгорания можно представить в виде графика, выражающего количество выделившегося тепла q в функции времени или угла поворота коленчатого вала, приняв, что в каждый момент времени ординаты пропорциональны массе или объему поданного к данному моменту топлива V_1 . Количество выделившегося тепла (рис. 78, а)

$$q_1 = H_u m = H_u V_1 \rho,$$

где H_u — низшая теплотворная способность топлива;
 ρ — плотность.

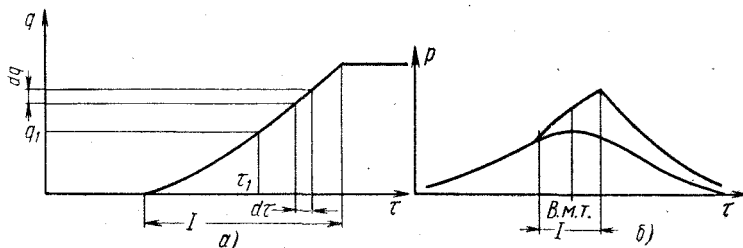


Рис. 78. Идеальный процесс сгорания:

а — выделение тепла в период впрыска; б — изменение давления; I — период впрыска

Использование для анализа объема поданного топлива удобнее, так как на практике изменяют характеристику впрыска именно изменением объема топлива, вытесняемого плунжером топливного насоса за период геометрической подачи.

236. Полученная таким образом диаграмма легко трансформируется в диаграмму давлений, исходя из термодинамических соотношений, для чего необходимо связать q с количеством наличного воздуха и знать, кроме того, как меняется давление без сгорания (при чистом сжатии — расширении) и в течение какого периода и в какой момент желательно производить впрыск. Дальше остается только преобразовать подвод тепла dq в подъем давления dp в каждый момент и получить диаграмму изменения давления идеального процесса сгорания (рис. 78, б). Необходимо помнить, что термин «идеальный» здесь относится к идеальному сгоранию и не означает, что форма кривой сгорания идеальна сама по себе, например, в смысле обеспечиваемого к. п. д. или динамики процесса.

5*

237. Можно также на основе рис. 78, б получить другую диаграмму давлений, приняв, что начальное давление сгорания постоянно и равно конечному давлению сжатия p_c , вследствие чего на этой диаграмме повышение давления пропорционально выделению тепла. Подобная,

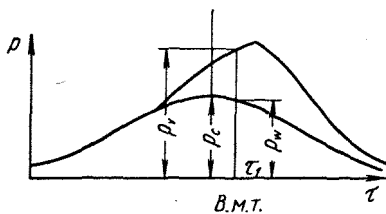


Рис. 79. К определению количества тепла, выделившегося к моменту τ_1

но приближенная диаграмма используется иногда на практике. Она получается путем умножения давления p_0 в любой момент времени на отношение $\frac{p_c}{p_w}$ (рис. 79). По этой новой диаграмме давлений можно без больших вычислений получить приближенно зависимость, аналогичную зависимости, показанной на рис. 78, а.

238. Рассмотрим теперь более подробно некоторые варианты идеальной диаграммы изменения давления. Прежде всего рассмотрим диаграмму с постоянным давлением в процессе сгорания, к получению которой стре-

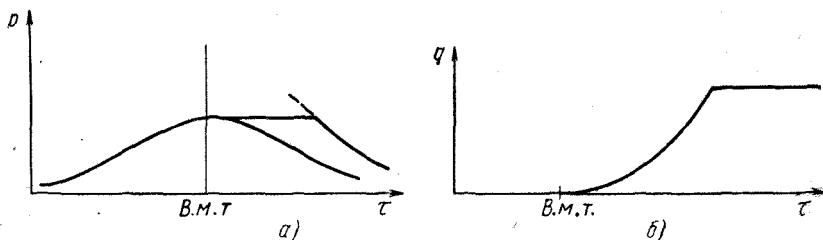


Рис. 80. Диаграммы, соответствующие процессу сгорания при постоянном давлении:

а — индикаторная; б — тепловыделения

мились в начале развития дизелей (рис. 80, а). Пересчитав ее обратно в координаты $q-\tau$, получим график, показанный условно на рис. 80, б, из которого следует, что впрыск топлива должен начинаться с медленно нарастающей скоростью, а в дальнейшем очень сильно ускоряться. Это может быть в действительности осуществлено при компрессорном впрыске с помощью кулачка требуемого

профиля, если впрыск топлива практически начинается в в. м. т.

В принципе нельзя считать невозможным достижение аналогичного развития процесса и в случае механического впрыска, но в действительности это очень трудно осуществить, и отклонения действительного процесса от желаемого, которые будут рассмотрены ниже, привели конструкторов к необходимости полностью отказаться от реализации цикла с постоянным давлением сгорания и примириться с наличием определенного повышения давления сверх давления сжатия.

239. В случае компрессорного впрыска для надежного пуска требовалась довольно высокая степень сжатия; с другой стороны, было важно иметь давление впрыска возможно более низким, но без риска проникновения горящих газов в форсунку при повышении давления в цилиндре. В случае механического впрыска давление сжатия может быть выбрано более низким и впрыск должен заканчиваться как можно ближе к в. м. т., так как в противном случае догорание будет чрезмерно затянутым (абзац 247).

240. В настоящее время в действительности допускается значительное превышение давления сгорания над давлением сжатия и, как следствие, достигается намного большая свобода в выборе характеристик впрыска. Интегральные характеристики впрыска современных двигателей приближаются к закону прямой линии. При этом $\frac{dq}{d\tau}$,

а также $\frac{dV}{d\tau}$ постоянны (рис. 81, кривая 1). Как правило,

$\frac{dV}{d\tau}$ незначительно возрастает со временем, прошедшим от начала впрыска (рис. 81, кривая 2). При дальнейшем рассмотрении предположим, что отношение $\frac{dV}{d\tau}$ постоянно,

и прежде всего выясним, что же произойдет при изменении мощности двигателя, а вернее, среднего индикаторного давления.

241. В дизеле мощность изменяется при постоянном числе оборотов уменьшением или увеличением количества впрыснутого топлива. Это достигается в большинстве случаев изменением эффективного хода нагнетания топлива насосом (активного хода плунжера). Выбирая вначале

наиболее простой случай, когда геометрический момент начала подачи топлива насосом остается постоянным, можно представить регулирование в диаграмме $q-\tau$, как показано на рис. 82. Соответствующие этому диаграммы

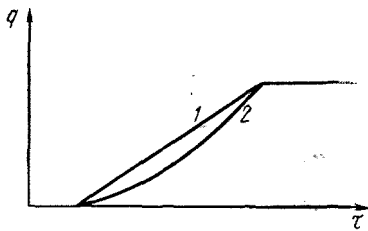


Рис. 81. Диаграммы тепловыделения

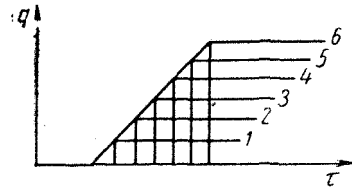


Рис. 82. Регулирование подачи (мощности) при постоянном начале подачи топлива:
1, 2, 3, 4, 5, 6 — моменты конца подачи при различных нагрузках

давления показаны на рис. 83, *a*. Видно, что при выбранной для анализа линейной интегральной характеристике подачи топлива диаграмма давления по времени изображается при полной нагрузке кривой линией. Это является

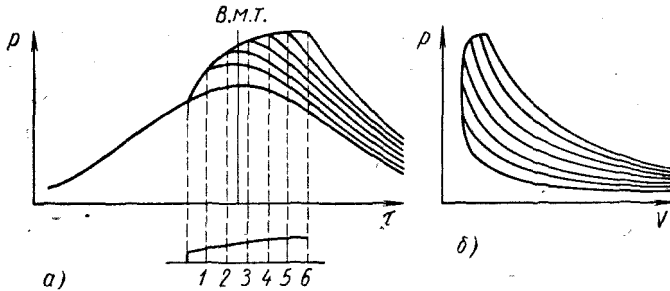
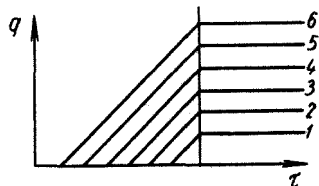


Рис. 83. Индикаторные диаграммы, соответствующие различным нагрузкам при постоянном начале подачи топлива:
a — развернутые; *b* — представленные в координатах $p - V$ (не в масштабе);
1, 2, 3, 4, 5, 6 — см. рис. 82

следствием влияния движения поршня, причем максимальное давление в такте сжатия достигается уже при частичной нагрузке (рис. 83, *a*, точка 3). В случае малой нагрузки (рис. 83, *a*, точка 1) сжатие продолжается после окончания сгорания; как следствие, такой цикл изменения давления не является наилучшим с термодинамической точки зрения. В действительном цикле, как будет

показано ниже, этого недостатка нет. Те же диаграммы в координатах $p—V$ представлены на рис. 83, б, из которого видно, что при работе на частичных нагрузках сгорание происходит практически при постоянном объеме, а на повышенных нагрузках — приблизительно, в соответствии с циклом Сабатэ.

242. В случае регулирования мощности двигателя изменением начала подачи топлива при постоянном конце ее, как это в некоторых случаях принято на практике,



серия циклов тепловыделения выглядит, как показано на рис. 84. Соответствующие диаграммы давления представлены

Рис. 84. Регулирование подачи (мощности) при постоянном конце подачи

на рис. 85, а, где видно, что максимальное давление сгорания монотонно возрастает при увеличении нагрузки. На меньших нагрузках индикаторная диаграмма термодинамически менее благоприятна (см. диаграмму $p—V$ на рис. 85, б), но в данном случае будут особенно не-

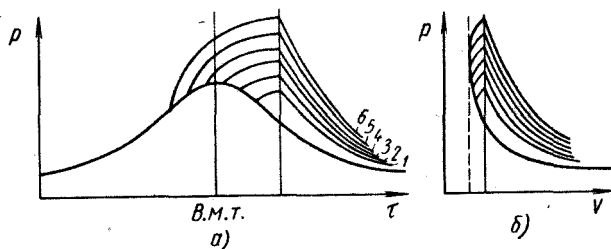
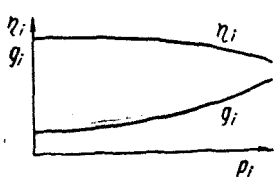


Рис. 85. Индикаторные диаграммы, снятые при различных нагрузках двигателя при постоянном конце подачи:

а — развернутые; б — представленные в координатах $p—V$

благоприятно сказываться отклонения от нормального процесса, возрастающие при непрогретом двигателе. Не будем обсуждать все причины, по которым этот тип регулирования мощности иногда является предпочтительным. Отметим лишь, что он применяется в тех случаях, когда число оборотов двигателя возрастает с нагрузкой (судовые или в прошлом авиационные двигатели).

243. Из диаграмм давления, показанных на рис. 83, б, уже очевидна зависимость от нагрузки теоретически достижимого к. п. д. Это может служить базой для оценки получаемых в действительности значений удельного расхода топлива. Во всех случаях, когда тепловыделение происходит приблизительно в самом начале хода расширения, к. п. д. может быть выражен формулой



$$\eta = 1 - \frac{1}{g^{k-1}}$$

Рис. 86. Зависимости удельного индикаторного расхода топлива и индикаторного к. п. д. от величины среднего индикаторного давления

при условии, что теплоемкость постоянна. В действительности теплоемкость продуктов сгорания растет с температурой, вследствие чего показатель k и к. п. д. несколько уменьшаются с увеличением нагрузки (а следовательно, и температуры). На самом деле к. п. д. будет уменьшаться еще больше, так как с увеличением нагрузки процесс приближается к циклу Сабатэ. В принципе, таким образом, получаем (при идеальном горении) зависимости, показанные на рис. 86, причем зависимости удельного расхода топлива от нагрузки, естественно, имеет характер, обратный характеру зависимости к. п. д. Изобразим зависимости удельного индикаторного g_i и удельного эффективного g_e расходов топлива от нагрузки, приняв, что:

- 1) давление на входе в двигатель равно атмосферному (1 ат);
- 2) давление на входе в двигатель равно 2,5 ат;
- 3) зависимости g_i от полного количества воздуха в цилиндре в обоих случаях аналогичны;
- 4) имеется постоянная разница между средним индикаторным (p_i) и средним эффективным p_e давлениями, равная 1 ат.

Соответствующие графики показаны на рис. 87 (кривые /и //). Из этих зависимостей очевидно, что из-за уменьшения относительного значения потерь на трение удельный расход топлива при наддуве оказывается меньшим, а зависимость его от нагрузки становится более полой. На рис. 87 в ряде точек приведены также зна-

чения коэффициента избытка воздуха $\alpha = \frac{1}{KC}$ для того, чтобы ясно показать соотношение между двумя кривыми. 244. Конструктор обычно стоит перед проблемой увеличения к. п. д. до оптимального значения при поддер-

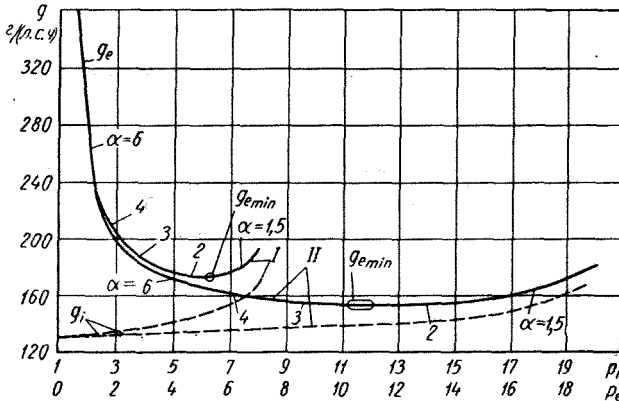
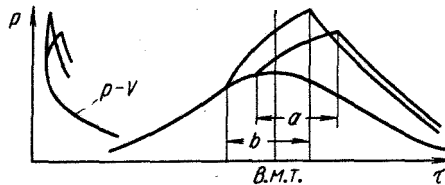


Рис. 87. Влияние высокого наддува на зависимость удельного эффективного расхода топлива от среднего давления цикла:
/ — без наддува; // — с высоким наддувом

жании в то же время давления сгорания в разумных пределах. Повышения к. п. д. можно достигнуть увеличением опережения впрыска, вследствие чего большая часть сгорания будет протекать вблизи в. м. т. (рис. 88).

Рис. 88. Влияние угла опережения впрыска на величину максимального давления сгорания:
a, *b* — продолжительность впрыска



Но, как видно из рисунка, с ростом к. п. д. одновременно растет максимальное давление сгорания. Как будет показано ниже, выбор опережения впрыска, при котором достигается оптимум, определяется совершенно иными соображениями, основанными в большей мере на отклонениях действительного процесса от идеального. Полезно,

однако, установить в принципе, как изменяются к. п. д. и максимальное давление сгорания при опережении впрыска в случае идеального процесса для того, чтобы сравнить с ними данные, получающиеся на практике. Таким образом можно выявить действие вторичных, но иногда очень важных факторов, таких, например, как потери тепла, меняющиеся со временем, движение заряда смеси и т. д. На рис. 89 схематически показаны зависимости

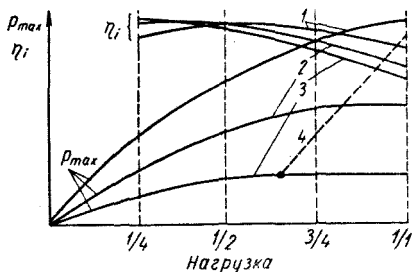


Рис. 89. Зависимость максимального давления сгорания и индикаторного к. п. д. от нагрузки при различных значениях угла опережения впрыска:

1 — раннее начало впрыска; 2 — промежуточное начало впрыска; 3 — позднее начало впрыска; 4 — предел P_{max}

индикаторного к. п. д. η_i и максимального давления сгорания P_{max} от нагрузки при трех различных значениях опережения впрыска (были выбраны четыре значения подачи топлива, грубо соответствующие нагрузкам $\frac{1}{4}$, $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{4}$ и

полной).

245.

Аналогичным образом могут быть в принципе установлены и другие зависимости. Некоторые из них действ-

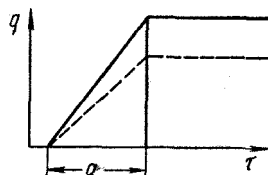
ительно важны и могут встретиться на практике при использовании топлив с различными свойствами. Единственным свойством топлива, которое может влиять на идеальную диаграмму тепловыделения, в действительности представляющую собой изменение во времени произведения $H_u V_1 \rho$, является теплота сгорания единицы объема топлива, если проводить анализ на основе зависимости $V_1 = f(\tau)$, обеспечиваемой системой впрыска топлива. В действительности некоторые другие свойства топлива также оказывают влияние на процесс, в частности, его вязкость, плотность и сжимаемость в связи с их влиянием на зависимость типа $V = f(\tau)$ при заданной системе впрыска.

246. Заменим в конкретном случае одно топливо на другое, имеющее большую теплоту сгорания на единицу объема (это может иметь место, например, при переходе на топливо с большим содержанием ароматических углеводородов или на топлива с меньшей испаряемостью;

в обоих случаях плотность увеличивается в большей степени, чем уменьшается H_u). В результате большее количество калорий тепла выделится при неизменной продолжительности впрыска (рис. 90). Диаграмма давления (рис. 91, а) показывает, что при неизменном начале впрыска увеличивается скорость нарастания давления,

Рис. 90. Влияние плотности топлива на тепловыделения при идеальном сгорании и одинаковой характеристике впрыска:

а - продолжительность впрыска



достигается большее давление сгорания, а также большее среднее индикаторное давление цикла при неизменном объеме впрыснутого топлива (рис. 91, б). Это можно наблюдать на практике, когда сравниваются характеристики двигателя на двух топливах при неизменном положении рычага управления, или как это часто бывает

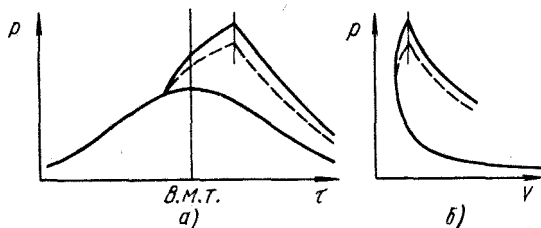


Рис. 91. Индикаторные диаграммы идеального сгорания топлив с различной плотностью:

а — развернутые; б—представленные в координатах $p - V$

с малыми двигателями при нагружении их до положения, когда регулятор выключается из работы (рейка насоса на упоре). Но и в том случае, когда при работе на обоих топливах двигатель нагружается одинаково, будет наблюдаться различие в диаграммах, так как продолжительность впрыска при большем значении произведения $H_u \rho$ будет меньше, вследствие чего идеальный процесс смещается к в. м. т., что приведет к возрастанию максимального давления сгорания и к. п. д. (рис. 92).

Учитывая зависимости, приведенные ранее, можно найти пути достижения как можно более близкой к оптимальной регулировки процесса при работе двигателя на различных топливах. Не исключена также возможность

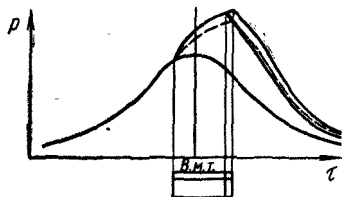


Рис. 92. Изменение индикаторной диаграммы при идеальном сгорании за счет более короткого впрыска при топливе с большей плотностью

применения плунжерных пар различного диаметра при очень большой разнице в H_u и ρ , которая может встретиться в случае использования двигателя для различных назначений или его экспортирования в страны с резко различающимися топливами.

ДЕЙСТВИТЕЛЬНЫЙ ПРОЦЕСС

247. Рассмотрим отклонения действительной индикаторной диаграммы от идеальной, связанные с конечной скоростью реакций и несовершенным смесеобразованием¹ (рис. 93). На диаграмме показаны четыре периода (фазы) горения [26].

I. Период индукции процесса самопроизвольного самовоспламенения, которое инициирует горение (время воспламенения, задержка воспламенения или запаздывание воспламенения).

II. Период (фаза) взрывного сгорания топлива, аккумулярованного и подготовленного к горению в течение периода I.

III. Период диффузионного горения топлива, не сгоревшего за период II и поданного позднее. В этом случае можно различить:

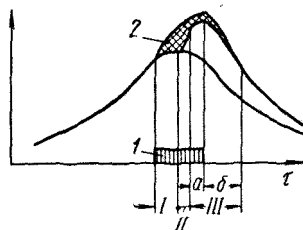


Рис. 93. Фазы сгорания в дизеле:

I — подвод тепла; 2 — идеальное сгорание; I, II, III — фазы сгорания

¹ Автор не упоминает отклонения, связанные с тепловыми потерями в действительном цикле. Прим. пер.

а) участок, на продолжении которого диффузионное горение практически успевает следовать за впрыском и где диаграмма давления прямо определяется характеристикой впрыска; этот участок с периодом Π вместе составляют период основного горения¹,

б) участок догорания, происходящего после окончания впрыска.

248. Отклонения действительной диаграммы от идеальной могут быть настолько большими, что трудно будет найти в них какое-либо сходство, в частности, в связи с тем, что взрывное горение, следующее за сравнительно длительной задержкой воспламенения, часто всецело определяет процесс сгорания. К этому может добавиться и несовершенство самой регистрации давления (из-за относительно инерционного индикатора, чрезмерно длинного соединительного канала). При этом в одних случаях колебания давления, различимые на диаграммах, могут быть целиком обязаны собственным колебаниям индикатора (рис. 94 а), тогда как в других случаях они вызываются колебаниями давления, связанными с наличием колебательной системы, включающей камеру сгорания - индикаторный канал - полость датчика (рис. 94, б).

249. В настоящее время легко проверить, не являются ли диаграммы, аналогичные показанной на рис. 94, а, следствием влияния динамики индикатора, но в прошлом

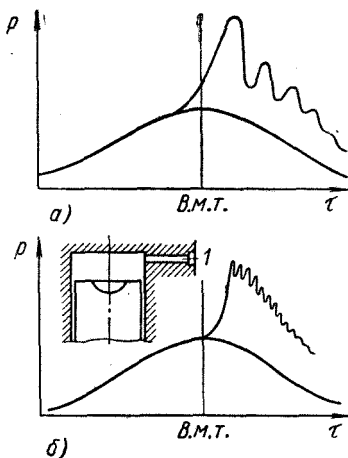


Рис. 94. Давление, замеренное индикатором, имеющим собственную частоту колебаний:

а - низкую; б - высокую; 1 — точка замера

¹ Как показали советские исследователи, в частности, А. И. Толстов, период основного тепловыделения не ограничивается в ряде случаев моментом достижения максимального давления. Например, в двигателях с наддувом нередко более 50% топлива сгорает позднее. В этом плане предлагаемое автором деление далеко от универсальности и мало отличается от классических трех фаз, предложенных Г. Рикардо. Прим. пер.

это явление вызвало появление ряда ошибочных гипотез о наличии «последовательных взрывов». Труднее выявить влияние собственно измерительной системы, когда колебания давления малы по амплитуде и одновременно имеют очень низкую частоту (собственная частота механических индикаторов давления равна 100—200 *гц*, оптических и электрических 1000—10 000 *гц* и более). Записанная диаграмма давления может в этом случае иметь вид, показанный на рис. 95 (непрерывная кривая). Эта диаграмма на первый взгляд кажется нормальной и может быть использована для определения среднего индикатор-

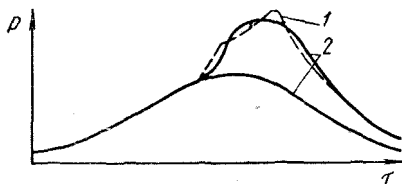


Рис. 95. Влияние инерционности индикатора на вид индикаторной диаграммы:

1 — действительное давление;
2 — давление, замеренное индикатором

ного давления. Ее нельзя, однако, использовать для исследования горения. Как видно из диаграмм, не исключено даже, что замеренное давление сгорания может оказаться ниже действительного, хотя обычно оно оказывается выше последнего.

250. Для точной записи давления в период расширения, что очень важно для определения основных показателей цикла, необходимо применять индикатор с очень высокой частотой собственных колебаний, избегать влияния индикаторного канала и применять исключительно надежные методы тарировки по давлению и по времени (или объему). Во многих опытах удалось получить удовлетворительные результаты только с помощью оптико-механических или стробоскопических (типа Фарнборо) индикаторов и только при условии принятия всех предосторожностей, особенно в отношении точности привода индикатора. При очень узкой индикаторной диаграмме дизеля, имеющей в координатах ρ — V форму бумеранга, чрезвычайно велика ошибка в определении среднего давления цикла при неверном нанесении на индикаторную диаграмму угловых отметок (в. м. т.).

251. В результате взрывного горения на детали действует динамическая нагрузка (абзац б), возникает характерный для дизеля шум, причем непосредственной

причиной последнего является вибрация деталей дизеля. Как следствие, в случае тихоходных судовых дизелей это может быть сильный, ухающий звук низкой частоты (свободная частота основного тона, изменяющаяся в пределах от нескольких десятков до нескольких сотен колебаний в секунду). Имеется множество обертонов или, вернее, сопутствующих более высоких тонов, так как в дополнение к детали двигателя, вибрирующей с минимальной частотой, могут вибрировать и другие детали. Иногда прослушивается звук, соответствующий собственной частоте колебаний газа в камере сгорания. В случае двигателей средних размеров колебания газа в камере сгорания вызывают типичный детонационный стук. Обертон, соответствующий этому источнику, характерен. Он имеет частоту порядка нескольких сотен колебаний в секунду. В быстроходных дизелях, в которых нередко проявляется взрывное горение, «стук» прослушивается при сравнительно низких числах оборотов, причем тон его при этом иной (нечто похожее на кудахтанье — термин, который иногда применяется); при больших числах оборотов звук основного тона вследствие увеличения возбуждающей частоты переходит в нечто напоминающее хрюканье, и начинают преобладать обертоны. Частично это вновь тон собственно камеры сгорания (в случае некоторых систем сгорания), который в многоцилиндровых двигателях может доходить до пронзительного свистящего звука (особенно в случае двигателей непосредственного впрыска — из-за применяемой формы камеры сгорания). В целом проблема снижения шумности дизеля не решена, но некоторые конструкторы добились успеха в снижении шумов до приемлемого уровня. Для этого конструкция двигателя должна быть достаточно жесткой, а процесс сгорания должен тщательно контролироваться.

252. На рис. 96 представлены репродукции кино съемки процесса сгорания, сделанные в НАСА. На освещенном фоне видны распространяющиеся струи топлива. В некоторый момент возникает светящаяся точка (очаг воспламенения; химическая люминесценция, возникающая до этого момента, наблюдалась уже ранее другими исследователями, но свечение, представленное здесь, действительно является началом возникновения пламени). Этот очаг пламени быстро развивается, причем одновременно появляются новые центры воспламенения (абзац 79);

начинается вторая фаза горения. Очень трудно установить экспериментально, какие условия являются наиболее благоприятными для возникновения первичного очага воспламенения.

253. Чем короче период индукции, тем меньше интенсивность взрыва вследствие меньшего количества топлива в камере и худшего его распыления, испарения и смешения с воздухом к моменту, когда начинается горение.

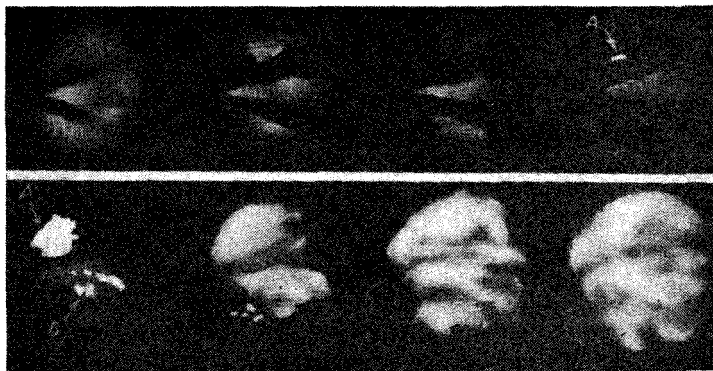


Рис. 96. Постепенное распространение пламени из отдельных очагов воспламенения при относительно коротком периоде задержки воспламенения:

A, B — очаги воспламенения

Для того чтобы приблизиться к идеальной диаграмме, стремятся сократить период индукции, но сокращение это имеет разумный предел не только из-за реальных возможностей его осуществления в быстроходных дизелях, но также вследствие связанных с этим недостатков; многократно подтверждалось, что когда период индукции сокращается до очень малых значений (предел этого сокращения зависит от конкретно рассматриваемого двигателя), сгорание ухудшается, растягивается процесс догорания и, как следствие, уменьшается к. п. д. Это связано с чересчур быстрым испарением топлива, впрыскиваемого в пламя, в связи с чем уменьшается дальнобойность струи и, как следствие, ухудшается смесеобразование. Дальнейшие сведения по этому вопросу см. в абзацах 293, 361. На рис. 97, *a, б* показаны две индикаторные диаграммы и

соответствующие им характеристики скоростей тепловыделения $\frac{dq}{d\tau}$. Здесь следует отдать предпочтение индикаторной диаграмме, изображенной на рис. 97, а, так как

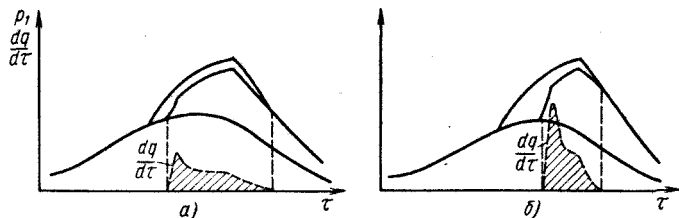


Рис. 97. Влияние продолжительности периода индукции на характер тепловыделения:

а — короткий период индукции; б — длинный период индукции

при индикаторной диаграмме, изображенной на рис. 97, б горение протекает неприемлемо жестко; выбор, однако может быть и значительно более трудным.

I. ПЕРИОД ИНДУКЦИИ

254. В противоположность теоретическому периоду индукции, рассмотренному для случая, когда гомогенная смесь имеет первоначально температуру t_0 и когда именно от момента достижения смесью этой температуры отсчитывается период индукции, в действительном цикле имеется жидкое топливо с относительно низкой температурой t_m , вводимое в воздушную среду с более высокой температурой t_c . Последняя обычно изменяется в течение периода впрыска; с одной стороны, она возрастает вследствие продолжающегося сжатия, с другой — уменьшается из-за локального охлаждения воздуха в результате контакта с топливными струями и отдачи тепла от воздуха к топливу. При этом возможны очень большие отклонения значений температуры от средней ее величины. Нагретое топливо начинает испаряться, вследствие чего позади каждой движущейся капли образуется паровой след. В период испарения капля вовсе не должна иметь температуру кипения, соответствующую данному давлению: вначале концентрация паров равна нулю, и при относительном движении капли и воздуха будет происходить

быстрое испарение даже при очень низком давлении паров на поверхности капли.

255. Среднее давление паров все еще остается небольшим даже после полного испарения, что станет ясным из следующего примера. Примем, что средний молекулярный состав легкого дизельного топлива соответствует $C_{15}H_{30}$. Теоретически необходимое количество воздуха равно при этом 107 объемным частям воздуха на одну часть топлива. При обычном для больших двигателей 100%-ном избытке воздуха (коэффициент $KC = 0,5$) на одну часть топлива будет приходиться 214 частей воздуха. Если давление сжатия равно 30 ат , то в случае гомогенной смеси давление паров составит только $\frac{1}{214}$ от 30 ат , т. е. около $\frac{1}{7} \text{ ат}$,

следовательно, топливо и при температуре, значительно более низкой, чем температура его кипения при атмосферном давлении (270° С), может полностью испариться. В приведенном примере температура кипения, соответствующая $\frac{1}{7} \text{ ат}$, составляет около 170° С .

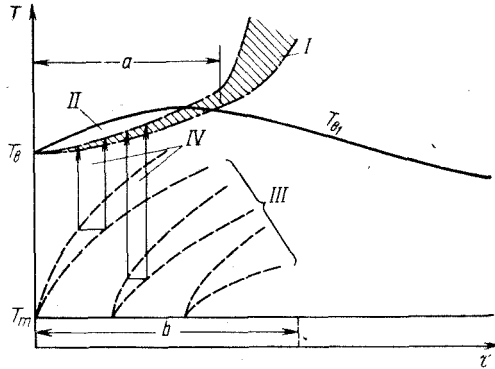
256. Локально, однако, будут достигнуты большие значения парциального давления паров, а следовательно, большие значения коэффициента KC , так как смешение на этой стадии процесса еще очень несовершенно. Представляется возможным подсчитать падение температуры воздуха для определенных значений достигнутого давления паров, если принять, что в некотором объеме тепло, подведенное к топливу (тепло подогрева, испарения, перегрева паров до конечной температуры), отнято от воздуха, содержащегося в этом объеме. Таким образом, было бы выявлено, какой предел насыщения может быть достигнут при заданных температурах и давлении воздуха, а также при данной кривой упругости паров топлива, и, следовательно, можно было бы получить некоторое представление о локальных условиях. В частности, применяя этот метод, установили, что при коэффициенте $KC = 1$ уменьшение локальной температуры воздуха может достигнуть 50° С .

257. В первом приближении можно представить течение процессов в следующем порядке. Капли различных размеров прогреваются по экспоненциальной зависимости, одновременно испаряясь (рис. 98) [26]. Даже в случае топлива сложного состава, имеющего широкие

пределы возгонки, пар будет в основном иметь тот же состав, что и жидкость, так как скорость процесса так велика, что не достигается точного равновесия между

Рис. 98. Схематическое изображение процессов впрыска, испарения и последующего развития реакции:

/ — образование пламени;
 // — охлаждение воздуха топливом; /// — подогрев капель; IV — перегрев паров; T_e — температура воздуха; T_{a1} — температура воздуха в случае отсутствия впрыска топлива; T_m — температура топлива; a — период индукции; b — продолжительность впрыска топлива



жидкостью и паром по закону Рауля, в соответствии с которым пар всегда содержит больше легких фракций, чем жидкость. Дело в том, что в данном случае скорость испарения легких фракций выше скорости их диффузии

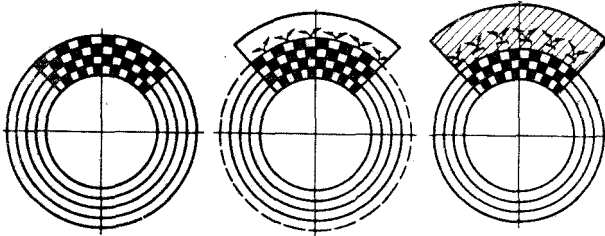


Рис. 99. Схематическое изображение быстрого испарения двухкомпонентной капли последовательным полным отделением условных слоев капли:

черный квадратик — компонент с высокой температурой кипения; белый квадратик — компонент с низкой температурой кипения

в капле в направлении к ее поверхности. Как следствие, испаряются даже самые тяжелые фракции наружного слоя капли, после чего приходит в соприкосновение с воздухом следующий слой (схематически показано на рис. 99). Очень маленькие капли успевают испариться на более ранней стадии.

258. В то время как в капле образуется резкий градиент температур, образовавшийся пар вследствие смешения его с окружающим воздухом практически сразу же прогревается до температуры последнего, и в нем немедленно начинают развиваться химические реакции. В объеме, заполненном несколькими тысячами капель, создаются зоны с различной концентрацией, причем в точках с наиболее богатым содержанием паров температура минимальна; вследствие этого, с одной стороны, в зонах с низкой температурой скорость реакции должна была бы уменьшиться, но, с другой стороны, с повышением концентрации паров топлива она увеличивается¹. Имеется оптимум, при котором реакции идут с максимальными скоростями. В одной или нескольких таких зонах возникает очаг (очаги) воспламенения, в которых реакция впервые оказывается столь интенсивной, что проявляется в виде пламени (см. рис. 97).

259. Можно считать, что период индукции состоит из двух перекрывающих одна другую фаз: первая, физическая, фаза связана со временем распыливания, прогрева и испарения до возникновения где-либо оптимальных условий для развития реакции; вторая, химическая, фаза связана со временем, в течение которого реакция в зоне с оптимальными условиями приводит к появлению очага пламени. Физическая часть в работающем двигателе при нормальном распыливании и топливе с пределами возгонки 200—350° С мала и составляет около 10% всего времени задержки. В холодном двигателе (пуск, холостой ход), при более грубом распыливании (высокая вязкость), - более низкой испаряемости топлива (продукты вакуумной дистилляции, остаточные фракции, а также растительные и животные масла) физическая часть может значительно увеличиться. Приведем примеры для иллюстрации [27].

260. А. В случае нормальных алканов и нормальных алкенов период индукции τ_i уменьшается при увеличении числа атомов углерода до определенного значения вследствие повышения активности молекул (большей склонности их к разложению); при большем увеличении числа атомов углерода τ_i растет из-за уменьшения давления паров.

¹ В настоящее время причины этого достаточно изучены (см. Штерн В. Я. «Механизмы окисления углеводородов в газовой фазе» М., АН СССР, 1960). *Прим. ред.*

В табл. 3 приведены периоды индукции в градусах угла поворота коленчатого вала φ_i при $n = 250$ об/мин в зависимости от давления сжатия.

Т а б л и ц а 3

Углеводород	Давление сжатия в ат		
	30	15	10
<i>n</i> -гептан C_7H_{16}	7,1	12,8	21,2
<i>n</i> -цетен $C_{16}H_{32}$	6,3	10,5	18,7
<i>n</i> -цетан $C_{16}H_{34}$	6,0	10,2	18,3
<i>n</i> - $C_{34}H_{68}$	8,4	13,6	20,3

Различные значения давления сжатия были получены дросселированием воздуха на впуске. Интересно отметить увеличение периода индукции с уменьшением давления. К этому явлению мы обратимся вновь позднее. В случае соединения *n*- $C_{34}H_{68}$ удлинение периода индукции не пропорционально уменьшению давления. Все значения φ_i для $C_{34}H_{68}$ на 2—3° угла поворота коленчатого вала выше значений для цетана, что иллюстрирует степень влияния физической части на общую продолжительность периода индукции.

Б. Различия в изменении периода индукции с температурой легких дистиллятов, имеющих длинный период индукции (высокое содержание ароматических соединений), и тяжелых остатков нефти еще более значительны (табл. 4).

Т а б л и ц а 4

Параметры	Дистиллят с цетановым числом		Тяжелый остаток нефти
	высоким	низким	
Вязкость в <i>сст</i> при $t^\circ C$:			
25	3,44	2,60	3400
50	2,08	1,63	480
100	1,01	0,85	35,5
Период индукции в градусах угла поворота коленчатого вала при $t^\circ C$:			
25	5,0	13,0	13,5
50	5,0	12,5	7,5
100	5,0	11,5	7,0

Отсюда следует, какое важное значение имеет улучшение распыливания в связи с уменьшением вязкости при увеличении температуры топлива в случае тяжелого нефтяного остатка. Очевидно также, что в случае тяжелого остатка нефти значительную часть (6,5° угла поворота коленчатого вала или более) общего периода индукции (13,5°) составляет физическая фаза.

В. Цетановое число, определенное на основе сравнения воспламеняемости данного образца топлива с воспламеняемостью смеси эталонных топлив ¹ всегда для остаточных фракций ниже, чем для легких топлив, полученных из той же сырой нефти.

Г. Аномальное поведение топлив с низкой испаряемостью увеличивается по мере ухудшения распыливания

Т а б л и ц а 5

Параметры	Дистиллят				Арахисовое масло
	P	Q	U	W	
Цетановое число при N/n в л. с./ <i>(об/мин)</i> :					
<u>2</u> 600	60	24	50	42	43
<u>7,5</u> 1000	61	22	51	42	48
<u>12</u> 1500	62	23	51	42	66
Период индукции в град угла поворота коленчатого вала при N/n— в л. с./ <i>(об/мин)</i>					
<u>2</u> 600	7,5	—	8,6	10,7	10,4
<u>7,5</u> 100	9,6	24,0	11,0	12,7	11,4
<u>12</u> 1500	11,4	30,0	13,1	15,3	10,9

¹ n-цетан : 100, α-метилнафталин : 0.

и снижения теплового режима двигателя. Результаты опытов по сравнению цетановых чисел легких дистиллятов и арахисового масла (растительное масло, состоящее из длинной n -алкильной цепи с группой, полученной из глицерина, которое не может возгораться без разложения) иллюстрируются в табл. 5. В этой же таблице приведены соответствующие значения периода индукции в градусах угла поворота коленчатого вала. Дизель, на котором получены эти значения, четырехтактный, непосредственного впрыска.

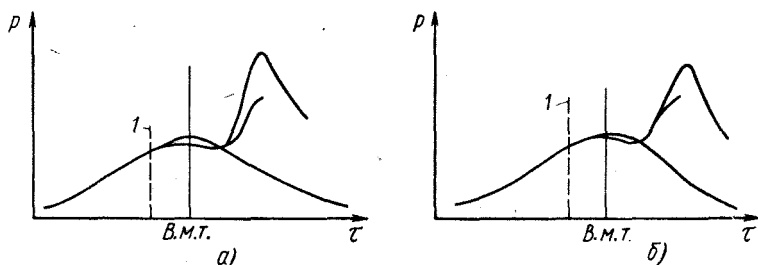


Рис. 100. Влияние тепла, затрачиваемого на прогрев и испарение топлива, на падение давления в период индукции:

a — при легкоиспаряющемся топливе; *б* — при трудноиспаряющемся топливе; 1-1 — начало впрыска

Д. Наконец, рассмотрим падение давления из-за затрат тепла на прогрев и испарение топлива, видимое на специально для этой цели снятых диаграммах «давление—время» (рис. 100). При одинаковом периоде индукции в случае тяжелого нефтяного остатка (рис. 100, *б*) падение давления заметно меньше и начинается позднее, чем при впрыске дистиллята (рис. 100, *а*). При проведении подобных опытов распыливание и распределение топлива по камере должны быть как можно более однородными, иначе реакции в период индукции в отдельных зонах с оптимальными условиями будут идти достаточно интенсивно и компенсировать за счет выделяющейся в этих реакциях энергии падение давления вследствие прогрева и испарения.

261. Выше отмечалось, что физическая фаза периода индукции начинает доминировать в случае тяжелых топлив на режимах, на которых двигатель еще не прогреет. Влияние этого фактора при пуске двигателя и при работе в холодную погоду, особенно в двигателях малых размеров,

проявляется и в случае применения легких дизельных топлив. Следует помнить, что период индукции при пуске очень продолжителен, поэтому струи успевают развиться и попадают на холодные стенки камеры сгорания. В результате может иметь место такой недостаток горючего в заряде, что если даже и произойдет воспламенение, оно не будет сопровождаться необходимым повышением давления. Необходимо отметить, что часто можно облегчить пуск холодного двигателя впрыском бензина, име-

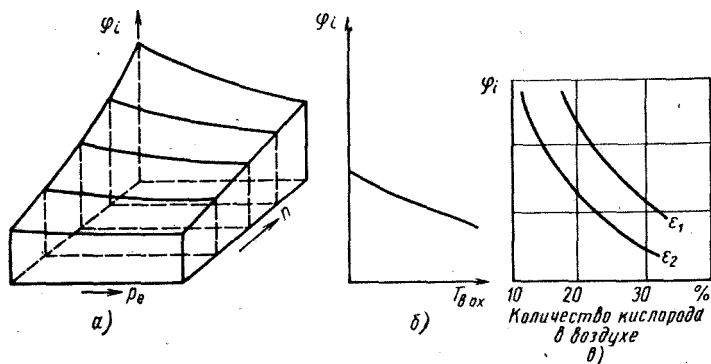


Рис. 101. Влияние на продолжительность периода индукции, измеренного в градусах поворота коленчатого вала:

а — нагрузки и числа оборотов двигателя (изменение температуры и давления); *б* — температуры воды $T_{в\text{ох}}$ в рубашке охлаждения; *в* — концентрации кислорода в воздухе

ющего на рабочих режимах более длинный период индукции, чем у дизельного топлива. В очень холодную погоду для пуска дизелей иногда применяется эфир. Для улучшения испарения впрыскиваемого топлива используются хорошо известные свечи накаливания.

262. Из приведенных выше примеров ясно, как влияют температура и тип применяемого топлива на период индукции. Влияние температуры наглядно иллюстрируется рис. 101, *а*, где представлена зависимость периода индукции в двигателе, аналогичном упомянутому выше, от нагрузки и числа оборотов. Следует, конечно, иметь в виду, что в этом случае меняется не только температура. Другой пример влияния температуры показан на рис. 101, *б*, из которого следует, что температура охлаждающей воды оказывает влияние на температуру заряда.

263. Влияние давления может быть достаточно точно выражено зависимостью $\tau_{i \text{ хим}} = \frac{C}{p}$, причем в большин-

стве случаев можно приближенно считать, что $\tau_i = \frac{C}{p}$,

так как обычно химическая составляющая периода индукции преобладает над физической. Это впервые было продемонстрировано диаграммами, полученными при дросселировании воздуха на впуске в двигатель Томас-сена с непосредственным впрыском (рис. 102). В этом слу-

чае также изменяется не только плотность заряда и очень трудно оценить влияние всех вторичных изменяющихся факторов (температура, условия впрыска). Более определенные результаты получены на дизеле с переменной степенью сжатия ϵ в опытах, имевших целью выявить влияние содержания кислорода O_2 на работу двигателя при двух значениях степени сжатия. Была также получена характерная зависимость

$\tau_i = \frac{C}{p_{O_2}}$ (рис. 101, в). Таким обра-

зом упомянутое выше влияние давления с большой вероятностью можно считать практически идентичным с влиянием содержания O_2 . Это влияние было совершенно очевидным при использовании газодизельного процесса с вспомогательным впрыском, где подача промышленного или городского газа немедленно приводила к удлинению τ_i , причем до такой даже степени, что работа двигателя на высоких числах оборотов становилась чрезвычайно затруднительной (абзац 229)¹.

264. Влияние мелкости распыливания, а следовательно, давления впрыска не столь значительно, за исключением случаев применения топлив с низкой испаряемостью и высокой вязкостью. На практике очень трудно оценить полностью влияние всех факторов, изменяющихся

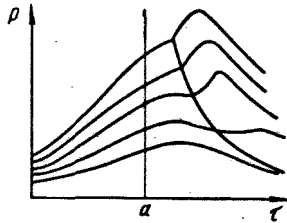


Рис. 102. Влияние давления, изменяемого дросселированием воздуха на входе в двигатель, на продолжительность периода индукции:

а — начало впрыска

¹ С таким объяснением вряд ли можно согласиться. Даже при подаче газа в количествах, отвечающих $\alpha = 1$, концентрация O_2 снижается всего лишь на 10%. Видимо, здесь сказываются чисто кинетические факторы. *Прим. ред.*

с давлением впрыска, например дисперсности (распределения капель в объеме камеры сгорания). Ведь достаточно, чтобы оптимальные условия создались в каком-то одном месте камеры сгорания, причем положение этого места

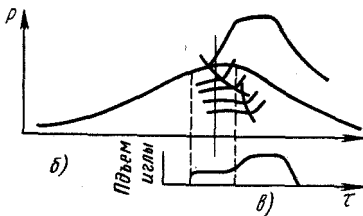
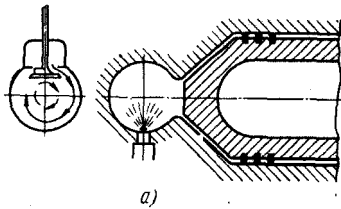


Рис. 103. Влияние мелкости распыливания на продолжительность периода индукции:

a — схема дизеля с горизонтально расположенными цилиндрами с вихреобразованием, создаваемым заширленным клапаном и веерообразной струей топлива; *б* — индикаторные диаграммы при разной степени дросселирования воздуха на впуске; *в* — зависимость подъема иглы форсунки от времени, иллюстрирующая ступенчатый характер впрыска

может изменяться без какого-либо влияния на величину периода индукции.

265. В конкретном случае эффект мелкости распыливания можно продемонстрировать. Дизель с горизонтальным расположением цилиндров, в который топливо впрыскивалось в горизонтальной плоскости из распылителя со щелевым отверстием, имел устройство для создания вихря, вращающегося вокруг оси цилиндра (рис. 103, *a*), и характеристику впрыска с постепенно увеличивающимся давлением, так как игла в начале впрыска открывалась незначительно (рис. 103, *б*). Опыты показали, что при дросселировании воздуха на впуске, осуществляемом так же, как это делалось в случае исследований, результаты которых показаны на рис. 102, зависимость пе-

риода индукции от давления заряда из-за изменения давления впрыска оказалась не гиперболической; на ней можно различить две ветви (рис. 103, *б*). Это заставляет предположить, что период индукции второй части топлива, подаваемого под более высоким давлением, был короче. Учитывая также результаты опытов, которые будут обсуждаться позднее, можно предположить, что в этом случае менялась локальная концентрация топлива. В случае конической компактной струи, впрыскиваемой из круглого отверстия, вместо дисперсной струи, впрыскиваемой из щели, отмеченное явление было бы, очевидно, менее заметным.

266. При одинаковых условиях влияние типа применяемого топлива на период индукции может быть выражено с помощью так называемой калибровочной кривой, т. е. графика значений периодов индукции различных смесей цетана и α -метилнафталина (рис. 104). Эта зависимость имеет гиперболический характер; это объяснимо, если принять, что только один из компонентов топливной смеси обладает химической активностью, в то время как второй полностью инертен. Тогда величина периода индукции оказывается обратно пропорциональной величине количества активного компонента. Смеси других веществ дают аналогичные зависимости; когда цетановое число каждого из веществ определяется по величине получаемого периода индукции с использованием калибровочной кривой, то оказывается, что цетановые числа смесей линейно зависят от содержания в смеси химически активного компонента. Это оказывается правильным, однако только для легких топлив, при применении которых физическая фаза периода задержки пренебрежимо мала.

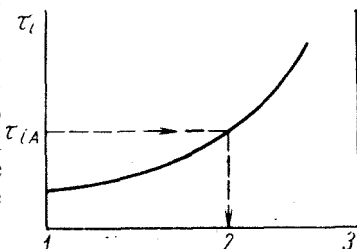


Рис. 104. Зависимость периода индукции от состава смеси стандартных топлив, используемая при определении цетановых чисел дизельных топлив:

1 — 100% цетана; 2 — $A\%$ цетана (цетановое число); 3 — 100% α -метилнафталина; τ_{iA} — значение периода индукции для исследуемого топлива

267. Свойства воспламеняемости топлива могут быть улучшены с помощью присадок (ускорителей воспламенения), в качестве которых используются некоторые органические перекиси и нитросоединения. Они не получили еще коммерческого применения, хотя было проведено много исследований. Действие присадок можно наиболее просто охарактеризовать, если рассматривать их как источники активного кислорода (абзац 28).

Используя эту концепцию, Хинц нашел зависимость между действием этих добавок и периодом индукции базового топлива [28].

Уравнение Н. Н.Семенова $w = A(e^{\Phi\tau} - 1)$ для реакций, заканчивающихся появлением пламени, может быть

упрощено следующим образом: $w = Ae^{\Phi\tau}$. Число активных частиц K может быть определено путем интегрирования:

$$K = \int_0^{\tau} w d\tau = \frac{A}{\Phi} (e^{\Phi\tau} - 1),$$

где τ — время, отсчитываемое от начала реакции;

ω — скорость реакции;

Φ — константа скорости цепной реакции;

A — постоянный коэффициент.

Примем, что добавление ускорителей воспламенения означает добавление определенного количества активных частиц, которое пропорционально количеству присадки (эти присадки разлагаются намного легче, чем само топливо). Тогда, если период индукции уменьшился на $\Delta\tau$, то

$$\kappa\rho = \frac{A}{\Phi} (e^{\Phi\Delta\tau} - 1),$$

где ρ — процентное содержание присадки;
 κ — ее действенность или «сила».

Отсюда

$$\Delta\tau = \frac{1}{\Phi} \ln \left(1 + \frac{\Phi\kappa}{A} \rho \right)$$

Для топлива без присадки

$$\tau = \frac{1}{\Phi} \ln \frac{\omega}{A};$$

с присадкой

$$\tau_1 = \frac{1}{\Phi} \ln \frac{\omega}{A + \kappa\Phi\rho}.$$

Отсюда следует

$$\frac{\partial\tau}{\partial\rho} = - \frac{1}{\kappa\Phi^2(A + \kappa\Phi\rho)},$$

что дает гиперболическую зависимость между $\frac{\partial\tau}{\partial\rho}$ и ρ .

268. Тот факт, что ускорители воспламенения не нашли еще коммерческого применения, объясняется в основном избытком на рынке легких дизельных топлив с достаточно высоким цетановым числом (около 60) и возможностью с их помощью решить возникающие проблемы.

Как было показано в абзаце 261, для пуска двигателя в исключительно холодную погоду увеличение испаряемости топлива часто является более важным, чем увеличение химической активности. К тому же использование присадок повлияло бы на одно из наиболее важных положительных свойств дизельного топлива — его дешевизну.

269. Большое и в то же время сложное влияние оказывает на период индукции турбулентность. Выше говорилось (абзац 42), что в случае одновременного взрыва гомогенной смеси движение заряда само по себе не может отразиться на скорости реакции. Однако имеется много факторов, от которых зависит влияние движения заряда на период индукции.

Рассмотрим зависимость периода индукции от влияния турбулентности на:

1. Теплообмен со стенками. Это влияние благоприятно для периода индукции в случае, если в период сжатия стенки горячее, чем воздух, и неблагоприятно, если они холоднее, вне зависимости от того, имеет ли движение заряда направленный или хаотичный характер. При пуске двигателя лучше иметь меньшую интенсивность движения заряда и отчетливо выраженное горячее ядро воздуха, причем топливо должно направляться именно в это горячее ядро.

2. Распиливание и испарение. Эти процессы будут развиваться благоприятнее в случае интенсивного движения заряда. Если заряд движется направленно, то влияние движения заряда будет зависеть от его направления по отношению к направлению движения топливной струи; движение заряда против или поперек струи должно оказывать более благоприятный эффект, чем движение вдоль струи. Относительная скорость движения топлива и воздуха в основном определяется свойствами самой струи.

3. Распределение образовавшегося пара. В данном случае влияние движения заряда может оказаться неблагоприятным, если, например, движение воздуха в состоянии помешать образованию или сохранению с течение периода индукции оптимальной концентрации пара в смеси (абзацы 42 и 271). Величина оптимальной концентрации в точности не известна. Из опытов с самовоспламенением в бензиновых двигателях, где сжимались смеси различного состава и определялась наименьшая степень сжатия, при которой происходило воспламенение, выясни-

лось, что для многих углеводородов оптимальное значение коэффициента KC больше единицы. Это объясняет многие наблюдаемые явления, так как в период сгорания в дизеле вначале имеют место аналогичные, высокие локальные значения коэффициента KC (в частности, в период впрыска), впоследствии же коэффициент KC уменьшается, и процесс завершается при избытке воздуха.

4. Охлаждение появившихся очагов с высокой температурой (абзац 271). С точки зрения данного фактора влияние движения заряда неблагоприятно. Влияние этого

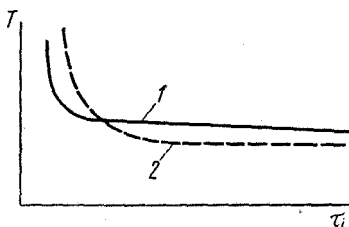


Рис. 105. Влияние турбулизации заряда на продолжительность периода индукции при различных температурах:

1 — с турбулизацией; 2 — без турбулизации

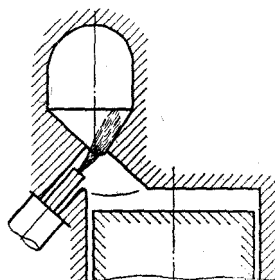


Рис. 106. Схема акрокамеры

фактора едва ли можно отделить от влияния фактора, приведенного в п. 3, потому что пока нет достаточных данных о локальных условиях, т. е. невозможно судить о процессах, происходящих в отдельных местах камеры. В опытах на бомбе [29] Нейманном было найдено, что движение заряда уменьшает период индукции при высоких температурах, но может увеличить его при низких температурах (рис. 105). Другие исследователи при соответствующих условиях наблюдали сходные зависимости. 270. Практически, однако, всегда было трудно правильно представить картину влияния движения заряда на период индукции из-за противоположно действующих факторов. Можно только сказать, что в некоторых двигателях, где имеют место высокие скорости заряда (100 м/сек и более), например, в старых компрессорных двигателях и в двигателях с акрокамерами (рис. 106), имевших большое распространение в начале тридцатых

годов, период индукции оказывался очень длинным, и в результате на малых нагрузках воспламенение было затруднено, а в некоторых случаях даже наблюдались пропуски вспышек. Можно предположить, что при этом наибольшее влияние оказывали факторы, приведенные в пп. 3 и 4. В случае однородного смешения при этом могли создаться условия, при которых в течение периода индукции, т. е. до взрыва, в результате идущих реакций выделялось уже заметное количество тепла. Невозможность сокращения периода индукции побудила одного

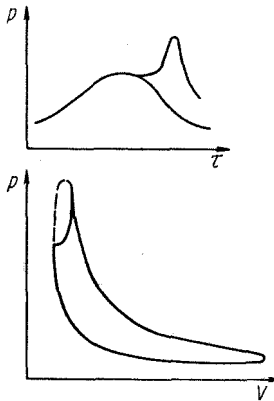


Рис. 107. Иллюстрация чрезмерно продолжительного периода индукции, наблюдаемого в дизеле с акрокамерой, вследствие высокой турбулентности

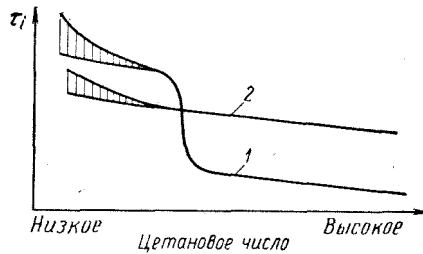


Рис. 108. Зависимость длительности периода индукции от цетанового числа в компрессорном двигателе с воспламенением от сжатия при двух значениях давления распиливающего воздуха:

1 — высоким; 2 — низким

из изготовителей двигателей с акрокамерами отставать диаграмму $p-V$ типа, показанной на рис. 107. Неблагоприятный ее характер по сравнению с диаграммой цикла Сабатэ, полученной в тех же пределах изменения параметров, очевиден.

271. Наглядный пример влияния тех же факторов на период индукции имел место в компрессорных дизелях. Когда в таком двигателе определялся период индукции для различных топливных смесей (см. абзац 266 и рис. 104), то не всегда получалась плавная кривая зависимости; при определенном соотношении компонентов наблюдался скачок (рис. 108, кривая 1). Если давление воздуха, используемого для распыла топлива, низкое, то у топлив с высоким цетановым числом значение τ , оказывалось выше, чем при большем давлении воздуха; скачок в τ

наблюдался либо при более низком цетановом числе, либо отсутствовал (рис. 108, кривая 2). Нетрудно представить себе, что при таком способе распыливания, когда топливо впрыскивается в мелко раздробленном виде с помощью сильного потока воздуха, который продолжает втекать в цилиндр, и после того, как топливо уже полностью впрыснуто, любая локальная концентрация

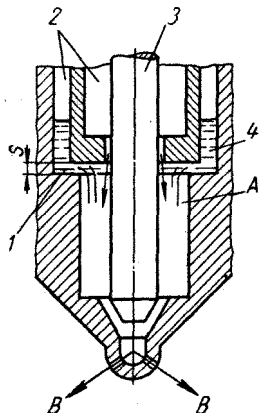


Рис. 109. Схема типичной форсунки для компрессорного распыла:

А — эжекционное действие; В — топливный туман; 1 — щель; 2 — распыливающий воздух; 3 — механически управляемый клапан; 4 — топливо

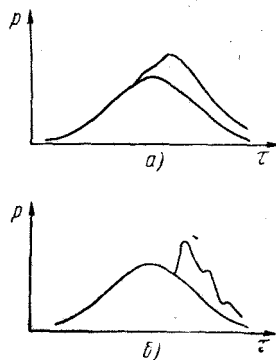


Рис. 110. Влияние величины s щели (рис 109) на развернутые индикаторные диаграммы для топлива повышенной вязкости:

а—скорректированная величина s щели I; б—чрезмерно малая величина s щели I

смеси с коэффициентом KC , равным или превышающим оптимальное значение, может существовать лишь в течение очень короткого периода, особенно если нагрузка мала (абзац 269).

272. Конструкция распылителя двигателя с компрессорным распылом ясна из рис. 109. Внутри этого простого распылителя топливо подается в поток воздуха с помощью искусственно созданного перепада давления. Величина s щели I определяет скорость, с которой топливо поступает в основной поток воздуха. Было замечено, что при увеличении вязкости топлива могло происходить резкое увеличение периода индукции τ_i , аналогичное показанному на рис. 108. Увеличением при вязком топливе высоты

щели l таким образом, чтобы s^3 увеличилось пропорционально увеличению вязкости (течение топлива через щель ламинарное), удалось Достичь резкого улучшения процесса (рис. 110). Это свидетельствует о том, что концентрация топлива во впрыскиваемой струе должна иметь определенное критическое значение — явление, аналогичное явлению, упомянутому в абзаце 269. Таким образом, компрессорный распыл, обеспечивающий быстрое и особо тонкое смещение, может из-за этой особенности создавать трудности для воспламенения топлива.

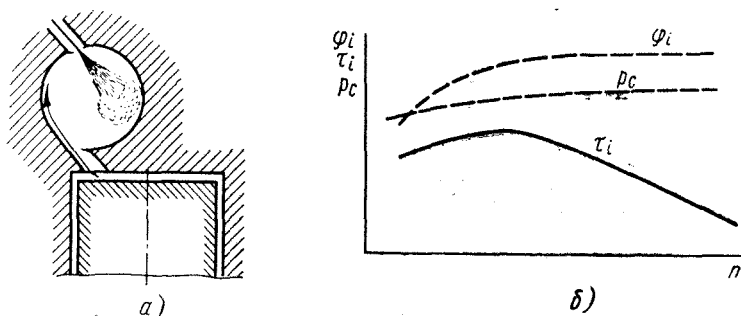


Рис. 111. Камера сгорания «Комета»:

a — схема камеры первоначального варианта; b — кривые давления в конце сжатия в вихревой камере и периода индукции

273. Из приведенного выше ясно, что следует соблюдать большую осторожность при использовании турбулизации. В случае, когда имеет место прямое соприкосновение воздуха или топлива с очень горячими стенками, например, в предкамерных двигателях с теплоизолированными вставками-воспламенителями, благоприятное воздействие турбулентности достигается за счет факторов, описанных в пп. 1 и 2 (абзац 269). Было установлено, что в двигателе Рикардо с камерой типа «Комета» (рис. 111, a), которая совершила переворот в дизелестроении в период с 1930 по 1940 г., начиная с некоторого скоростного режима, период индукции в единицах времени уменьшается с ростом числа оборотов — его длительность в градусах поворота коленчатого вала остается неизменной. При этом на диаграммах давления, снятых в сферической вихревой камере, обнаружили увеличение давления с ростом числа оборотов (рис. 111, b); давление

в цилиндре также росло с повышением числа оборотов в результате увеличения дросселирования при перетекании заряда в вихревую камеру. В таких двигателях используется эффект аккумуляирования тепла в стенках теплоизолированной вставки в течение процессов горения и расширения с последующей отдачей этого тепла заряду в процессе сжатия. Подобная регенерация тепла сама по себе уменьшает к. п. д., но этот отрицательный эффект может быть нейтрализован улучшением эффективности горения за счет неизменности периода индукции, выраженного в градусах поворота коленчатого вала двигателя.

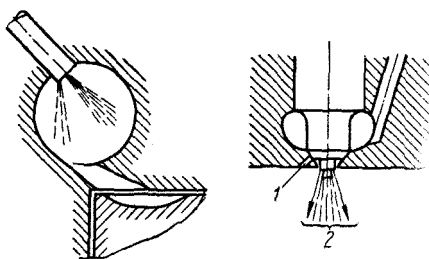


Рис. 112. Распылитель типа Пинтакс со вспомогательным пусковым распыливающим отверстием:

1 — вспомогательная струя;
2 — основная струя

Скорости воздуха в камере «Комета» меньше, чем это имело место в акрокамере, и топливо в данном случае не впрыскивается в зону заряда с наибольшей скоростью, а концентрируется вблизи горячей стенки выше горловины вихревой камеры.

274. В холодном двигателе теплоизолированная вставка не может оказывать положительного воздействия, напротив, в нее интенсивно отводится тепло. Поэтому двигатели, подобные описанному, имеют плохие пусковые качества. Улучшение пусковых качеств было достигнуто использованием в распылителе маленького дополнительного отверстия с осью, направленной к горловине камеры, через которую в вихревую камеру при пуске поступает наиболее нагретый воздух (рис. 112). При использовании этого принципа в штифтовом распылителе, в котором проходное сечение увеличивается с увеличением числа оборотов и нагрузки, оказывается, что доля топлива, впрыскиваемого через дополнительное отверстие, очень велика при пуске (около 90%) и очень мала (около 10%) при нормальных условиях работы.

II. ПЕРИОД (ФАЗА) ВЗРЫВНОГО СГОРАНИЯ

275. Что касается периода индукции, то важна не его абсолютная продолжительность в единицах времени, а скорее его продолжительность по отношению к продолжительности впрыска на полной нагрузке, потому что именно это соотношение оказывает существенное воздействие на всю форму индикаторной диаграммы и регулировку двигателя. При определенных условиях из-за очень быстрого развития взрыва практически вся энергия топлива, впрыснутого за период индукции, выделяется

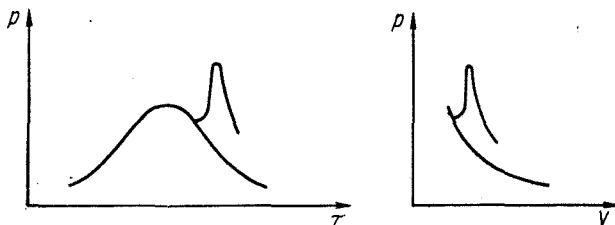


Рис. 113. Индикаторная диаграмма предкамерного двигателя с воспламенением от сжатия при позднем начале впрыска

при постоянном объеме и, как следствие, максимальное давление сгорания в большой мере определяется отношением периода индукции к продолжительности впрыска θ .

276. Максимальное давление сгорания можно снизить также, используя диаграмму давлений специфической формы, встречающуюся, например, в предкамерных двигателях (рис. 113). При такой диаграмме обеспечиваются меньшие тепловые потери и меньший стук дизеля. Получается такая диаграмма при относительно позднем начале впрыска.

277. Помимо количества топлива, сгорающего взрывным путем, на возникновение стука с его динамическим воздействием оказывает большое влияние собственно скорость сгорания. Очевидно, что мы имеем здесь дело не с чисто тепловым взрывом, а с промежуточной формой процесса (см. абзац 78 и последующие), при которой в дополнение к одновременному и постепенному взрывам имеет место и диффузионное горение, так как по меньшей мере часть топлива все еще не испарилась и не смешалась с воздухом в период распространения горения по объему камеры. При увеличивающемся отношении θ и прочих

6*

неизменных условиях (например, если при той же нагрузке испытывается серия топлив с уменьшающимся цетановым числом) степень и интенсивность взрывного сгорания увеличиваются (рис. 114), так как процесс все более и более приближается к чисто взрывному сгоранию. Это очень хорошо видно на регистрациях, выполненных НАСА, аналогичных регистрациям, показанным

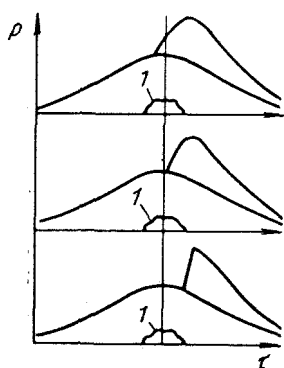


Рис. 114. Индикаторные диаграммы быстрого двигателя с воспламенением от сжатия при работе на топливах с различным цетановым числом:

1 — подъем иглы

с жесткой работой двигателя, чем идти на уменьшение подачи топлива за период индукции. С точки зрения прочности это в некоторых случаях оказывается допустимым. Нагрузка на детали двигателя, помимо наличия или отсутствия критических вибраций, зависит также от диаграммы давлений цикла в целом. Когда горение заканчивается главным образом в течение фазы II, как это нередко имеет место при частичных нагрузках, эффект динамического приложения усилий может быть очень большим (рис. 116, а). Если за фазой II следует ярко выраженная фаза III, в течение которой наблюдается повышение давления, то динамическая нагрузка может быть и не выше статической (рис. 116, б), как это часто имеет место во многих тихоходных двигателях. При увеличивающейся нагрузке стук, следовательно,

на рис. 96, но полученных при большем отношении θ (рис. 115).

278. Рикардо [16] назвал фазу II фазой неконтролируемого сгорания, и, действительно, приходится признать, что в начальной стадии развития быстроходных двигателей в период между 1930 и 1940 гг. едва ли мог стоять вопрос о контроле над повышением давления в течение фазы II. Делались попытки уменьшить период задержки за счет конструктивных

изменений и ввода в спецификацию топлива ограничения по минимальному цетановому числу. Но своевременное и полное завершение горения в фазах III, а и III, б требовало столь большого внимания, что конструкторы скорее были склонны согласиться

может усиливаться при увеличении количества подаваемого топлива до определенного значения и затем уменьшаться вследствие сокращения τ_i и все большего затупле-

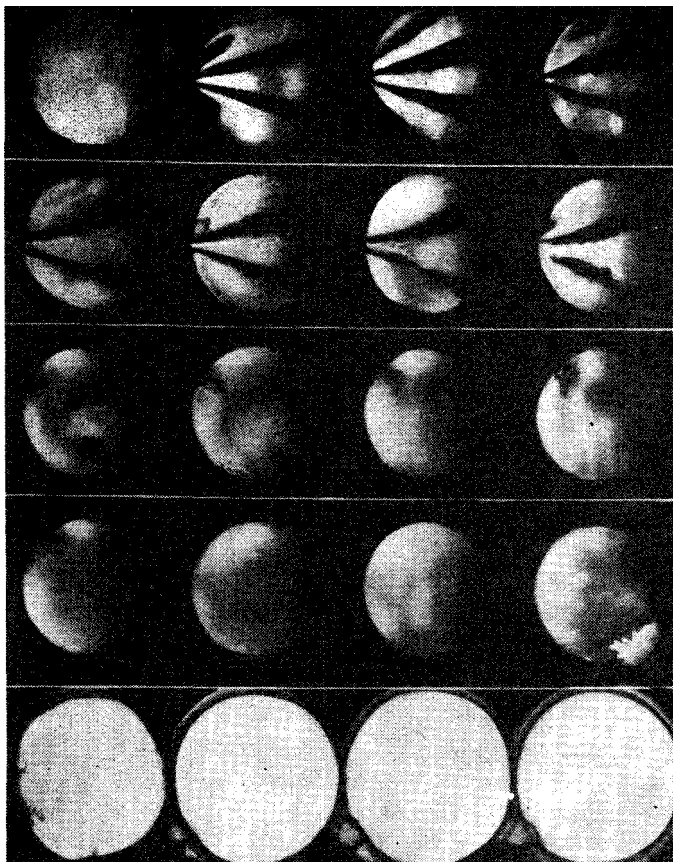


Рис. 115. Иллюстрация быстрого распространения пламени после практически полного испарения в случае относительно длительного периода задержки воспламенения

ния угла β (см. рис. 116, а), с помощью которого наиболее просто оценивается описанный выше эффект.

279. Теперь можно перечислить факторы, которыми определяется скорость сгорания в фазе II, а именно: степень смешения, состав смеси и интенсивность движения

заряда. С помощью этих факторов представляется возможным в значительной степени контролировать повышение давления при сгорании. В последующей стадии развития дизелей было достигнуто значительное смягчение работы дизелей именно таким образом. Влияние большего или меньшего совершенства смешения уже рассматривалось в абзаце 277 в связи с серией диаграмм, полученных при различных значениях θ . Из них следует, что по мере увеличения Θ , и как следствие, усиления

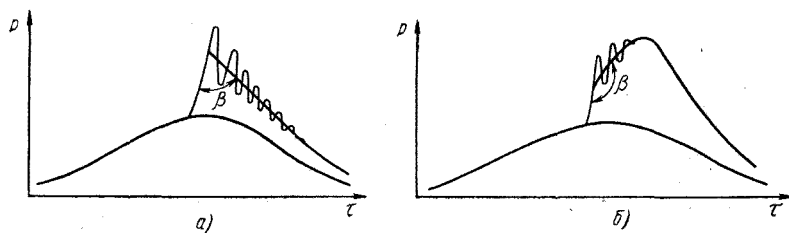


Рис. 116. Иллюстрация эффекта динамического приложения нагрузки при сгорании, уменьшающего усталостную прочность подвижных деталей двигателя:

a — сильно; *б* — менее сильно

взрывного характера процесса становится все более сложным найти компромисс между желательностью плохого смешения для подавления стука и желательностью хорошего смешения для достижения полного горения.

280. Можно использовать четыре метода для достижения требуемого компромисса:

а) **Изменение процесса впрыска таким образом, чтобы в течение периода индукции только небольшая порция топлива впрыскивалась в цилиндры.** Это может быть в принципе достигнуто применением системы впрыска особой конструкции (см. рис. 103 и 117). Однако создание конструкции, обеспечивающей положительный эффект при всех скоростных режимах, затруднено (рис. 118). Для реализации этого метода применялась даже специальная дополнительная система впрыска (так называемый вспомогательный впрыск). В дальнейшем этот метод уступил место другим. К тому же вся проблема стала менее острой в связи со стабилизацией цетанового числа рыночных топлив.

281. б) **Использование начавшегося горения для улучшения смешения.** На этом принципе основана работа всех предкамерных двигателей, начиная с двигателя Бронс, созданного в 1907 г. Этот принцип позволяет при некоторых обстоятельствах в той или иной мере контролировать интенсивность взрыва даже в тех случаях, когда все топливо впрыскивается уже в самом начале сжатия, как это имело место в двигателе Бронс. В современных предкамерных

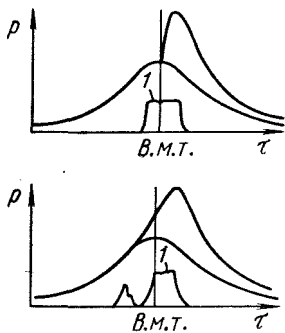


Рис. 117. Влияние вспомогательного впрыска на индикаторную диаграмму:

1 — подъем иглы

дизелях вследствие сокращения периода индукции (за счет горячих вставок) может быть получена исключительно плавная диаграмма давления. Основным принцип здесь заключается в том, что топливо вводится крайне неравномерно распределенным в малое пространство, отделенное от основной камеры сгорания, причем таким образом, что после воспламенения в этом пространстве смесь топливных паров, газов и продуктов окисления очень богатой смеси выбрасывается с большой скоростью в основную камеру сгорания. На рис. 119 показана конструкция некоторых камер сгорания предкамерных дизелей.

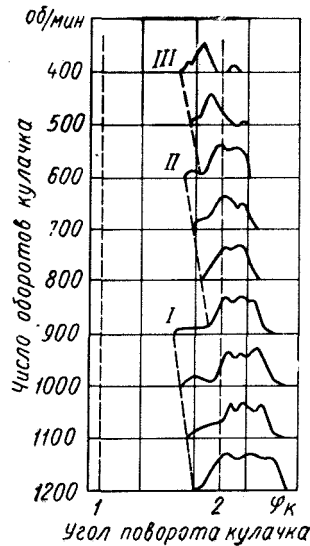


Рис. 118. Влияние наличия длинного нагнетательного топливопровода на изменение действительных фаз впрыска от числа оборотов насоса:

/ — первая волна; // — вторая волна; /// — третья волна; 1 — геометрическое начало подачи; 2 — геометрический конец подачи

282. В дополнение к указанному эффекту уменьшение стука может быть частично достигнуто также соединением предкамеры с основной камерой столь узким каналом, что повышение давления в основной камере будет происходить медленнее, чем в предкамере (рис. 120).

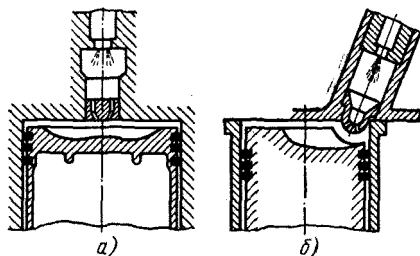


Рис. 119. Типы предкамер:

a — предкамера, расположенная по оси цилиндра; *б* — предкамера с наклонной осью, расположенная на периферии цилиндра

Однако не следует думать, что в предкамерном дизеле стук исключен; перетекание заряда из предкамеры в основную камеру может приводить к такому быстрому горению в последней, что и здесь будет иметь место стук. Поэтому имеет также большое значение правильный подбор размеров каналов, соединяющих обе части камеры сгорания. Слишком ранний впрыск в предкамерном дизеле не является рациональным, так как в этом случае топливная струя сталкивается с сильным потоком воздуха, втекающего в предкамеру, вследствие чего происходит резко взрывное сгорание.

283. С акустической точки зрения предкамерные двигатели имеют особенно неблагоприятную форму камеры сгорания; в колебательной системе, состоящей из двух полостей (с объемами V_1 и V_2), соединенных каналом (рис.

121), могут возникать весьма сильные колебания давления, сопровождающиеся резкими акустическими эффектами, слышимыми на расстоянии 100 м и более.

284. Поздний впрыск неблагоприятен с точки зрения своевременного окончания горения и достижения высокого к. п. д. Нередко вынужденно применяют высокую

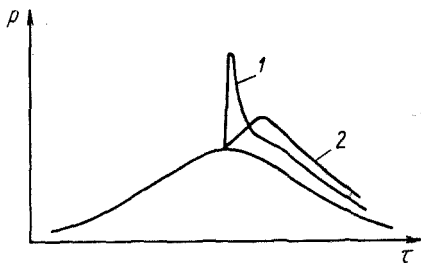


Рис. 120. Индикаторные диаграммы в координатах ρ — τ , определенные в предкамере и главной камере сгорания:

1 — в предкамере; 2 — в основной камере

степень сжатия (20 : 1 и даже выше), что помогает улучшить пуск в холодное время года, затрудненный в связи с большой поверхностью теплообмена. Тем не менее для пуска в холодное время обычно применяют свечи накалвания или другие средства облегчения пуска.

285. в) **Осуществление смешения с использованием движения поршня так, что топливо, впрыснутое ранее, постепенно смешивается с воздухом после полного испарения.** По такому принципу работали многие старые калоризаторные двигатели или полудизели. Идея заклю-

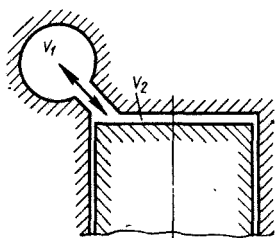


Рис. 121. Схема акустической колебательной системы двигателя с разделенной камерой сгорания

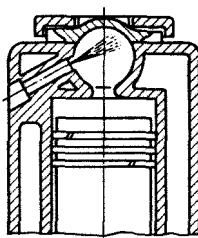


Рис. 122. Схема калоризаторного двигателя с иллюстрацией раннего впрыска топлива (в период, когда поршень движется вверх)

чается в том, что весь воздух или большая его часть вытесняется при сжатии в специальную камеру сгорания через сравнительно узкую горловину (рис. 122). Топливо перед этим уже впрыснуто в эту камеру и испарилось за счет подачи его на горячую стенку. Из-за малого объема камеры смесь в ней первоначально очень богата и поэтому не может воспламениться до поступления в эту камеру достаточного количества воздуха в процессе сжатия. Здесь очень важным оказывается размер горловины. Этот процесс так и не удалось усовершенствовать до такой степени, чтобы он оказался удовлетворительным во всех отношениях.

286. г) **Использование мероприятий, благодаря которым независимо от момента начала впрыска часть топлива, подаваемая последней, оказывается в высокой степени сконцентрированной, и поэтому ускорение испарения топлива вследствие начавшегося горения не приводит немедленно к полному смешению.** Обычно высокая концен-

трация топлива имеет место у стенки. Часть топлива может в этом случае осаждаться на стенке и в дальнейшем постепенно испаряться вследствие достаточно высокой температуры стенки, а также за счет тепла, получаемого от горящих газов. Это может в большой степени способствовать получению желаемого эффекта смягчения процесса (среди прочих двигатель МАН с М-процессом,

сконструированный Мойре-ром, рис. 123).

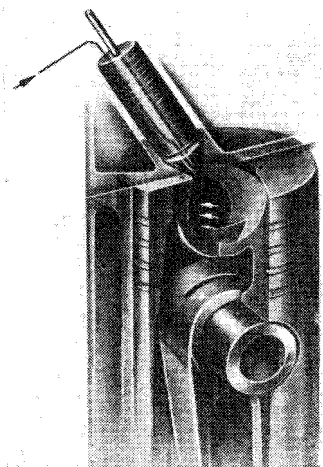


Рис. 123. Схема М-процесса, осуществляемого в дизелях МАН

Вследствие описанного характера процесса на диаграммах давления всегда имеется постепенный переход к фазе III даже в том случае, если в фазе II происходит значительное и резкое нарастание давления.

При таком процессе используется одноструйный распылитель, и, следовательно, для достижения полного и своевременного смешения необходимо обеспечить достаточно интенсивное движение заряда. Этот метод применяли во многих двигателях, имеющих вихревую ка-

меру и предкамеру, и даже в некоторых двигателях непосредственного впрыска¹ [двигатель Рикардо с гильзовым распределением (рис. 124, а), двигатель Лейланд (рис. 124, б)]. Двигатель Лейланд, в частности, имеет очень мягкий процесс сгорания (рис. 125). Характеристики двигателей последнего типа, однако, оказались не вполне удовлетворительными, особенно у моделей малых размеров вследствие чересчур низкой энергии смесеобразования. В случае моделей больших размеров это обстоятельство не имеет особого значения, так как для избежания тепловой перегрузки в них используется значительный избыток воздуха. К тому же дизели больших

¹ Под «непосредственным» здесь подразумевается впрыск в камеру сгорания, которая прямо соединена с цилиндром наибольшим сечением и, следовательно, не имеет соединительной горловины.

размеров обычно работают на малых числах оборотов, при которых проблема смесеобразования не стоит очень остро.

287. Уместно сравнить метод, изложенный в пункте «г», со случаем, когда осуществляется тонкий распыл топлива во вращающийся воздух, и смешение каждой порции впрыскиваемого топлива завершается очень быстро (двигатель Юнкерс, рис. 126). Это сравнение, приведенное схематически на рис. 127, дает наглядное представление о различных путях осуществления процесса в дизеле.

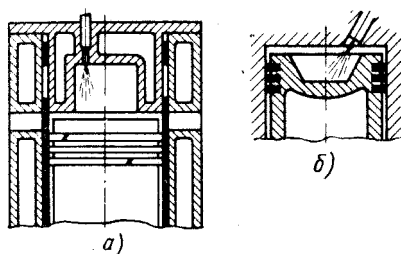


Рис. 124. Схема двигателей с эксцентричным расположением форсунки и вихревым движением заряда:

а — двигателя Рикардо с гильзовым распределением; б — двигателя Лейланд

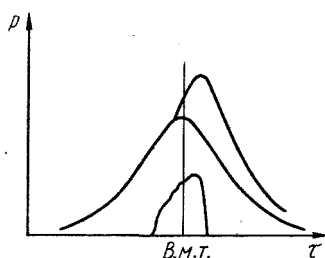


Рис. 125. Индикаторная диаграмма дизеля с камерой типа Лейланд

При использовании метода, приведенного в пункте «г», после периода индукции также имеет место значительное ускорение испарения со стенки, и в целом горение не занимает более длительного интервала времени, чем при впрыске в объем камеры.

288. Состав смеси только в редких случаях является доминирующим фактором, так как обычно воспламенение начинается в момент, когда впрыск находится в Стадии полного развития и, как следствие, имеется более или менее богатая топливом зона ядра факела или факелов. Только на малой нагрузке, когда отношение θ большое и когда среднее по камере значение коэффициента KC очень мало, можно нередко наблюдать тенденции к уменьшению скорости нарастания давления, вследствие чего работа дизеля становится весьма бесшумной (при этом, однако, нередко имеют место неполное сгорание, образование альдегидов и другие аналогичные эффекты). Это

явление было описано подробно со ссылками на индикаторные диаграммы, определенные с помощью сравнительно инерционного поршневого индикатора [30]. Вследствие искажения индикаторных диаграмм, являющегося следствием динамического эффекта процесса, иногда получается более типичная регистрация горения со стуком, чем по точным индикаторным диаграммам. Интенсивность имею-

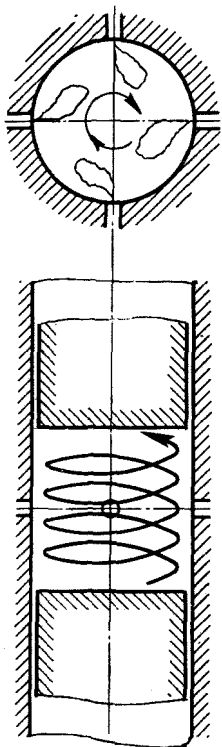


Рис. 126. Схема двухтактного дизеля с противоположно движущимися поршнями

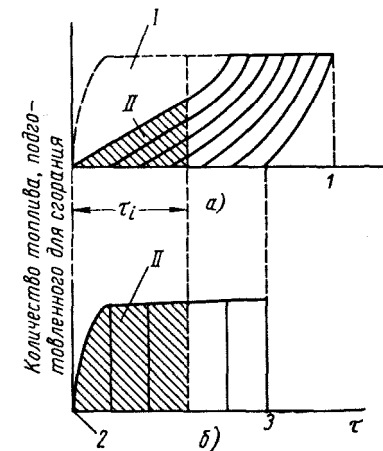


Рис. 127. Схематическая иллюстрация метода смягчения начала процесса сгорания направлением топлива на стенку камеры горения:

a — схема первоначального медленного смешения, ускоряемого после воспламенения; *б* — схема быстрого и полного смешения при отсутствии топлива на стенке; / — топливо, осажденное на стенке камеры сгорания; // — топливо, подготовленное для взрывного сгорания со стуком; 1 — конец испарения со стенки; 2 — начало впрыска; 3 — конец впрыска

щих место вибраций может непосредственно наблюдаться по колебанию давления на диаграммах, а измеренная скорость нарастания давления может служить мерой интенсивности стука. На рис. 128 показано, как эта скорость нарастания давления ($\operatorname{tg} \alpha$) изменяется с увеличением θ , которое достигалось дросселированием подавае-

мого воздуха. Видно, как $\operatorname{tg} \alpha$ после достижения максимального значения вновь уменьшается с увеличением θ .

289. Характер влияния состава смеси на скорость сгорания можно очень отчетливо наблюдать при компрессорном распыле, при котором распределение топлива по всему пространству камеры сгорания происходит очень быстро (абзац 271). В этом случае диаграммы, снятые при работе двигателя с небольшими нагрузками, при большом θ всегда показывают «мягкую» работу (рис. 129, а, кривая 3), в отличие от диаграмм, полученных на том же двигателе при непосредственном механическом впрыске.

290. Но и при непосредственном механическом впрыске может иметь место смягчение процесса сгорания при работе с небольшими нагрузками в результате влияния состава смеси на скорость сгорания, что особенно благоприятно для автомобильных дизелей, так как в противном случае они работали бы очень шумно при многочисленных кратковременных остановках. Наибольшие трудности здесь возникают при таких способах организации процесса горения, при которых период индукции τ_i значительно уменьшается с ростом числа оборотов из-за действия тепловых аккумуляторов. В двигателях этого типа сгорание при работе под нагрузкой проходит часто очень мягко вследствие короткого τ_i и эффектов, описанных в абзаце 281 и последующих, но при работе двигателя на холостом ходу нередко наблюдается стук.

Иногда это связано с тем, что с целью достижения наибольшей простоты топливоподающую аппаратуру не снабжают автоматами опережения впрыска. Поэтому впрыск, в частности на холостом ходу, происходит слишком рано,

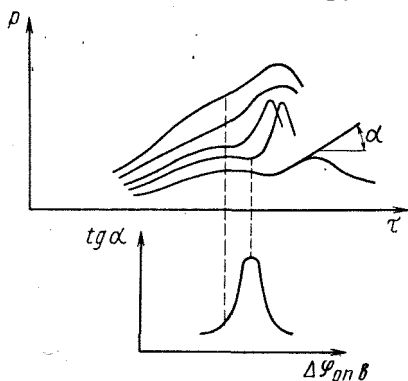


Рис. 128. Характер изменения скорости нарастания давления в зависимости от продолжительности периода индукции, изменяемой дросселированием воздуха на впуске

что в значительной мере способствует работе со стуком, особенно в предкамерных двигателях.

Современные конструкции, включающие автоматы опережения впрыска, обеспечивают заметное улучшение работы двигателя на режимах малых нагрузок и холостого хода.

291. Из сказанного очевидно, что явление стука отнюдь не является простой функцией свойств топлива и периода

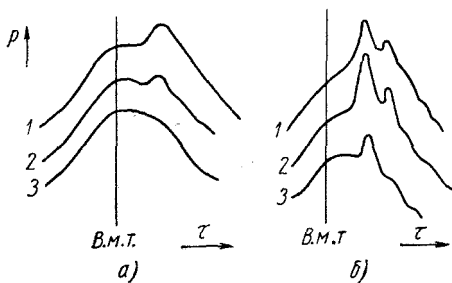


Рис. 129. Влияние нагрузки на индикаторную диаграмму:

a — при компрессорном распыле; *б* — при впрыске с механическим управлением;
 1 — $\frac{1}{2}$ полной нагрузки;
 2 — $\frac{1}{4}$ полной нагрузки;
 3 — холостой ход

индукции τ_i . Оно контролируется в значительной степени также различными конструктивными особенностями камер сгорания, и в ряде случаев может даже иметь место зависимость, обратная обычной. В большинстве случаев применение топлива с более низким цетановым числом вызывает более жесткую работу двигателя (из-за длинного τ_i) по сравнению с использованием топлива с более высоким цетановым числом, но топливо с низким цетановым числом причиняет меньше неприятностей при наиболее критических условиях работы двигателя на холостом ходу.

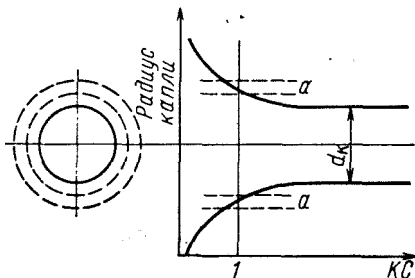
III. ПЕРИОД ДИФфуЗИОННОГО ГОРЕНИЯ

292. Выше было выяснено, что фаза II не является фазой чисто взрывного сгорания; в такой же мере можно утверждать, что в фазе III имеются элементы взрывного характера, особенно в тех случаях, когда скорость реакции недостаточно велика по сравнению со скоростью смешения, что предполагалось при определении понятия «диффузионное горение» (абзац 15). Как следствие, имеют место зоны, в которых, несмотря на закончившееся смешение, реакции еще продолжают. При этом можно ожидать большей задержки завершения горения, чем та,

которая связана только собственно с процессом смешения. В этом отношении необходимо всегда помнить, что усредненное по камере значение коэффициента $KС$ в дизеле мало, а локальные значения его могут быть еще меньше, вплоть до нуля. Если представить себе, что в какой-то момент образуются зоны с богатым содержанием паров топлива (в действительности такие зоны содержат пары от нескольких соседних капель), то зависимость коэффициента $KС$ от расстояния до капли будет выглядеть, как показано на рис. 130, и зона с наиболее благоприятным

Рис. 130. Изменение состава смеси у капли с иллюстрацией условной зоны концентрации топлива в заряде, оптимальной для воспламенения:

d — диаметр капли



для высокой скорости сгорания составом смеси может быть схематически представлена как зона $a—a$. Ясно, что если только в этой зоне скорость сгорания может следовать за скоростью смешения, то в окружающем каплю пространстве, где смесь всегда будет беднее, создаются условия, описанные в начале абзаца, вызывающие недостаточную скорость реакции. Это вряд ли возможно в ядре факела, где смесь переобогащена¹ но очевидно такие условия будут возникать в оболочке струй, а также в частях струй, находящихся в непосредственной близости с охлаждаемыми стенками камеры, особенно на малых нагрузках. В целом даже само разграничение между фазами II и III может оказаться недостаточно четким, как это следует из диаграмм, показанных на рис. 129.

293. По большей части, однако, именно диффузионный процесс является главным в фазе III, и проблема скорости развития процесса в первую очередь является проблемой смешения и, следовательно, имеет в основном физическую сущность. Здесь химические свойства топлива уже больше

¹ С этим трудно согласиться, так как в зонах излишнего переобогащения скорости реакции также малы и, кроме того, создаются условия, благоприятные для образования сажевых частиц. *Прим. ред.*

не оказывают влияния, а влияют его физические свойства, такие как вязкость, удельный вес, испаряемость. Однако имеется важный и независимый фактор, а именно момент, когда начинается горение, а соответственно значения τ_i и θ , которые оказывают большое влияние на развитие процесса смешения [31]. В этом смысле химическая природа топлива все же оказывает влияние на завершение сгорания, но это влияние определяется тем, что уже имело место до начала действительно диффузионного горения. В отношении воспламенения необходимо различать два случая: первый относится к впрыску топлива в сжатый воздух, второй — к впрыску его в пламя, причем температура последнего приблизительно на 1500°C выше первого. Это сильно изменяет скорость испарения и, следовательно, существенно влияет на проникновение и распределение струй (абзацы 298 и 253).

294. Если качество смешения является решающим для развития диффузионного горения, то можно любое отклонение процесса горения от желаемого объяснить недостаточным смешением. Недостатки смесеобразования, практически имеющие место в любом двигателе, особенно серьезно отражаются на к. п. д. цикла в тех случаях, когда:

- а) подается большее количество топлива;
- б) время, отводимое для смешения, мало.

Следует помнить, что в связи с тем, что сгорание сочетается с движением поршня, необходимым для осуществления термодинамического цикла, слишком большая длительность реакций (большое время догорания) снижает к. п. д.

295. Важно знать, в чем заключаются недостатки процесса смешения, потому что в зависимости от характера этого несовершенства сгорание может не только затягиваться, но также оказываться неполным. Имеет также большое практическое значение, какие именно продукты неполного сгорания образуются, так как они могут способствовать загрязнению и износу двигателя, а также загрязнению и приданию неприятного запаха отработавшим газам (см. абзац 114 и последующие). Каждый из видов отклонения от совершенного смешения требует своего метода исправления, и поэтому необходимо знать, что в действительности является основной причиной этого отклонения.

296. Догорание хорошо видно на диаграмме $p-V$, представленной в логарифмических координатах (рис. 131); однако при этом очень важна высокая точность индексирования. Догорание в значительной мере может быть уменьшено за счет более раннего впрыска, но в этом случае при равном к. п. д. давление сгорания оказывается более высоким, чем в случае процесса без догорания (рис. 132). Кроме того, увеличивается тепловая нагрузка на стенки камеры сгорания.

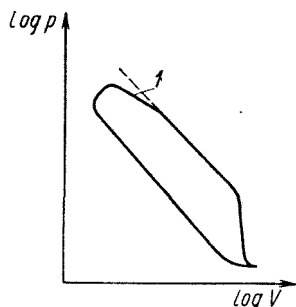


Рис. 131. Иллюстрация процесса догорания по индикаторной диаграмме, представленной в логарифмических координатах: 1 — догорание

297. Схематически некоторый момент развития горения может быть представлен, как это показано на рис. 133, где отмечена гетерогенность состава смеси с характерными источниками догорания [32]. Резюмируя, вкратце можно сказать, что компоненты, все еще находящиеся в жидком виде (особенно необходимо учитывать топливо, осевшее на стенке), не могут сгореть по крайней мере до того мо-

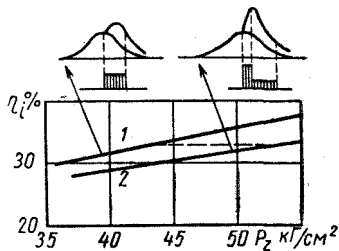


Рис. 132. Зависимости к. п. д. от максимального давления сгорания, изменяемого углом опережения впрыска:

1 — при отсутствии догорания;
2 — при наличии догорания

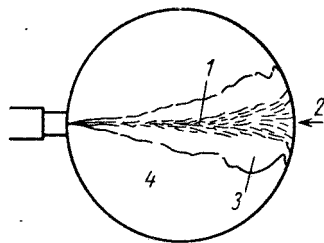


Рис. 133. Схематическая иллюстрация неоднородности заряда в период сгорания в дизеле:

1 — большие капли в ядре струи; 2 — жидкое топливо, осевшее на стенке; 3 — мелкие капли, сгоревшая и горящая гетерогенная топливо-воздушная смесь; 4 — воздух

мента, пока они не испарятся или улетучатся каким-либо образом, например, в результате крекинга, который в основном является окислительным крекингом. При этом

появляется опасность выделения чистого углерода (см. абзацы 123, 124, 386 и последующие).

В тех частях смеси, которые слишком богаты топливом, последнее остается несгоревшим до тех пор, пока на более поздней стадии не произойдет полного смешения. Здесь также имеется опасность сажеобразования (см. абзацы 130, 386 и последующие). В частях смеси, содержащих мало топлива, реакции между топливом и воздухом развиваются слишком медленно. Поэтому имеется опасность образования альдегидов и лакообразования (см. абзацы 121, 122, 386 и последующие).

298. Для того чтобы топливо быстро испарилось, необходимо его очень тонко распылить. Но уже известно, что тонкость распыливания при механическом впрыске оказывает влияние на развитие факела, характеризуемое проникновением топлива вдоль оси и его распределением в пространстве вокруг оси факела, в противоположность тому, что имело место в более ранних конструкциях компрессорных дизелей. Это является следствием того, что при механическом впрыске распыливание происходит в пространстве камеры сгорания в результате воздействия сил сопротивления воздуха на струю¹. При старом же методе впрыска распыливание происходило уже в самой форсунке, и топливный туман следовал за движением применяемого для распыла воздуха в камере сгорания.

В процессе этого движения, когда впрыскиваемый воздух проходил сквозь воздух камеры сгорания, достигались весьма быстрое смешение (см. абзац 271 и последующие) и благоприятные условия для горения. В этих старых компрессорных двигателях, как следствие, оказывалось возможным достижение хорошего удельного индикаторного расхода топлива даже при обычно применявшемся позднем впрыске (в большинстве случаев непосредственно перед в. м. т.) и малом повышении давления (обычно не превышавшего 35 ат при давлении сжатия 30—32 ат). Компрессорные дизели могли без особых затруднений работать на нефтяных остатках, во всяком случае при большой нагрузке, и соответствующей конструкции форсунок (абзац 272).

¹ По современным взглядам в быстроходных дизелях сопротивление среды не оказывает существенного влияния на мелкость распыливания, в особенности на средний диаметр капель. *Прим. пер.*

Как уже отмечалось, совершенное смешение приводило к некоторым трудностям с точки зрения воспламенения (абзац 271), а также к обеднению смеси при работе двигателя на малой нагрузке (абзац 288). Следствием обеднения смеси было повышенное догорание и обильное образование альдегидов и лаков.

299. Поэтому обычно уменьшали давление впрыска на малой нагрузке, однако возможности такого контроля были довольно ограниченными. На рис. 134 показана зависимость от нагрузки количества лаковых отложений, накопленных в одноцилиндровом компрессорном дизеле в течение 8 ч. Из рисунка видно, как сильно влияет нагрузка на количество этих отложений, причем

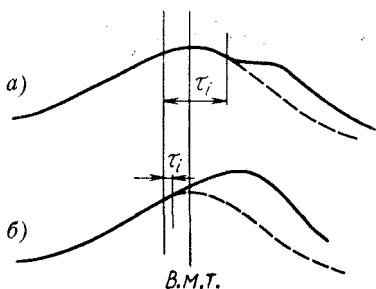


Рис. 135. Индикаторные диаграммы компрессорного дизеля при работе на двух нагрузках

высоких температур [33]. Из диаграмм, показанных на рис. 135, ясно, что повышенное лакообразование и прихваты поршней связаны с влиянием процесса смешения на воспламенение; как только удалось сократить период индукции (абзац 272), лакообразование прекратилось.

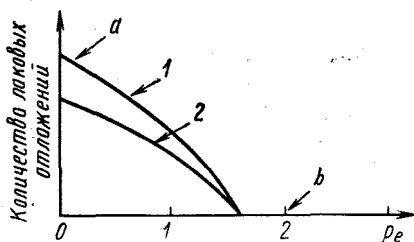


Рис. 134. Зависимость количества лаковых отложений после 8 ч работы двигателя с компрессорным распылом от нагрузки:

a — точка, соответствующая диаграмме, приведенной на рис. 135, *a*; *b* — точка, соответствующая диаграмме, приведенной на рис. 135, *б*; 1 — давление распыливаемого воздуха 60 ат; 2 — давление распыливаемого воздуха 50 ат

примерно при нагрузке, равной $\frac{1}{3}$ полной нагрузки, отложения совсем исчезали. При более высоком давлении впрыска количество отложений оказывалось еще более значительным, что могло приводить к «прихватыванию» поршней и значительным повреждениям двигателя. Это явление наблюдалось долгое время, пока не поняли, что причиной его является не горение смазочного масла из-за слишком

300. Компрессорные дизели более не применяются в основном по следующим двум причинам:

1) сложность их конструкции и неудобство эксплуатации из-за наличия компрессора высокого давления и высокого эффективного расхода топлива вследствие того, что воздушный впрыск хотя и эффективен в смысле обеспечения тонкого распыливания, однако влечет за собой не пропорциональный улучшению процесса перерасход топлива; в самом деле, на привод воздушного компрессора затрачивается около 10% мощности двигателя;

2) относительно высокие потери тепла в воду и высокая теплонапряженность стенок вследствие очень интенсивной турбулентности, вызванной впрыскиваемым воздухом.

301. Когда осуществлялся переход от воздушного впрыска к механическому, то конструкторы стремились к достижению такой же, как в компрессорных двигателях, тонкости распыливания. В результате этих попыток был приобретен опыт, который показал, что подобное стремление к достижению высокой тонкости распыливания при отсутствии достаточной энергии смешения имело результатом недостаточное проникновение струй и, как следствие, неполное смешение и низкое значение среднего давления цикла. Ниже будет показано, что обеспечение при непосредственном впрыске оптимальной пробивной способности струй даже за счет менее тонкого распыливания заметно снижает расход топлива и повышает эффективность цикла. Однако при этом возрастает опасность осаждения топлива на стенках и соответственно повышается чувствительность двигателя к таким свойствам топлива, как вязкость и испаряемость.

302. При механическом впрыске основной проблемой является обеспечение хорошего смешения без затраты большой энергии, которая в случае компрессорного впрыска подводилась от источника, расположенного вне цилиндра двигателя. Это обычно достигается за счет правильного сочетания числа направления движения и формы струй топлива с движением воздуха в камере сгорания (создаваемого в период впуска или сжатия или даже во время горения) и с надлежащим местным или общим тепловым эффектом стенок. Обращается ли при этом особое внимание на подбор струй к форме камеры сгорания или же распределение топлива, впрыскиваемого в виде одной струи, по объему камеры сгорания достигается с помощью соот-

ветствующего движения заряда — зависит от многих факторов, которые необходимо рассмотреть особо. Различия во взглядах конструкторов на эти проблемы неизбежны, но при выборе той или иной системы организации процессов большое значение имеют размерность цилиндра, число оборотов, а также назначение двигателя. Итак, очень важным оказывается вопрос о том, следует ли наибольшее внимание уделять эффективному и равномерному распыливанию или для ускорения испарения нужно использовать горячие стенки. Изучим в дальнейшем свойства топливных струй, движение заряда и эффект стенок, имеющих различную температуру. Это позволит подробнее познакомиться с проблемой смесеобразования и сгорания в дизеле.

ВПРЫСК И РАСПЫЛИВАНИЕ

303. Из всех механизмов распыливания в случае механического впрыска в дизеле используется главным образом именно тот, который обуславливает распад топлива вследствие динамического и вязкостного сопротивления воздуха, имеющего высокую плотность ($15\text{—}25 \text{ кг/м}^3$)*. Обычно распыливающие отверстия представляют собой цилиндрические отверстия, вызывающие в струе сравнительно малые начальные возмущения. Практика показывает, что изменение длин этих отверстий, выбираемых в пределах от двух до трех диаметров, может оказать влияние на характер струи. Большей частью выбирается длина отверстия, равная трем его диаметрам, чтобы получить стабильное истечение по всему сечению. Выходящий из отверстия поток топлива содержит определенные начальные возмущения, вызываемые приведенными ниже причинами (рис. 136):

- а) турбулизацией, вызванной иглой, особенно в случае, когда проходное сечение под ней очень мало;
- б) наклонным положением распыливающих отверстий по отношению к подводющему каналу;

* Автор вновь несколько пренебрегает современными воззрениями, согласно которым в быстроходных двигателях распыливание определяется в основном энергией турбулентных пульсаций топлива, движущегося с большими скоростями в распылителе, и распыл происходит непосредственно на выходе из сопла и даже при впрыске в вакуум.
Прим. пер.

в) входной кромкой, которую даже при тщательной обработке трудно получить чистой (Засс примерно в 1930 г. рекомендовал длительную полировку распиливающих отверстий с помощью масла, содержащего наждачную пудру; на практике используют также обычный процесс полировки, который дает хорошие результаты только применительно к дизелям больших размеров, например судовым дизелям). Начальные возмущения неправильно было бы считать нежелательными, если только удастся контролировать

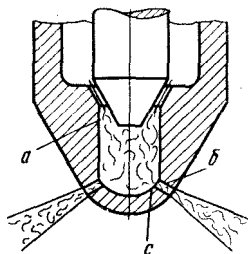


Рис. 136. Иллюстрация различных источников турбулентных пульсаций в топливной струе:

a — проходное сечение под конусом иглы; *b* — канал распиливающего отверстия; *c* — острая входная кромка распиливающего отверстия

их до такой степени, чтобы разные распылители не давали струй, заметно отличающихся и создающих различный силовой импульс.

304. Струя состоит из ядра, движущегося с большой скоростью по направлению к головной ее части, где в основном и происходит распыливание. Мелко распыленная часть струи отделяется от ядра и увлекается воздушными вихрями, вызванными движением струи; эта часть топлива образует оболочку струи. На рис. 137 показано схематически развитие струи при давлении впрыска 300 ат, диаметре сопла 0,8 мм, противодавлении 20 ат, температуре окружающей среды 15° С. На рис. 138

показано развитие струи в функции времени. Уместно вспомнить представление Швейцера [34] о том, что проникновение струи можно рассматривать как сверление отверстия в воздухе, причем скорость удлинения этого отверстия не зависит от скорости истечения сверлящей жидкости в каждый момент времени. Почти непосредственно за вершиной струи имеют место все еще очень высокие скорости топлива, затем струя сталкивается с еще неподвижным воздухом и происходит ее дезинтеграция. Эти ударные силы быть может в большей мере, чем силы трения, действующие вдоль поверхности ядра струи, определяют распыливание топлива в среде плотного воздуха¹.

¹ Автор не учитывает того, что струя создает поток воздуха в направлении своего движения, поэтому силы ударного столкновения топлива с воздухом не так велики, как можно было бы предположить. *Прим. пер.*

305. Как следует из механизма распиливания, всегда имеется определенное равновесное сочетание между дальностью и дисперсностью струи. Например, при высокой вязкости топлива имеют место меньшие начальные возмущения, ядро струи остается более компактным, и поэтому меньшим оказывается взаимодействие струи с окружающим воздухом. Дальность струи увеличится, а дисперсность ее уменьшится, по сравнению со случаем, когда вязкость топлива меньше. Это можно компенсировать уменьшением проходного сечения отверстий в распылителе (при этом давление впрыска становится выше), применением более короткого распыливающего отверстия (длиной $2d$ вместо $3d$) или использованием большего числа мелких отверстий при сохранении полного проходного сечения отверстий неизменным, если невозможно уменьшить вязкость топлива, например, предварительным его нагревом.

306. Следует вообще отметить, что как бы ни были велики наши теоретические познания об указанных явлениях, обычно приходится при конструктивных разработках форсунок прибегать к опытным проверкам. Наиболее ценная практическая рекомендация, полученная опытным путем, сводится к тому, что при непосредственном впрыске в условиях нетурбулентных камер свободная длина струи должна быть равна 400 диаметрам соплового отверстия, исходя из чего, рассчитав общее проходное сечение отверстий в распылителе, опре-

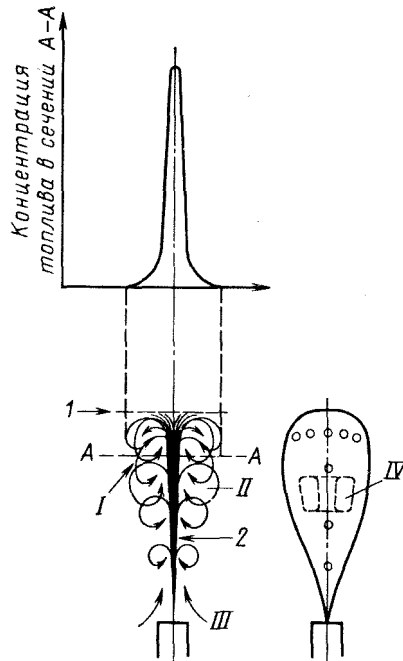


Рис. 137. Схематическое представление развития струи и распиливания топлива в плотной среде:

/ — распиливающее действие; // — вихреобразование; /// — вовлечение в движение воздуха; IV — зона расположения топлива, выпрыснутого в начале процесса (очаг воспламенения) I — движущаяся вершина; 2 — ядро струи

деляют необходимое число струй. В предкамерных и подобных им дизелях диаметр соплового отверстия должен быть относительно большим.

307. Струи, полученные таким образом, оказываются очень жесткими при обычно встречающихся давлениях впрыска порядка нескольких сотен атмосфер: они пронизывают картон и даже кусок дерева, поставленный непосредственно около распыливающего отверстия. Они могут также наносить ранения рукам, причем любое проникновение нефти в организм, как известно, вызывает появление язвы. Такой характер струи ведет к ярко выраженной тенденции попадания топлива на стенки, если последние находятся достаточно близко на пути движения вершины струи.

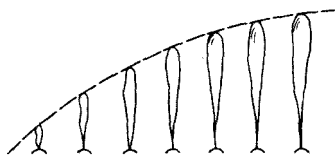


Рис. 138. Схема развития факела (по Швейцеру — «сверление» струей воздуха)

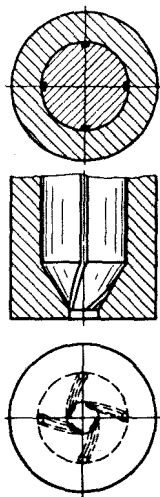


Рис. 139. Турбулентное сопло старого типа

308. Предпринимались многие попытки получить более мягкие струи либо увеличением начальных возмущений (турбулентные распылители), либо за счет быстро увеличивающейся поверхности контакта струи с воздухом, для чего применяли щелевые отверстия вместо круглых. Вихревые распылители (рис. 139) почти вышли из употребления после применения их в различных вариантах калоризаторных двигателях и других двигателях с умеренными давлениями сжатия. В настоящее время они широко используются в несколько модифицированном виде на установках с непрерывным горением при относительно малой плотности воздуха (котлы, газовые турбины). Возражения против их применения в дизелях следующие: относительно высокая стоимость изготовления при точном

выдерживании размеров; относительно большой объем топлива, непосредственно подверженного воздействию горячих газов; слишком большая дисперсность и, как следствие, слишком малая дальнобойность струй.

В калоризаторных двигателях, в которых стенки в большой мере использовались как средство ускорения испарения и помогали исправить несовершенство смеше-

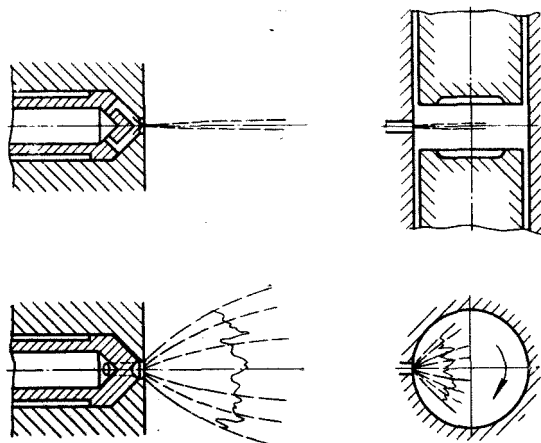


Рис. 140. Схема организации процесса в малоразмерном дизеле с одной веерообразной струей и завихриванием воздуха

ния, не требовалась столь высокая точность изготовления вихревых распылителей, которая требуется при их применении в обычных дизелях.

309. Фирма Юнкерс в двухтактных дизелях с противоположно движущимися поршнями всегда использовала специфическую форму струй. При этом ставилось целью не создание вращательного движения топлива в распылителе, а обеспечение столкновения двух струй, вследствие чего, как и в ацетиленовых горелках, образовывалась струя в виде плоского веера (рис. 140) с мелкими каплями, но обладающая малой дальнобойностью (см. рис. 126). Эти форсунки требовали очень тщательного изготовления и были очень чувствительны к неточностям: даже при небольшом эксцентриситете одной из струй плоский топливный веер не образуется, и струя оказывается искривленной.

310. Форсунки со щелевыми распиливающими отверстиями изготавливаются в нескольких вариантах. Фирма Томассен на двигателях с горизонтально расположенными цилиндрами эксплуатировала в течение очень долгого времени форсунку с профрезерованной щелью вместо сверленного отверстия (рис. 141, *а*), но эта конструкция не получила дальнейшего распространения. Наиболее обычной современной конструкцией щелевого распылителя является штифтовый распылитель, предложенный фирмой Бош (рис. 141, *б*), в котором щель образована между круглым отверстием и выступающей частью иглы — штиф-

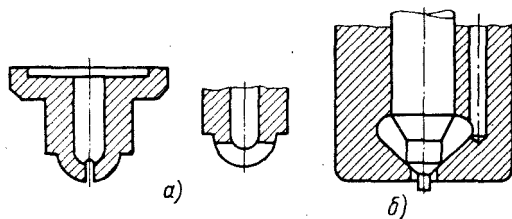


Рис. 141. Распылители:

а — со щелевым отверстием; *б* — штифтовый

том. Последний может быть шлифован в виде конуса с тем или иным углом, вследствие чего могут быть получены струи с различным углом конуса и, следовательно, с различной дальностью. Распылители маркируются по углу конуса штифта в пределах от 4 до 45°. Струя с углом конуса 4° очень жесткая, струи с углами конуса 30 и 45° столь мягки, что можно держать руку непосредственно у распылителя без какой-либо опасности. Эти распылители широко применяются во всех предкамерных и вихрекамерных дизелях. Однако они не пригодны для двигателей с непосредственным впрыском, так как при требуемой в последних мелкости распыливания дальность струй в случае штифтового распылителя слишком мала; кроме того, угол конуса струи, обеспечиваемый штифтовыми распылителями, слишком мал для использования в большинстве открытых камер сгорания, а получение больших углов конуса связано с большими конструктивными трудностями. На рис. 142, *а*, *б* показаны некоторые формы струй, обеспечиваемых штифтовыми распылителями; ясно видно, что эти струи внутри полые.

311. Из сказанного видно, что щелевые распылители характеризуются большей склонностью к неравномерной работе в результате неточности изготовления. При этом важна как чистота поверхностей, так и точность выполнения размеров и геометрии. На седле иглы не допускаются заусенцы, шероховатости и пр. Ось факела топлива в случае штифтового распылителя совпадает с осью иглы.

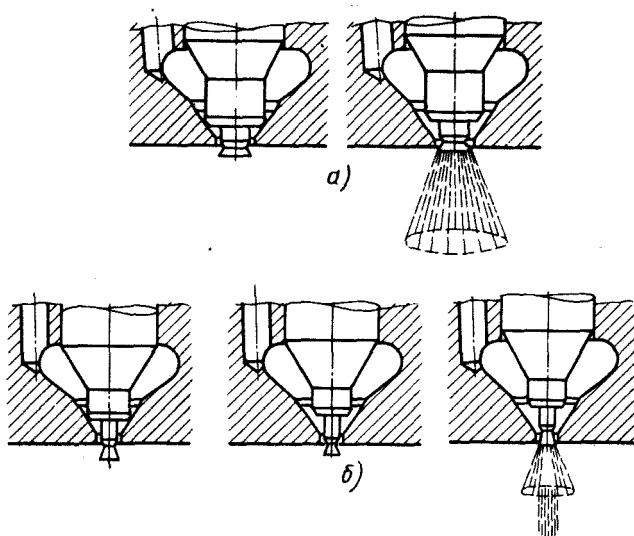


Рис. 142. Образование струи штифтовым распылителем:
a — в виде полого конуса распыливания; *б* — с дросселированием потока топлива для обеспечения ступенчатой подачи и мягкого процесса

Распылители с обычными отверстиями могут быть сконструированы так, что распыливающие отверстия будут занимать любое положение в теле распылителя относительно камеры сгорания. Это позволяет упростить конструкцию головки цилиндра, а последнее является задачей, которая почти всегда решается с трудом. Из отмеченной особенности следует, что обычные многодырчатые распылители имеют явное преимущество.

312. Особым типом является штифтовый распылитель с дросселирующим штифтом, в котором часть штифта сконструирована так, что между ней и отверстием имеется только очень небольшой зазор. Именно этот зазор является

наименьшим проходным сечением в период начального подъема иглы. В результате уменьшается скорость впрыска в период подъема иглы и достигается мягкая работа двигателя (см. абзац 280, а также распылитель типа Пинтакс, рис. 115).

313. В тех случаях, когда желательно получить большой угол при вершине конуса, могут применяться распылители, открывающиеся внутрь (в сторону цилиндра), которые, в сущности, являются клапанными, а не игольчатыми.

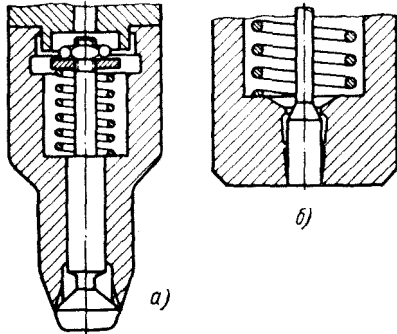


Рис. 143. Клапанная форсунка с кольцевым распиливающим отверстием:

а — широкий конус; б — узкий конус

ном изготовлении распылителя этого типа фирмой Заурер (Арбон, Швейцария, рис. 143, а). Он был использован на двигателе со специальной камерой сгорания, о которой будет сказано подробнее ниже. Позднее при конструировании распылителей этого типа преследовалась другая цель, а именно — увеличение обычно малой при распылителе этого типа дальности струи, что было достигнуто введением ряда радиальных канавок. В результате топливо во впрыскиваемом факеле в некоторой мере концентрируется, например, в четырех определенных направлениях. На рис. 143, б показан такой распылитель, изготовленный американской фирмой Экселло, сходный с распылителем фирмы Заурер. Однако распылители, упоминаемые в этом абзаце, в целом не находят уже широкого применения.

Распылители этого типа имеют тот органический недостаток, что клапан обычно не закрывается плотно при вполне определенном заданном давлении» и, как правило, при посадке имеет место подтекание¹.

Неоднократно пытались применять клапанные распылители. Первые успешные результаты были получены при прецизион-

¹ В действительности клапанные распылители менее склонны и подтеканию топлива. *Прим. пер.*

314. Применяя распылители описанных выше конструкций, можно достигнуть большого разнообразия в дисперсности распыливания и в дальноточности струй, используя несколько отверстий и выбирая соответствующие углы.

Однако, несмотря на это разнообразие, все же имеются определенные ограничения в форме и размерах областей (объемов), непосредственно охваченных топливными струями или веерами (плоские факелы). Форма этих областей лишь весьма приближенно соответствует конструктивной форме и размерам камеры сгорания, а поэтому необходимо создавать некоторое движение воздуха для возможно лучшей компенсации неравномерности распределения топлива.

315. Перед изучением этой проблемы необходимо рассмотреть несколько вопросов, которые в целом находятся вне общего направления данной книги. Функция системы впрыска сводится к обеспечению определенного массово-пространственно-временного распределения топлива в камере сгорания, на которое влияет движение заряда и температура стенок. Степень этого влияния выбирается при конструировании.

Чем меньше влияние этих последних факторов, тем точнее отмеченная выше функция должна удовлетворять желаемой закономерности и, следовательно, тем точнее должен осуществляться впрыск. Вот почему переход от калоризаторных двигателей, в которых эффекты ускорения испарения и турбулизации заряда были выражены весьма ярко, к дизелям произошел лишь после того, как было налажено производство качественных топливных насосов и форсунок.

Вначале особое внимание уделялось распыливанию и оптимальному распределению топлива по объему камеры сгорания в дополнение к точному контролю полного количества впрыскиваемого топлива. Позднее все более и более важным стал контроль впрыска в функции времени, т. е. приобрело значение массово-пространственно-временное распределение топлива, которое представляет широчайшие возможности для воздействия на рабочий процесс двигателя. Данная проблема является частью общей проблемы исследования динамики топливной системы, которая в целом не включена в эту книгу. Здесь рассматриваются лишь отдельные вопросы, напри-

мер, желательность медленного начала впрыска (абзац 280) и необходимость избегать вредных для работы двигателя дополнительных впрысков.

316. Наиболее важным представляется, конечно, достижение массово-пространственно-временного распределения в соответствии с конструктивными требованиями. В дополнение к необходимости обеспечения большого сопротивления износу деталей топливной системы и предотвращения непредвиденно большого трения в прецизионных парах (заедания) необходимо также исключить возможность подтекания топлива и загрязнения распылителя (коксования его отверстий).

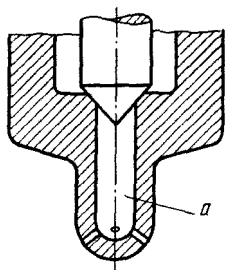


Рис. 144. Полость перед распыляющими отверстиями распылителя

317. Подтекание, т. е. вытекание топлива из пространства под иглой или обратным клапаном в интервалах между впрысками, возникает либо в результате проникновения газов из цилиндра в это пространство, либо вследствие того, что топливо в нем начинает кипеть; в основном имеет место именно последнее. В результате небольшое количество топлива попадает в цилиндр в нераспыленном виде, увеличивается рас-

ход топлива и становится вероятным коксование отверстий распылителя. Распылители, расположенные вертикально, более подвержены этому недостатку, чем распылители, расположенные горизонтально, особенно в случае, если объем пространства *a* (рис. 144) велик и температура распылителя при его работе достаточно высока. Подтекание обнаруживается, если оно выражено резко, по изменению цвета распылителя за счет его загрязнения проникающими внутрь газами (что может быть также результатом неплотности прилегания иглы к седлу). Может также происходить преждевременное воспламенение, что, однако, не наблюдается при распылителях современных типов. Решению этой проблемы способствует охлаждение форсунок.

318. Коксование распылителя имеет место в тех случаях, когда он перегревается, и особенно в случае использования сырой нефти, нефтяных остатков и золосодержащих топлив. Оно значительно ускоряется за счет явлений, описанных выше, или при наличии небольшой утечки,

а также в случае неправильных характеристик впрыска, например, когда впрыск заканчивается вяло, а не резко (рис. 145). В этом случае горение в конце процесса перемещается ближе к распылителю, и маленькое пламя, возникающее из-за подтекания топлива в конце впрыска, продолжает гореть в течение некоторого периода времени. Это явление иногда обнаруживается по воспламенению топлива с ненормально коротким периодом индукции, как показано на рис. 146. Степень коксования может варьировать от маленькой коксовой крошки вокруг отверстий распылителя или частиц нагара, покрывающих

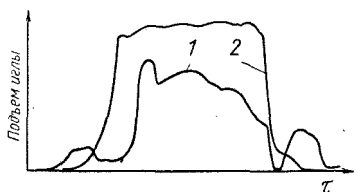


Рис. 145. Характеристика движения иглы:

1 — с медленной посадкой и вторичным впрыском; 2 — улучшенная характеристика



Рис. 146. Сравнение индикаторных диаграмм в координатах ρ — τ , снятых:

1 — с закоксованным распылителем; 2 — при нормальной работе форсунки

носик (рис. 147), до более или менее длинных раструбов нагара, отходящих от всех распыливающих отверстий и заключенных в твердый коксовый «пирог» (рис. 148). Необходимо учесть, что при этом ухудшается распыливание, растет расход топлива, выпуск становится дымным и грязным. На рис. 149 показано изменение температуры отработавших газов и расхода топлива в двигателе, в котором наблюдалось коксование распылителя, аналогичное показанному на рис. 148. Через более или менее регулярные промежутки времени раструбы нагара отрываются, что можно определить по внезапному уменьшению температуры отработавших газов и уменьшению расхода топлива. На рис. 150 показаны индикаторные диаграммы, полученные при работе двигателя на топливе из нефтяных остатков при закоксованном и чистом распылителях. Здесь можно видеть, как нарушение совершенного смешения ведет к уменьшению давления сгорания и повышенному догоранию.

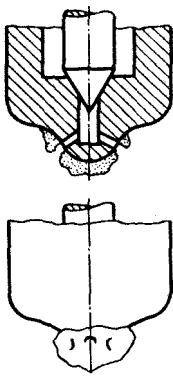


Рис. 147. Коксованные распылители

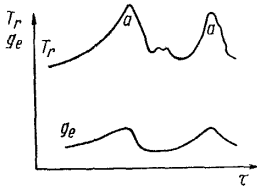


Рис. 149. Влияние коксования распылителя на температуру отработавших газов и расход топлива

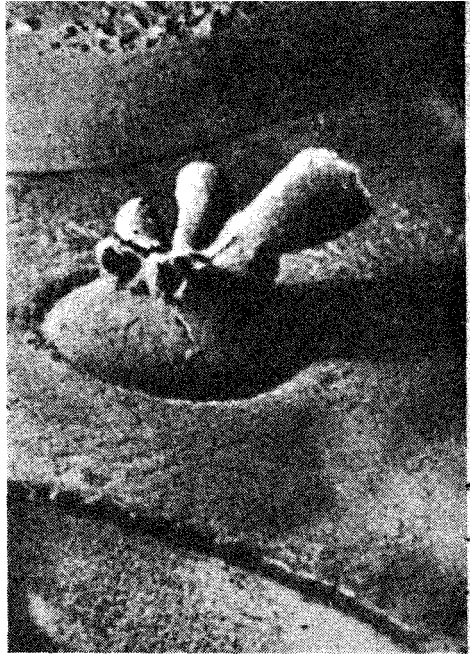


Рис. 148. Отложения кокса на кончике распылителя после 6 ч работы на тяжелом топливе

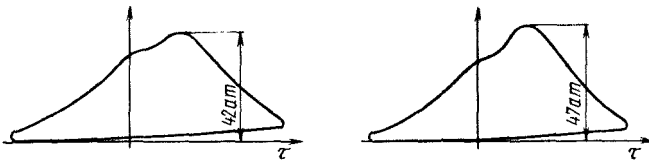


Рис. 150. Улучшение горения с соответствующим повышением максимального давления сгорания при применении охлаждения форсунки

319. Температурный градиент в распылителе иногда может быть очень большим, особенно в условиях, способствующих коксованию при образовании у распыли-

теля небольшого пламени. В случае стационарного двигателя с весьма умеренной общей теплонапряженностью у носика распылителя температура в определенном случае достигала 250°C , хотя и применялась охлаждаемая снаружи форсунка (рис. 151). Именно в этих опытах оказалось возможным получить дополнительное свидетельство наличия догорания около распылителя — уменьшение температуры распылителя при разрушении корки кокса. Следовательно, корка кокса не является в данном случае теплоизолятором, но, напротив, вследствие реакций, происходящих на ее поверхности, она способствует повышению теплоподвода к металлическим частям. Иначе невозможно было бы объяснить наличие температурного градиента порядка $100^{\circ}\text{C см}^{-1}$ при средней теплонапряженности пространства горения около $50\,000\text{ ккал/(ч м}^2\text{ }^{\circ}\text{C)}$. Таким образом, очень важно предотвращать возможность медленного догорания топлива у распылителя путем резкой отсечки впрыска, устранения подтекания, а также за счет интенсивного охлаждения распылителя.

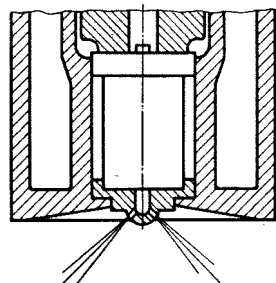


Рис 151. Охлаждаемая форсунка старого типа

320. Охлаждение это должно быть локализовано так, чтобы полностью избежать горения топлива у распылителя, для чего охлаждающая жидкость должна проходить как можно ближе к его носику или, если это возможно, непосредственно через распылитель. Кроме воды, в качестве охлаждающей жидкости может использоваться топливо или смазочное масло. Последние имеют то преимущество, что могут применяться без опасности коррозии стальных деталей форсунки, но их охлаждающее действие меньше, а конструкция и обслуживание форсунок с охлаждением топливом или маслом сложнее. На рис. 152 показаны некоторые конструктивные решения в порядке получаемого увеличения эффективности охлаждения. Распылитель варианта, показанного на рис. 152, а, обладает, безусловно, еще недостаточной охлаждающей способностью с точки зрения предотвращения коксования (хотя он уже очень эффективен с других точек зрения, например, в отношении заедания иглы).

Распылитель варианта, показанного на рис. 152, б, можно считать весьма хорошим.

321. В настоящее время некоторые фирмы выпускают форсунки с охлаждением в виде очень компактных конструкций, полностью взаимозаменяемых с неохлаждаемыми моделями. При этом обычно вокруг распылителя

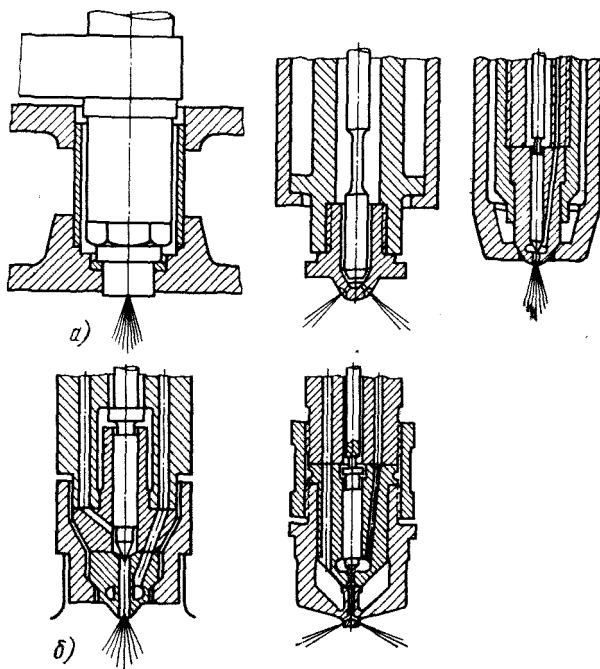


Рис. 152. Распылители форсунок различных типов

медью припаивается стальная втулка. На рис. 153 показаны такие конструкции, причем видно, что установка распылителя может быть осуществлена так, что его кончик выступает на некоторое расстояние в камеру сгорания. Это очень важно с точки зрения избежания отложений, образующихся из-за попадания распыленного топлива в щель между распылителем и стенками камеры сгорания, где эти отложения, высохнув, образуют корки, что также может приводить к формированию уже упомянутых выше раструбов из нагара. Более того, в результате этого может стать затруднительной разборка форсунки,

322. В случае использования топлив более легкого фракционного состава, вязкость которых меньше, охлаждение форсунки, хотя и излишнее с точки зрения коксования, может улучшить расход топлива за счет увеличения вязкости и уменьшения давления паров, что повышает дальность струй. В больших тихоходных двигателях

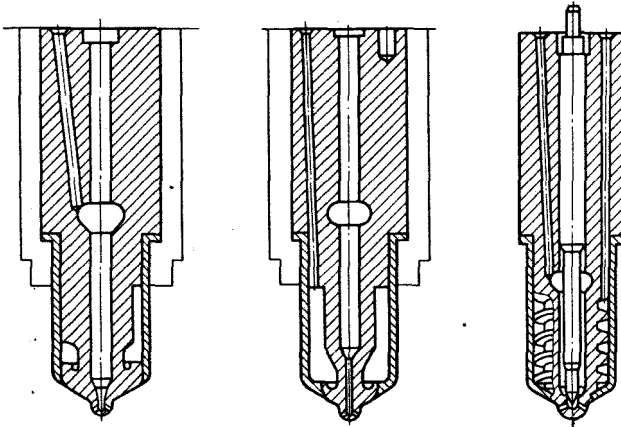


Рис. 153. Конструкции распылителей охлаждаемых форсунок Бош

это приводит к изменению процесса в лучшую сторону. При использовании очень вязких топлив температура охлаждающей жидкости может быть поднята до 80°C и даже выше, если, конечно, выбранная конструкция позволяет это сделать. В случае достаточного охлаждения распылителя отложения на распылителе имеют блестящую гладкую поверхность, так как состоят из остатков масла с сажей, причем они не препятствуют развитию струй.

ДВИЖЕНИЕ ЗАРЯДА

323. В абзаце 74 и последующих, а также в абзаце 269 уже приводились некоторые сведения о различных влияниях движения заряда на процесс. Подробное изучение влияния движения заряда на распределение (дисперсность) топливных струй было выполнено НАСА до 1940 г. и проиллюстрировано соответствующими фотографиями.

7*

При малых скоростях движения воздушного заряда его движение оказывает влияние только на оболочку факела, состоящую из мелких капель, уже потерявших свою скорость. Такое взаимодействие особенно полезно, когда поток воздуха сталкивается со струей под прямым углом и увлекает часть топлива, заключенного в факеле, в сторону от его оси (рис. 154, а). Этот процесс можно назвать развеиванием струи.

Так как имеет место непрерывное изменение концентраций и относительных скоростей движения топливных

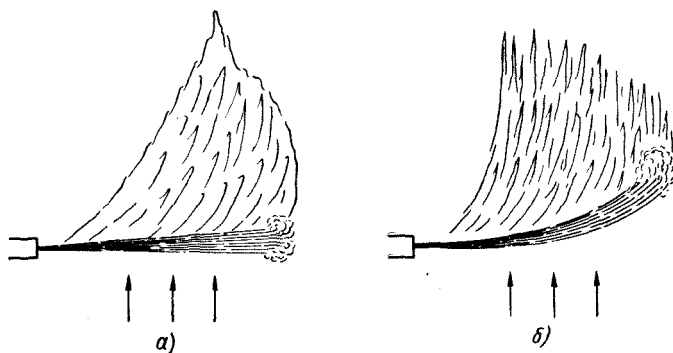


Рис. 154. Движение заряда:

а — развеивающий эффект движения заряда на факел топлива; б — отклонение ядра струи сильным поперечным потоком

частиц в направлении от оболочки факела к его оси, то развеивающий эффект усиливается постепенно с ростом скорости воздуха. При скоростях воздуха того же порядка, что и скорость движения ядра факела (100 м/сек и более), уже и само ядро факела в большой мере отклоняется воздушным потоком (рис. 154, б). Однако для получения хорошего распределения топлива нет необходимости в достижении столь высоких скоростей движения заряда.

324. Более значительно влияют на струю быродвижущиеся горячие газы потому, что помимо аэродинамического они оказывают также тепловое воздействие. При этом осуществляется быстрое горение и частичное химическое превращение смеси и легко достигается разрушение ядра факела. В тех случаях, когда этот эффект сочетается с эффектом горячих стенок, как это имеет место в предкамерных или им подобных дизелях, пламена,

переходящие из дополнительной камеры в основную, почти целиком приобретают характер чисто газовых пламен.

325. В соответствии с абзацем 302 можно классифицировать движения заряда по методу их создания следующим образом:

а) созданные в период впуска (абзац 326 и последующие);

б) созданные в период сжатия (абзац 336 и последующие);

в) созданные во время горения (абзац 343 и последующие).

326. **Движение заряда, созданное в период впуска.** Прежде всего в период впуска создается общая турбулизация заряда, упоминавшаяся выше (абзац 64), которая, если все еще продолжает существовать, может локально способствовать смесеобразованию в конце такта сжатия (в зонах с диаметром максимум $0,1D$). Если заряд не имеет направленного движения, то распределение топлива (форма и размеры струй) должно быть выбрано так, чтобы струи попадали в достаточное число таких зон (рис. 155). Так можно достигнуть достаточно удовлетворительного результата, особенно в случае, если имеется большой избыток воздуха (тихоходный судовой двигатель), причем одновременно простой оказывается конструкция дизеля и достаточно малым теплоотвод в стенки. Скорость этого теплоотвода зависит в большой мере от скорости воздуха на входе в цилиндр, следовательно, при тех же давлениях и температурах теплоотдача в двухтактном двигателе выше, чем в четырехтактном [35]. Во всех случаях скорость теплоотвода увеличивается примерно в степени $2/3$ от скорости поршня, что соответствует изменению скорости воздуха на входе в цилиндр.

327. Если к процессу смешения предъявляются более высокие требования, то очень важное значение имеет правильно выбранное движение воздуха вокруг оси цилиндра. Как следует из опыта и ряда лабораторных измерений [36], трение при таком движении сравнительно мало, поэтому вихрь продолжает существовать достаточно длительное время и соответственно затраты энергии на его создание незначительны (следовательно, невелики и сопротивление на впуске и потери наполнения). В двигателях с двухтактным циклом, а также в двигателях

с гильзовым газораспределением вращательное движение воздуха может быть создано соответствующим расположением входных отверстий; в этом случае заряд может вращаться весьма интенсивно. Процесс можно мысленно представить следующим образом: зная среднюю скорость потока в продувочных или впускных окнах и приняв, что оси отверстий являются касательными к окружности

диаметром около $\frac{2}{3}$ диаметра цилиндра (рис. 156), можно вычислить воображаемую угловую скорость потока, отне-

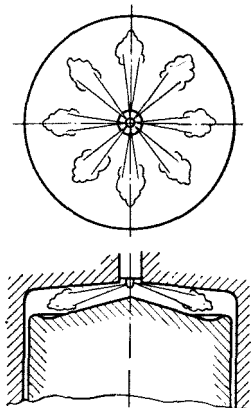


Рис. 155. Факел распыленного топлива в двигателе без турбулентного движения заряда

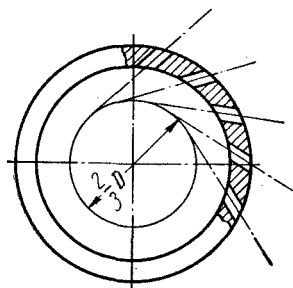


Рис. 156. Схема образования вихря наклонными продувочными отверстиями

сенную к упомянутой окружности. Таким образом, можно получить величину интервала в градусах угла поворота коленчатого вала, в продолжении которого масса заряда делает один оборот¹.

Путем выбора главного размера камеры сгорания, равного полному диаметру цилиндра или только части его, можно влиять на время поворота заряда. Следует стремиться к тому, чтобы это время было равно продолжительности впрыска на полной нагрузке, умноженной на число радиальных струй или умноженной на число

¹ При подобном расчете уменьшение диаметра окружности, к которой касательны оси продувочных окон, до значений, близких к $\frac{1}{2}$ диаметра цилиндра, приводило бы к увеличению скорости вращения массы воздуха. На самом деле из-за взаимодействия отдельных входящих струй при этом возрастает не энергия направленного вихря, а энергия турбулентных пульсаций.

форсунок, если несколько форсунок расположены по периферии камеры сгорания.

328. На рис. 157 показаны схематически примеры наиболее типичных конструкций двухтактных двигателей с созданием направленного движения заряда за счет тангенциального расположения продувочных окон, а именно двигателей с противоположно движущимися поршнями системы Юнкерс, величина диаметра камеры сгорания которых близка диаметру цилиндра. За исключением

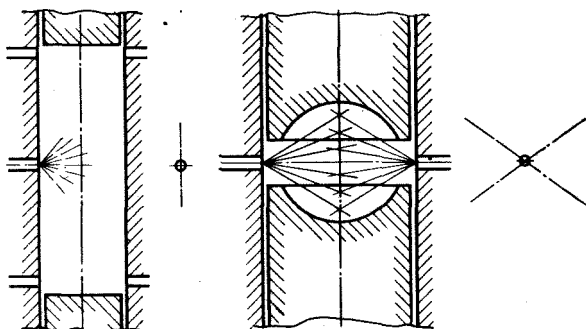


Рис. 157. Схемы факелов распыленного топлива в двигателе с противоположно движущимися поршнями

двигателя с наименьшим диаметром цилиндра, конструкция которого была очень простой, в этих двигателях устанавливалось от двух до четырех форсунок на каждый цилиндр, как показано на рис. 126. На рис. 158 показано несколько камер сгорания, величина диаметра которых уменьшена по сравнению с диаметром цилиндра, а форсунка расположена эксцентрично. В некоторых случаях и в таких камерах сгорания используется несколько форсунок для улучшения распределения топлива по объему.

На рис. 158, 1 показана, в частности, камера сгорания, предложенная Рикардо, в которой используется эффект осаждения части топлива на стенки.

329. Когда вихрь создается с помощью тангенциального по отношению к цилиндру расположения продувочных окон, то не исключена возможность образования чересчур интенсивного вихря по всей периферии цилиндра,

что может приводить к следующим нежелательным последствиям:

1) центрифугированию топлива в период впрыска, вследствие чего будут нарушены условия полного и своевременного сгорания;

2) центрифугированию холодного продувочного воздуха (в цилиндре остается значительное ядро горячих продуктов сгорания).

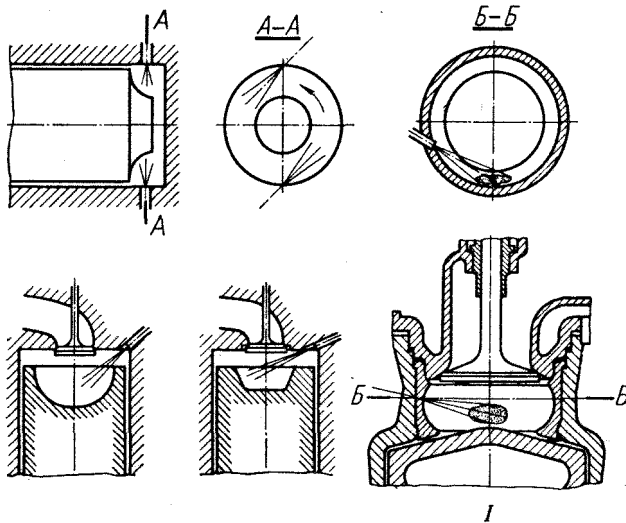


Рис 158. Камеры сгорания с вихревым движением заряда и различными факелами распыленного топлива

В последнем случае положительный эффект может обеспечить вытеснитель, центрально расположенный на поршне, а также большое отношение $\frac{h}{D}$ цилиндра (например, в конструкциях с противоположно движущимися поршнями).

330. Если заряд вращается слабо, то могут создаться условия, при которых случайные отклонения в размерах и направлении продувочных окон могут оказаться доминирующими, и работа различных цилиндров будет неодинаковой.

331. В действительности структура вихря несколько иная, чем было рассмотрено выше. Даже если первоначально вся масса заряда действительно вращается вокруг

оси цилиндра по закону твердого тела, то в последующий период могут создаться условия, отвечающие свободному вихрю, который характеризуется тем, что на любых расстояниях x от центра в кольце толщиной dx количество движения mv постоянно.

Так как масса m пропорциональна $2\pi x$, то

$$v_x 2\pi x = \text{const} \text{ или } v_x = \frac{C}{2\pi x},$$

что дает гиперболическую зависимость между скоростью и расстоянием от центра. Угловая скорость вихря при этом определится как

$$\omega_x = \frac{v_x}{x} = \frac{C}{2\pi x^2}.$$

В этом случае обе скорости ω и v стремятся к очень большим значениям вблизи центра вращения, что, конечно, может повлиять на характер деформации струй топлива. Высказывались предположения, что подобный характер вращения имеет место и в условиях двигателя, хотя прямым путем это установлено не было. Следует также иметь в виду усложнение структуры скоростей движения заряда в камере сгорания в результате трения о стенки (следует вообще признать, что знания о нестационарном течении газов явно недостаточны как в отношении теоретических разработок, так и в смысле накопленного опытного материала)¹.

Далее при рассмотрении причин движения заряда эти вопросы еще раз будут затронуты. Как показано выше, в бензиновом двигателе направленное движение заряда приводит к значительному ускорению горения, что хотя не доказывает наличия движения, подобного вращению твердого тела, но по меньшей мере свидетельствует о наличии градиента скорости, направленного вдоль радиуса (абзац 160).

332. При впуске через клапаны также можно вызвать вращательное движение заряда или, вернее, вращательное движение всегда практически создается, даже если оно и

¹ Последними опытами, в которых производилось измерение скоростей воздушных потоков в цилиндре с помощью электротермометра с температурной компенсацией и методом ионного облачка, при проворачивании коленчатого вала показано, что во всяком случае применительно к концу сжатия более правильной является первая схема, т. е. вращение заряда в двигателях аналогично вращению твердого тела. *Прим. ред.*

не является желательным, если только канал не сконструирован таким образом, чтобы подобное вращение было исключено. Конструкция клапана предопределяет наличие канала с коленом, и это само по себе приводит к созданию вращательного движения заряда, так как в большинстве двигателей невозможно направлять каналы в точности радиально. Точно так же, как это наблюдалось в отношении продувочных окон, и в данном случае, если не предъявлять особых требований к изготовлению впускных каналов, интенсивность движения заряда в различных цилиндрах будет существенно иной. Это в особенности относится к двигателям небольших размеров с общей головкой на два или более цилиндра, в которых условия на впуске в разные цилиндры могут быть различными.

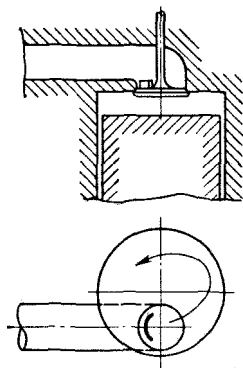


Рис. 159. Схема образования вихря заширмленным клапаном

333. Путем придания впускному каналу ярко выраженного тангенциального по отношению к цилиндру направления или путем заширмления клапана на части его окружности можно вызывать вращательное движение заряда со значительной интенсивностью, причем последняя может контролироваться. Дикси [37] выполнил такого рода опыты (хотя и не первым) и пришел к выводу, что заширмленный клапан обеспечивает наименьшие потери при наполнении при заданной интенсивности движения заряда. Он добился желаемой интенсивности вихря уже при клапане с ширмой, имеющей угол охвата 80° . Расположение впускного канала и заширмленного клапана схематически представлено на рис. 159. Рис. 160 дает представление об ожидаемых угловых скоростях вращения всей массы заряда. Ясно, что наилучшие результаты получаются в том случае, когда заширмленный клапан создает поток воздуха в направлении движения заряда во впускном канале. На рис. 161 показаны зависимости среднего эффективного давления от угла поворота заширмленного клапана при разных углах $\gamma_{ш}$ охвата ширмы клапана, полученные Дикси на двигателе, где имел место дополнительный эффект вытеснения воздуха в конце сжатия в

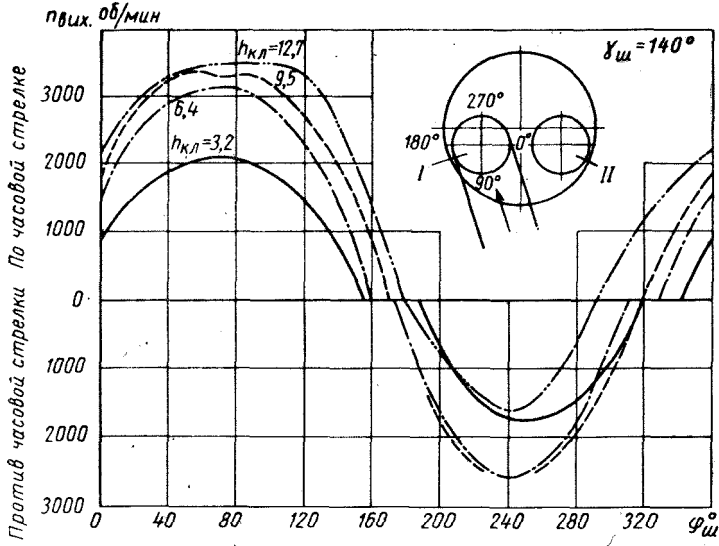


Рис. 160. Зависимость числа оборотов вихря $n_{вих}$ от положения заширленного клапана (угол охвата ширмы 140°) при перепаде давления в клапане, равном $25,4 \text{ мм рт. ст.}$, и различных подъемах клапана:

/ — впуск; // — выпуск

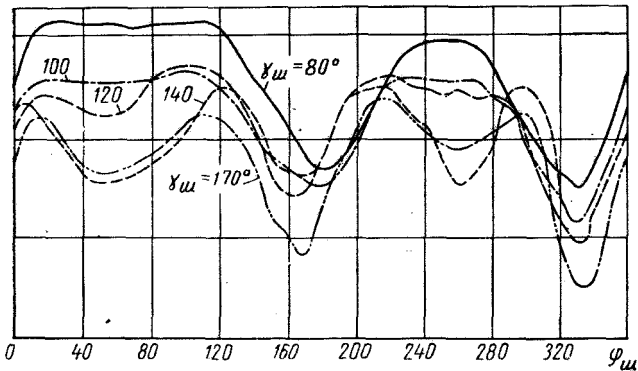


Рис. 161. Влияние положения заширленного клапана на среднее эффективное давление цикла двигателя при различных углах охвата ширмы и $n = 1000 \text{ об/мин}$

камеру меньшего диаметра, чем диаметр цилиндра (сквиш), вследствие чего угловая скорость вихря увеличивается. Этот эффект будет рассмотрен ниже (абзац 340).

334. Таким образом было показано, что правильно сконструированный впускной клапан с ширмой в сочетании с каналом соответствующей формы имеет сопротивление не большее, чем сопротивление обычного клапана¹. Единственный недостаток — отсутствие вращения самого клапана, что имеет следствием усложнение конструкции и увеличение склонности пары клапан—седло к утечкам

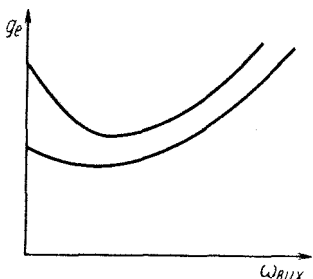


Рис. 162. Зависимость удельного расхода топлива от скорости вихря

в результате загрязнения или тепловых деформаций седла клапана. В двигателе, где можно ожидать сильного коксования (например, в результате эксплуатации на тяжелом топливе), применение заширмленного клапана нежелательно.

335. Дикси использовал распылитель с четырьмя отверстиями. Можно было наблюдать, что при наибольшем угле охвата ширмы клапана и установке клапана в положение, при котором создавалась наибольшая интенсивность вращения, образовывался чрезмерно интенсивный, вредный для процесса вихрь. В случае вращения заряда, вызываемого только формой и расположением впускного канала, когда применялись обычно более чем четыре струи, также наблюдалось аналогичное «перезавихривание».

В некоторых старых немецких публикациях приводятся зависимости расхода топлива на полной подаче в функции угловой скорости вихря или положения заширмленного клапана, как показано на рис. 162. Можно видеть, что хорошие результаты имеют место при слабом вращении заряда; чрезмерно интенсивное вращение заряда неэкономично, вероятно, из-за повышенных тепловых потерь, а также вследствие не улучшения, а ухудшения распределения топлива, хотя и не в такой мере, как в случае с двухтактным дизелем при тангенциально располо-

¹ Наличие ширмы на клапане, как правило, приводит к повышению сопротивлений впускной системы. *Прим. пер.*

женных продувочных окнах, упомянутом выше. Иногда отрицательное влияние интенсивного движения заряда объясняют тем, что заряд из зоны одного факела переносится в зону соседнего по направлению движения. Имеют место также дополнительные явления (абзац 341). Странно, что до Дикси ни один из конструкторов не пришел к правильному выводу, а именно, что заширмение клапана уже на небольшой угол достаточно; при этом установка ширм может быть менее точной, и наполнение большее.

336. **Движение заряда, созданное при сжатии.** Важно сочетание вращательного движения заряда, созданного

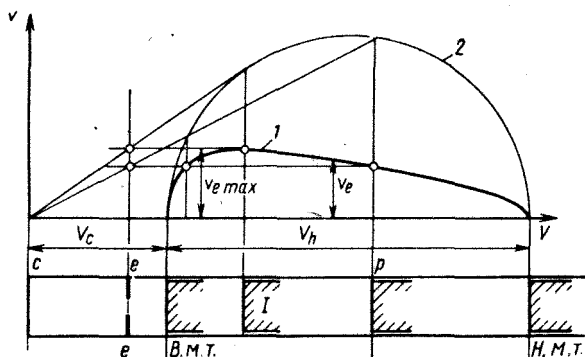


Рис. 163. Схема подсчета скорости движения заряда в горловине камеры, вызванного движением поршня:

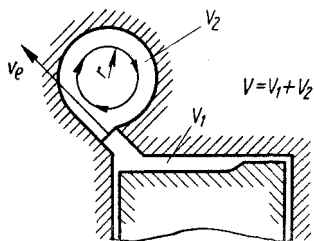
1 — положение поршня при $V_{e \max}$; $e-e$ — плоскость наименьшего сечения в горловине; 1 — скорость движения заряда в горловине; 2 — скорость поршня

при впуске, с движением, создаваемым поршнем в процессе сжатия. В первом приближении можно принять, что в период сжатия в цилиндре, который можно рассматривать как имеющий плоскую крышку, все элементы заряда приобретают скорость v_e в направлении этой крышки, являющуюся частью скорости поршня v_p . Скорость v_e относится к скорости поршня как расстояние ce данного элемента от крышки относится к расстоянию cp поршня от крышки цилиндра (рис. 163), т. е. $\frac{v_e}{v_p} = \frac{ce}{cp}$. Как следствие, осевая скорость заряда в заданном сечении цилиндра определяется кривой, полученной на основе простой аппроксимации по кривой скорости поршня, как показано на рис. 163.

337. Если в заданной плоскости $e-e$ расположения элемента установить сужение с проходным сечением F_1 при площади поршня F_p , то в первом приближении скорость через эту горловину может быть получена (см.

рис. 163) умножением скоростей v_e на отношение $\frac{F_p}{F_1}$.

Если получаемые таким образом скорости оказываются значительными, то следует применить более точное решение с учетом разницы давлений в цилиндре и в полости за горловиной. Сопротивление в горловине вначале приведет к уменьшению скоростей; из-за появившегося за счет сопротивления перепада давлений скорость



перетекания на последующих стадиях возрастет, и в в. м. т. эта скорость еще не будет равна нулю. На практике обычно обходятся без этих расчетов, ограничиваясь лишь приближенной сравнительной оценкой различных конструктивных параметров.

338. В случае вихрекамерных двигателей необходимы являются расчеты скорости перетекания в вихревую

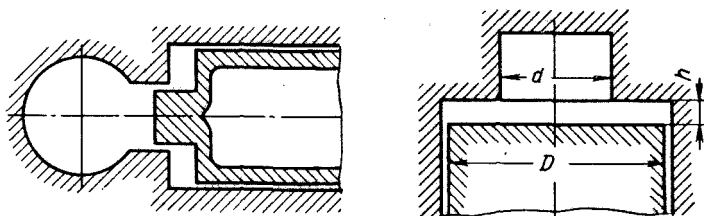


Рис. 165. Поршень с вытеснителем и схема принципа вытеснения заряда (принципа сквиш)

камеру в направлении, определяемом положением горловины, и определение на основе этой скорости номинальной скорости вращения заряда в вихревой камере (см. рис. 164), которая зависит от скорости $v_{e \max}$. В этом случае возможно увеличить угловую скорость в вихревой камере до таких пределов, чтобы заряд совершал полный оборот за $20-30^\circ$ угла поворота коленчатого вала и, сле-

довательно, $n_e = (12 \div 8) n_{ог}$. Точное значение n_e зависит от многих дополнительных факторов, поэтому лучше определять его опытным путем.

Из рис. 164, где показана камера Рикардо «КометаШ», видно, что движение заряда может иметь характер струйного течения, переходящего постепенно в направленную турбулентность, или вращательное движение, напоминающее по характеру в большей или меньшей мере вихрь. При вихревом движении легче контроль интенсивности движения и меньше потери энергии.

339. Перепад давлений в двух частях камеры, о котором говорилось в абзаце 337, приводит к дополнительным гидравлическим потерям, и в зависимости от того, изменится ли давление в цилиндре (что более верно) или в дополнительной камере (что чаще всего делается вследствие большей доступности), получается либо низкий механический к. п. д., либо высокий удельный индикаторный расход топлива. Для того чтобы снизить эти гидравлические потери, применялся поршень со специальным вытеснителем, имеющим форму цилиндрического выступа на днище поршня, при помощи которого малое проходное сечение между обеими частями камеры создается лишь в конце такта сжатия. Этот цилиндрический выступ перекрывает частично проход в головке блока непосредственно перед в. м. т. (рис. 165). Таким образом достигаются высокие скорости перетекания без больших гидравлических потерь, причем оказывается возможным установить впускные и выпускные клапаны в дополнительной камере, избегая чрезмерно больших потерь на газообмен. Возражением против такой конструкции является очень высокая температура поршня вследствие обтекания выступа горящими газами, поэтому поршни такой конструкции применяются только на двигателях с низкой теплонапряженностью.

340. Оказалось очень важным другое конструктивное решение, при котором в конце такта сжатия поршень подходит к головке цилиндра очень близко значительной частью поверхности днища и вытесняет воздух из пространства над этой поверхностью (над вытеснителями) в основное пространство камеры сгорания. В этом случае проходное сечение и, следовательно, скорости определяются зазором между поршнем и головкой, который и представляет собой проход в пространство сгорания

(рис. 165). В начале хода сжатия решающее значение имеет проходное сечение горловины (с площадью $\frac{\pi d^2}{4}$) камеры, которая для простоты показана здесь цилиндрической, В дальнейшем, когда $h < \frac{d}{8}$, решающим (наименьшим) становится проходное сечение, площадь которого равна $2\pi dh$. И в этом случае при заданной конечной скорости перетекания достигается уменьшение потерь на перетекание.

Подобный метод «выжимания» воздуха из пространства между поршнем и головкой цилиндра был применен

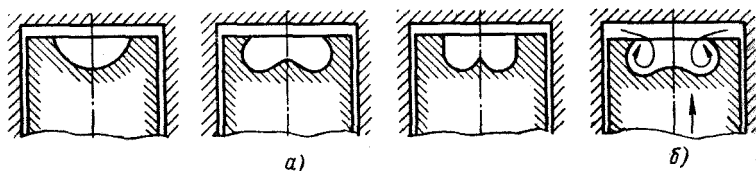


Рис. 166. Камеры сгорания, расположенные в поршне, в которых используется принцип вытеснения заряда:

a — различные конструкции; *б* — схема тороидального движения заряда, вызванного вытеснителями

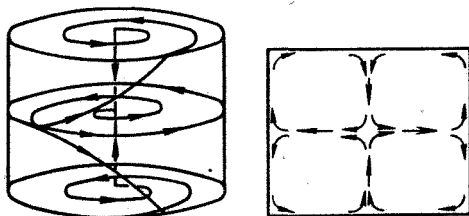
Рикардо в двигателях с искровым зажиганием и нижним боковым расположением клапанов очень давно (абзац 171). Позднее он же применил его на своем двигателе с воспламенением от сжатия и гильзовым распределением (см. рис. 124) и, наконец, на двухтактном двигателе (см. рис. 158, *1*). Термин «выжимание» (сквиш) стал обычным в английской литературе после использования его в лаборатории Рикардо.

341. Наиболее эффективным применением движения воздуха по принципу «выжимания» является сочетание его с вихрем, создаваемым на впуске в четырехтактных двигателях с клапанным газораспределением при расположении камеры в поршне (рис. 166, *a*) и двухтактном двигателе при расположении камеры в головке (рис. 158, *1*).

Первоначально предполагалось, что «выжимание» вызывает тороидальное движение, к которому собственно и были приспособлены камеры сгорания, такие как Заурер и А. Е. С. (рис. 166, *б*). Существовало мнение, что при этом осуществляется комбинация тороидального и вращательного движений, причем увеличение угловой ско-

рости вращения заряда достигается уменьшением диаметра камеры. Дикси, однако, показал, что комбинация вращения заряда вокруг оси цилиндра с эффектом вытеснения прежде всего приводит к усилению вращательного движения. Методом Алкока (нанесением алюминиевой краски определенной густоты на поршень и головку) Дикси зарегистрировал характер движения воздуха у стенок камеры проворачиванием коленчатого вала двигателя в течение определенного времени. Таким образом он нашел, что характер движения заряда у дна камеры такой же, как в пространстве цилиндра над поршнем, причем

Рис. 167. Сложное движение заряда, вызванное совместным действием вихря и вытеснения заряда



где-то на боковых стенках имеется «экватор», где заряд движется только горизонтально. Схематически движение заряда представлено на рис. 167, из которого видно, что характер этого движения очень сложный. Рикардо около 1930 г. в опытах с двигателем, имеющим гильзовое газораспределение (рис. 124), по наличию отложений сажи выяснил, что топливо увлекается внутрь камеры; но он разработал гипотезу о характере движения воздуха, которая позднее была опровергнута. При слишком высокой скорости вращательного движения заряда движение, направленное внутрь камеры, может привести к ярко выраженной тенденции к сажеобразованию из-за избытка топлива в ядре вихря, особенно при центрально расположенной форсунке. Это может одновременно сопровождаться чрезмерным проникновением топлива на периферию, что следует из рис. 167 и подтверждено практикой (сравните сказанное здесь с тем, что говорилось об эффекте тангенциальных продувочных окон двухтактного двигателя в абзаце 329).

342. Наиболее важным результатом действия вытеснителей является ускорение вращения за счет вытеснения вращающегося заряда в камеру меньшего диаметра, происходящее по законам свободного вихря с сохранением

момента количества движения. Таким образом, желаемая скорость вращения может быть достигнута при меньшем угле охвата ширмы клапана, а следовательно, при большем наполнении цилиндра в связи с тем, что наибольшие скорости заряда достигаются лишь в необходимом момент в конце сжатия, вследствие чего потери энергии заряда за счет трения оказываются небольшими. Как ясно из предыдущих иллюстраций, форсунка может быть расположена как в центре, так и сбоку камеры сгорания. Если форсунка расположена в центре камеры, в большинстве случаев используются распылители с четырьмя отверстиями. В двигателях, в которых вихрь создается на впуске и используется вытеснение заряда при сжатии, иногда получают очень благоприятные характеристики удельных расходов топлива, причем высокие средние давления цикла имеют место в широком диапазоне чисел оборотов. Без применения наддува достигается среднее индикаторное давление, равное 9—10 кг/см^2 , при приемлемой дымности отработавших газов.

343. Движение заряда, созданное в период горения. Любое горение, за исключением одновременного взрыва, вызывает движение заряда из-за расширения горящей части смеси. Если бы имелись только горючая смесь топливных паров и воздух в пространстве, имеющем простую форму, то горение не оказывало бы влияния на процесс смешения, так как все элементы объема либо расширялись бы, либо сжимались, не испытывая заметного относительного перемещения. В двигателе с воспламенением от сжатия смешение оказывается связанным со сгоранием вследствие:

- 1) наличия жидкого топлива в горячей струе;
- 2) движения заряда в зоне горения вследствие локальных различий в степени расширения;
- 3) конструктивных особенностей камер сгорания, вследствие которых расширение горящих газов происходит в виде направленного истечения во второе пространство камеры (принцип работы предкамерного двигателя, см. абзац 281).

344. Наличие жидкого топлива в горячей струе распыленного топлива обычно влияет на дальнейшее смешение неблагоприятным образом, так как горение, начинающееся в оболочке струи, отесняет окружающий ее воздух все дальше от ядра струи. Однако повышение тем-

пературы за счет сгорания ускоряет испарение, и пары топлива увлекаются воздухом в радиальном направлении. Одновременно резкое увеличение скорости испарения с момента начала горения влияет на развитие струи в пространстве камеры сгорания, так как быстродвигающиеся капли, испаряясь вследствие большей дисперсности, передают свой импульс окружающему воздуху. В результате струя становится более мягкой, чем она была бы, если горение начиналось позднее. Представляется сомнительным, чтобы такой характер струи был лучше с точки зрения горения в целом, чем описанный в абзаце 253. В тихоходных двигателях смешение происходит только при описанных выше условиях; в быстроходных двигателях влияние этих условий также частично имеет место, вследствие чего исследования развития струи в воздухе, имеющем комнатную температуру, дают, к сожалению, не столь ценные результаты, как хотелось бы получить. Были сделаны фоторегистрации горящих струй, но и они не помогли понять происходящих явлений. Только наблюдения за большими стационарными пламенами, проведенные Международным Комитетом исследования пламени, привели к разработке приемлемой техники исследований.

345. Увеличение турбулентности из-за неравномерного протекания процесса горения в струе само по себе в большой мере способствует смешению, но влияние это ограничено главным образом объемом струи.

346. Принцип работы предкамерного двигателя уже обсуждался при рассмотрении смешения, начинающегося только вследствие горения, в результате чего оказывается возможным смягчить взрывной характер начала процесса (абзац 281). Рассмотрим более подробно горение в целом при этом принципе организации процесса.

Первоначальная идея предкамерного двигателя заключалась в осуществлении воздушного распыливания в самой камере вместо использования для этой цели компрессора (Тринклер, Бронс). Так как для распыливания необходимо использовать около 10% всего воздуха, принимающего участие в горении, то было естественным начать опыты с предкамерами малого объема. Позднее этот объем все более увеличивался, особенно в двигателях небольших размеров, достигая иногда 50%. Давно уже был обнаружен положительный эффект концентрации топлива

вблизи отверстий, соединяющих обе части камеры сгорания, для чего струе была придана форма, соответствующая форме предкамеры, как показано на рис. 168, а, б, в (см. также рис. 119). Получилось нечто вроде горелки, в которую попадает топливо, испаряющееся за счет тепла от горячих стенок. Воспламенение происходит вблизи соединительных отверстий в зоне, где имеются достаточно мелкие частицы топлива, взвешенные в воздухе, содержащем также некоторое количество продуктов сгорания предыдущего цикла. Из рис. 163 ясно, что момент впрыска

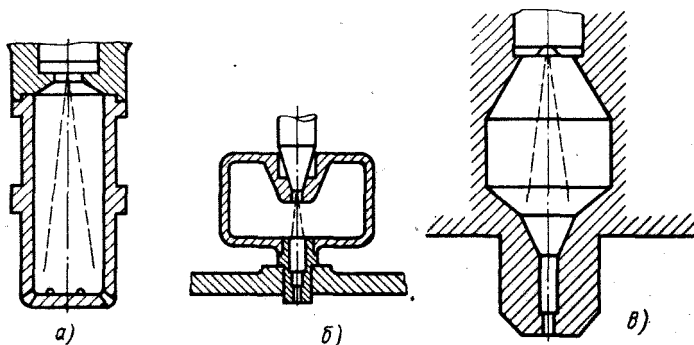


Рис. 168. Предкамеры различных типов

должен оказывать значительное влияние на процесс. Когда впрыск начинается слишком рано, струя топлива встречает сильный встречный поток воздуха, втекающего через соединительную горловину и отбрасывающего топливо назад в предкамеру, что противоречит приведенному выше представлению о характере процесса. В этом случае имеет место сильный стук при работе двигателя. Поэтому обычно в предкамерных дизелях впрыск устанавливается поздним, в результате чего по индикаторным диаграммам создается впечатление о чрезмерно позднем горении, иногда с отчетливо различимым максимумом давления сжатия (см. рис. 113, абзац 276).

347. Вызывал большие споры вопрос о том, происходит ли в результате действия предкамеры химическая газификация топлива или его испарение; оказывают ли горячие поверхности соединительной горловины каталитическое действие или нет, и другие подобные вопросы. Вероятно, в зависимости от конкретных условий имеет

место различная степень воздействия на струю горячей вставки предкамеры и распиливающего действия втекающего в предкамеру потока воздуха. На практике нашли применение как относительно холодные предкамеры (двигатели Кертинг и Катерпиллер), так и очень горячие, например в двигателе Даймлер-Бенц (см. рис. 119), в котором стремились получить максимальную поверхность контакта между струей и стенкой, а также затруднить теплоотвод от центральной части горячей вставки —

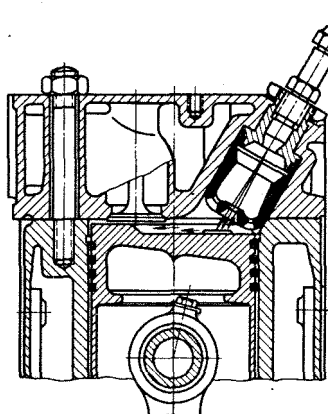


Рис. 169. Предкамера типа Ганц

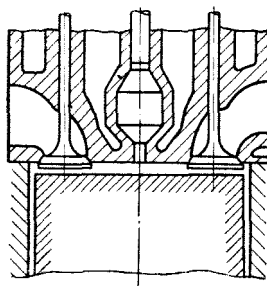


Рис. 170. Неоптимальное расположение предкамеры в двигателях ранних конструкций

горловины предкамеры. Последняя должна быть изготовлена из жаропрочного материала с малым коэффициентом теплопроводности. Можно считать, что достаточно полное испарение топлива происходит уже до того, как горячие газы начинают увлекать топливо в основную камеру сгорания; следы пламени в последней в виде равномерно осевшей сажи свидетельствуют в основном о существовании здесь типичных газовых пламен. В единственном случае (см. рис. 169) иногда имела место значительная газификация или во всяком случае происходил крекинг, сопровождающийся окислением..

348. В ранних конструкциях предкамерных двигателях уделялось мало внимания правильному направлению вытекающих из предкамеры газов и паров, которые сгорают диффузионно в пространстве цилиндра. По аналогии с форсункой для компрессорного впрыска предкамера помещалась в наиболее неудобном месте, а именно между

клапанами, где и без того обычно тесно. Это ухудшало условия охлаждения (рис. 170) и создавало технологические трудности. Весьма медленно, особенно в быстроходных дизелях, конструкторы переходили к применению наклонного расположения предкамеры и смещению ее оси с линии, соединяющей оси клапанов, причем последняя также несколько смещалась в сторону от оси цилиндра (рис. 171). Введя эти изменения, достигли улучшения горения, уменьшения удельного расхода топлива и увеличения среднего давления цикла. Оказалось, что используя

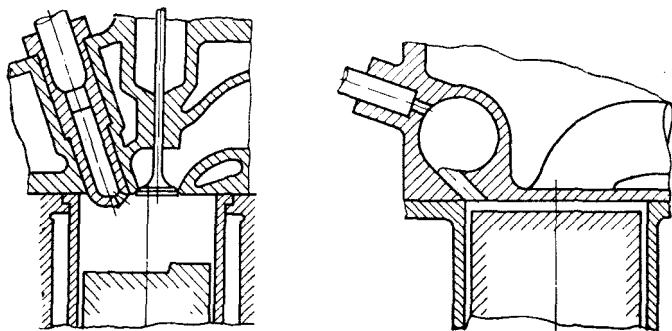


Рис. 171. Дополнительные камеры, расположенные сбоку, обеспечивающие большую площадь для расположения клапанов, но приводящие к несимметричной тепловой нагрузке поршня

одно большое соединительное отверстие (иногда два или три), создающее сильную газовую струю, которая не отклоняется от выбранного оптимального направления движения, можно получить необходимую турбулизацию в главном пространстве камеры сгорания и быстрое смешение. Современные предкамерные дизели практически все имеют описанные конструктивные отличия, за исключением таких форсированных четырехклапанных двигателей, как Мерседес-Бенц (рис. 172), МАН и др., когда преобладающими являются конструктивные соображения и стремление достигнуть равномерного нагрева поршня.

349. Интересно проследить, как изменялись взгляды Рикардо при создании предкамеры. Этот пионер в области конструирования двигателей сконструировал первоначально двигатель с вихревой камерой, основная идея которого заключалась в вытеснении как можно большего количества воздуха в камеру сгорания с вращательным

движением заряда (см. рис. 111). Этот двигатель, названный «Комета» из-за формы камеры сгорания в виде шара с хвостом, имел вполне хорошие для того времени (1932 г.) характеристики; процесс воспламенения происходил мягко вследствие действия горячей стенки (абзац 273) и концентрации топлива (абзац 286). Однако при увеличении нагрузки сильно возрастало догорание (см. индикаторные диаграммы на рис. 173) в результате того, что в цилиндре оставалось по меньшей мере 25% воздуха, причем процент этот увеличивался, как только начиналось горение в сферической камере. При этом смешение в цилиндре было плохим, а гидравлические потери на перетекание (абзац 339) достаточно большими.

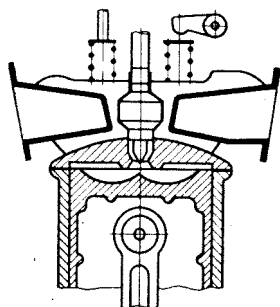


Рис. 172. Центральная расположенная предкамера в двигателе с четырехклапанной головкой

350. К тому же работа на минимальных числах оборотов холостого хода двигателей, предназначенных для автобусов и грузовых автомобилей, была очень шумной.

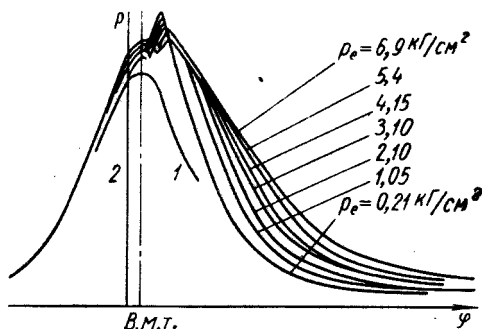


Рис. 173. Догорание топлива на линии расширения при больших нагрузках в двигателе с камерой типа «Комета»:

1 — сжатие-расширение; 2 — начало впрыска

Стремясь поднять температуру стенок горловины камеры и ускорить таким образом воспламенение, было решено уменьшить количество воздуха в вихревой камере, чтобы

приблизить в большей мере состав смеси в ней на малых нагрузках к стехиометрическому и обеспечить высокую температуру горения. Было хорошо известно, что температура горловины дополнительной камеры мало изменяется с режимом работы двигателя потому, что уже на умеренной нагрузке в ней достигается максимальная температура горения, а на большей нагрузке испарение и распад топлива вызывают охлаждение горловины (см. уменьшение температуры горения в бензиновых двигателях при богатых смесях, абзац 182). Уменьшение сферы не привело к уменьшению стука при работе на холостом ходу, вероятно, потому, что для этого смещение было слишком интенсивным. Хотя и было достигнуто сокращение периода задержки воспламенения, но в целом процесс был не очень «мягким». В связи с тем, что увеличился объем части камеры сгорания, расположенной в цилиндре, появилась возможность создать условия для лучшего проникновения горячих газов, вытекающих из вихревой камеры в воздух главной камеры сгорания в основном за счет придания правильных очертаний углублению в днище

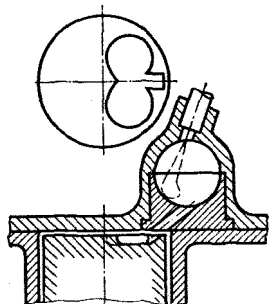


Рис. 174. Усовершенствованная камера сгорания Рикардо типа «Комета» с улучшенными условиями вытекания заряда в цилиндр

поршня, расположенному под горловиной, а именно, сделав углубления в форме двух маленьких круглых камер (рис. 174). Так была создана так называемая камера «Комета-III», в которой было получено очень хорошее сгорание и одновременно были значительно уменьшены гидравлические потери. Двигатель превратился в типичный предкамерный двигатель с довольно большой предкамерой, занимающей около 50% полного объема камеры сгорания. Как минимальный удельный расход топлива, так и достижимое значение среднего давления цикла были значительно улучшены по сравнению с первоначальной конструкцией.

351. Можно достигнуть основных особенностей работы предкамерного двигателя другим путем — впрыскивая топливо непосредственно в основное пространство горения, но направляя его так, чтобы часть топлива проникла в дополнительную камеру. По такому принципу работает

двигатель с так называемой воздушной камерой, о которой много писалось в тридцатых годах и которая получила распространение в двигателях некоторых моделей.

На рис. 175 приведены конструкции таких камер, а именно: упомянутая ранее акрокамера, более поздняя конструкция камеры сгорания типа Ланова, предложен-

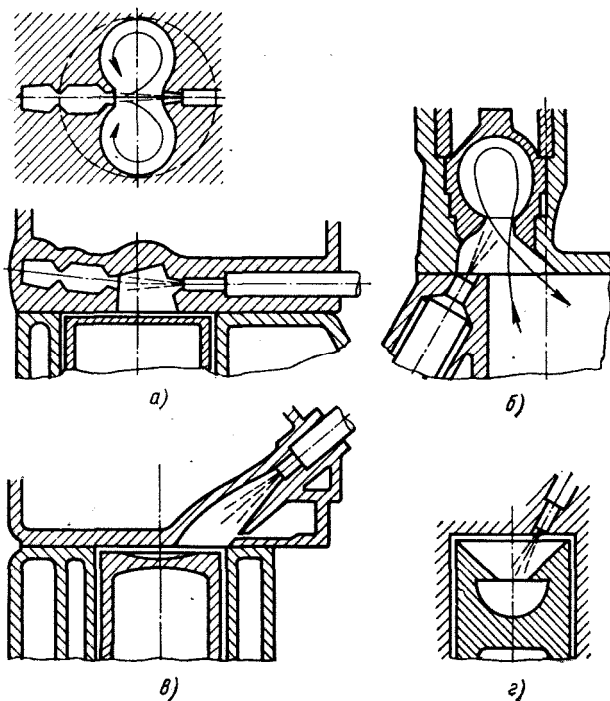


Рис. 175. Камеры сгорания различных типов со вспомогательными воздушными камерами:

a — Ланова; *б* — Акро-Заурер; *в* — МАН; *г* — Акро

ная Ф. Лангом (создатель насоса и форсунки типа Бош), и одна из ранних конструкций камеры типа МАН. В двигателе с акрокамерой идея первоначально сводилась к впрыску топлива против потока воздуха, вытекающего при расширении из дополнительной камеры, что должно было привести к позднему «мягкому» горению. В действительности в тех двигателях, которые производились коммерчески, некоторая часть топлива впрыскивалась

в дополнительную камеру при относительно раннем начале впрыска топлива. Влияние чрезмерно высоких скоростей воздуха вблизи горловины на воспламенение уже рассмотрено (абзац 270). Из-за больших гидравлических и тепловых потерь в дополнение к высокой интенсивности горения этот двигатель не получил применения. В двигателе с камерой типа Ланова уже намного меньшая часть струи попадает во вспомогательную камеру, а истечение газов из нее в основную камеру происходит приблизительно таким же образом, как в двигателе Рикардо (рис. 175). Результаты, достигаемые на этом двигателе, иногда оказывались очень хорошими, но чувствительность его к моменту воспламенения очень велика. В некоторых двигателях МАН функция дополнительной камеры сводилась лишь к турбулизации заряда на поздней стадии горения в правильно выбранном месте.

352. В двигателях с вихревой камерой, предкамерой и камерой, имеющей воздушный аккумулятор, имеет место неполное горение в одной из частей камеры из-за недостатка воздуха и истечение газов, образовавшихся в итоге горения, в другую часть камеры. О составе этих газов очень мало известно. В дополнение к СО и Н₂ возможно, с одной стороны, образование альдегидов и, с другой стороны, продуктов распада углеводородов, содержащих большой процент углерода. Эти газы могут способствовать увеличению отложений, если каналы, соединяющие обе части камеры, расположены на периферии цилиндра. О действительном влиянии этих каналов на работу двигателя также мало сведений. Имеются, впрочем, данные о том, что в смазочном масле вихрекамерных двигателей обнаруживается относительно много сажи и что в предкамерных дизелях больше лаковых отложений на поршне, чем в двигателях с непосредственным впрыском¹. Последнее явление может быть скорее следствием высокой температуры поршня, которая при прочих равных условиях в предкамерном двигателе выше, чем в двигателе с непосредственным впрыском, из-за сильной турбулизации, вызываемой горящими газами, вытекающими с большими скоростями из предкамеры в основную камеру сгорания»

¹ Это относится к случаю применения минеральных смазочных масел. При использовании современных масел с присадками ни в одно* из двигателей не наблюдаются чрезмерные загрязнения деталей и смазочного масла.

В двигателе с непосредственным впрыском теплопередача меньше также вследствие более низкой плотности продуктов сгорания ($\epsilon = 13 \div 15$ по сравнению с $\epsilon = 20$ и более в предкамерных двигателях). В дополнение к этому струи жидкого топлива, видимо, тоже производят некоторое охлаждающее воздействие на поршень.

353. Более низкие давления впрыска, допустимые в двигателях, имеющих интенсивное движение заряда, и возможность использования более простого распылителя, например штифтового или обычного закрытого однодырчатого, составляют важное практическое преимущество в эксплуатации двигателей с разделенными камерами. В этих камерах при наличии штифтового распылителя зависимость процесса впрыска от скоростного режима оказывается меньшей, чем в двигателях с неразделенной камерой, где используются обычные распылители, из-за более низкого давления впрыска и переменного проходного сечения отверстия в распылителе, а поэтому повышается приспособленность двигателей, использующих такие распылители для работы на автомобилях и тракторах. Штифтовый распылитель имеет, однако, тот недостаток, что струя из него направлена строго вдоль оси, и поэтому положение форсунки определяется желаемым направлением струи, что может вызывать затруднения при конструировании головки.

354. В заключение, подводя итоги, можно отметить, что в усовершенствованном двигателе с дополнительной камерой вследствие интенсивного смесеобразования (хотя и за счет более высоких тепловых потерь) для горения используется очень большой процент воздуха при бездымном выпуске, а следовательно, в таком двигателе можно достигнуть высокого среднего давления цикла и большой удельной мощности. Максимальная из известных литровая мощность предкамерного дизеля (четырёхтактного, без наддува) близка к 30 л. с./л; в унифицированном с ним бензиновом двигателе она достигает 50 л. с. 1л.

ДЕЙСТВИЕ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГОРЯЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ

355. О степени, в которой горячие поверхности при различной их температуре влияют на процессы смесеобразования и сгорания, сведений мало. Поэтому рассмотрим лишь качественно, как действуют горячие стенки

на развитие реакций, не прибегая к использованию недостаточно обоснованных цифровых данных, упоминаемых иногда в литературе.

356. Холодные стенки способствуют развитию реакций в смеси паров топлива с воздухом по холоднопламенному механизму, что приводит к образованию СО в небольших количествах и альдегидов (абзац 121). На рис. 176 показана зависимость содержания СО в отработавших газах дизеля в функции нагрузки. Видно, что содержание

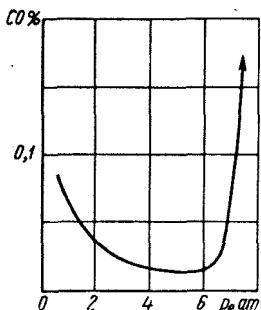


Рис. 176. Содержание окиси углерода в отработавших газах быстросходного дизеля в функции нагрузки

СО возрастает при уменьшении нагрузки ниже определенного значения из-за наличия в камере сгорания сочетания зон с бедной смесью (абзац 292) и холодных стенок. Если в заряде содержатся в виде пара или тумана тяжелые углеводороды, то в тех же условиях образуются окислоты и другие соединения, которые могут полимеризировать с образованием лакообразных отложений. При определенных условиях топливо может оставаться почти целиком в жидком виде из-за низкой температуры стенки. При очень небольших нагрузках отложения топлива на стенках цилиндра могут привести к разжижению смазочного масла, а в специфических местах, таких как участки у охлаждаемых распылителей, можно обнаружить даже тяжелые фракции топлива в жидком виде.

357. Следовательно, здесь происходит типичное догорание, которое особенно затягивается вблизи мест, где вершины факелов ударяются о стенки (абзацы 297, 307). В данном случае основной причиной затянутого догорания является местное аккумулятивное топлива; при повышении температуры стенки испарение топлива могло быть ускорено, но в любом случае высокое содержание паров топлива вблизи холодных стенок приводит неизбежно к образованию сажи. И действительно, в местах контакта струй со стенкой обнаруживаются значительные твердые отложения сажи даже при очень высокой температуре стенки, причем отложения эти имеют характер кокса, полученного в результате крекирования топлива, т. е.

содержат много углерода и мало кислорода. Очевидно, что отмеченный недостаток не может быть устранен только повышением температуры стенки, если не устраняется одновременно главная его причина, а именно — местный недостаток воздуха.

358. Наличие излишне дальнобойных струй или струй топлива, направляемых под некоторым углом на стенку, должно сопровождаться необходимой степенью интенсивности движения воздуха вдоль стенки; температура стенки при этом должна быть достаточно высокой для того, чтобы топливо, попадающее на стенку, исчезало бы с поверхности камеры как можно быстрее. Термин «парообразование» (испарение) намеренно не используется, так как не исключено, что при этом происходит возгонка топлива с образованием остатка; это не простое испарение, а комбинация его с окислением и крекированием. Если температура стенки и скорость воздуха выбраны правильно (сочетание это не является строго ограниченным; здесь имеется большая свобода выбора, если только обе величины не ниже определенного значения), то практически любое топливо можно сжечь быстро и полно. Опыт тысяч двигателей подтверждает сказанное.

359. В очень больших двигателях, имеющих толстые стенки, температуры деталей, особенно поршней, на полной нагрузке очень высоки и достигают 500°C , а иногда и выше. Примером может служить двигатель, показанный на рис. 157. Конструктивное решение, предложенное еще Гессельманом и состоящее в том, что поршень снабжается буртом для предотвращения попадания топлива на стенки цилиндра, оказалось не очень успешным. Эти бурты перегревались (иногда до $600\text{--}700^{\circ}\text{C}$), поэтому в дополнение к опасности появления трещин из-за различного расширения бурта и остальной части поршня иногда даже наблюдался прогар, причиной которого скорее всего являлась химическая реакция оксидной пленки с некоторыми продуктами сгорания топлива, особенно в случае присутствия ванадия и соли NaCl (абзац 409).

360. На практике не всегда имеет место наиболее оптимальное сочетание температуры стенки и движения заряда. В особенности это относится к небольшим двигателям при работе их на малых нагрузках, когда стенки нередко оказываются слишком холодными. В этом случае может происходить интенсивное догорание, а также неполное

горение с образованием СО, альдегидов, а иногда и лаковых соединений. Вследствие наличия несгоревшего топлива может наблюдаться даже более или менее значительное содержание в отработавших газах паров углеводородов или аэрозолей. При использовании современных очень легких специальных топлив для автомобильных двигателей с воспламенением от сжатия отличные результаты в решении рассматриваемой проблемы получены наряду с другими дизелями в дизеле МАН с М-процессом (см. рис. 123), который называют «шепчущим» двигателем.

ОПТИМАЛЬНОЕ СГОРАНИЕ В ДИЗЕЛЯХ

361. Как следует из сказанного выше, на практике процесс сгорания очень часто и во многих отношениях отклоняется от идеального процесса сгорания. Так как все эти отклонения так или иначе связаны с запаздыванием горения, то они проявляются внешне в увеличении удельного расхода топлива (здесь не затрагивается вопрос об очень небольших отклонениях, имеющих место уже до в. м. т.). При этом иногда могут иметь место небольшие изменения в тепловом потоке и, следовательно, температуре стенок, которые могут оказать некоторое компенсирующее или кумулятивное влияние. Представляет интерес выявление закономерностей влияния изменения формы камеры сгорания, интенсивности движения заряда и процесса впрыска топлива на удельный расход топлива при наиболее тяжелых режимах работы двигателя. При создании двигателя нового типа это всегда приходится делать, и такая доводка длится очень долго. Измерения должны делаться особенно тщательно для того, чтобы подметить даже очень небольшие систематически наблюдающиеся отклонения показателей двигателя в зависимости от тех или иных факторов.

362. При создании дизелей больших размеров, работающих с 100%-ным или более избытком воздуха, такая доводка в поисках оптимального варианта очень часто, к сожалению, не проводится. Причиной является то, что на номинальной нагрузке различия в показателях двигателя при различной организации процесса обычно невелики. Часто слишком мало внимания уделяется тому, что возможны перегрузки на 10% и более, а при отсут-

ствии доводки остается неизвестным, обеспечивается ли все еще достаточно эффективное горение также и при значительно более высоких нагрузках, что очень важно. Практика показывает, что если достигается эффективная работа при больших перегрузках, то при этом двигатель оказывается мало чувствительным к нарушениям нормального режима в результате износа, разрегулировки, смены топлива. В быстроходном двигателе с воспламенением от сжатия максимально достижимому среднему давлению цикла придается большее значение, и доводочные работы проводятся более тщательно.

363. Очень простым способом получения данных по особенностям горения в том или ином дизеле является испытание двигателя при использовании различных топлив, качество которых оценивается двумя главными параметрами; цетановым числом и летучестью.

Первым параметром определяется соответствие периода индукции, а вторым — соответствие дальнобойности проникновения струй геометрии камеры сгорания и скоростному режиму двигателя.

Летучесть, выраженная температурой, при которой возгоняется 65% топлива (метод ASTM), связана в большой степени с вязкостью, которая влияет на пробивную способность струй так же, как и летучесть; при этом низкая летучесть, соответствующая высокой температуре возгонки 65% топлива, и высокая вязкость приводят к увеличению пробивной способности струй и к уменьшению их дисперсности.

Если имеется в распоряжении серия различных топлив (их можно получить смешением топлив, имеющих крайние значения параметров), то следует измерить их расход:

а) на холостом ходу (особенно при высоких числах оборотов);

б) на режимах перегрузки, после грубой оценки того, какое из топлив обеспечивает получение максимальной мощности [38, 39].

После этого нужно построить графики, аналогичные графикам, показанным на рис. 177 и 178, где в дополнение к расходу топлива приведена также дымность отработавших газов. Уже на основании этих зависимостей можно сделать много интересных выводов относительно характера наиболее важных отклонений горения от идеального.

364. При работе двигателя на холостом ходу обычно наилучшие результаты получаются при работе с топливом, имеющим высокое цетановое число и большую летучесть (низкую температуру разгонки 65% топлива), однако не всегда в одной и той же степени. Цетановое число влияет на развитие горения во времени, в то время как от лету-

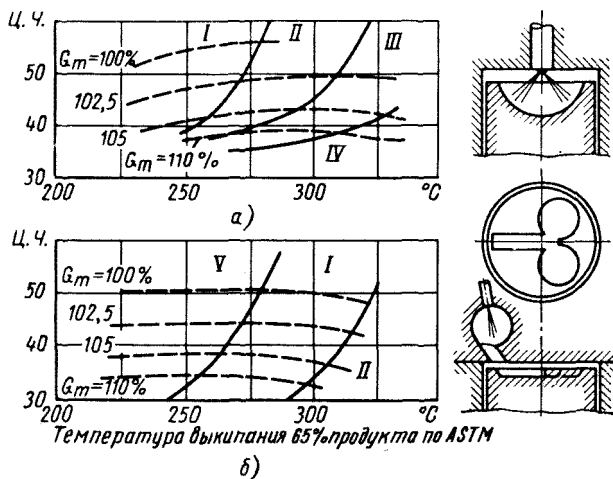


Рис. 177. Влияние цетанового числа и испаряемости топлив на дымность отработавших газов и расход топлива на режимах малых нагрузок:

/ — зона едва видимого дыма; // — зона со светло-голубым дымом; /// — зона с голубым дымом; IV — зона с серо-голубым дымом; V — зона бездымного выпуска; а — $n = 1500$ об/мин, $P_e = 0,65$ ат; б — $n = 1500$ об/мин; $P_e = 1,14$ ат; сплошные линии — границы зон дымления; штриховые — расхода топлива в процентах

чести в основном зависит степень попадания топлива на стенки. Последнее сопровождается появлением голубого дыма, который может в особых случаях сгущаться до серого тумана.

365. При работе двигателя на больших нагрузках нет однозначного влияния свойств топлива на работу двигателя, но нередко оптимум лежит ближе к низким цетановым числам, которые неприемлемы по таким причинам, как стук, работа на холостом ходу, пуск. Все вместе взятое может указать направление дальнейших поисков для достижения благоприятных условий работы дизеля на всех режимах.

366. Дым при работе двигателя на больших нагрузках бывает главным образом черным (сажа), но характер дымности может сильно различаться. Сажа в отработавших газах двигателя с вихревой камерой очень мелкая,

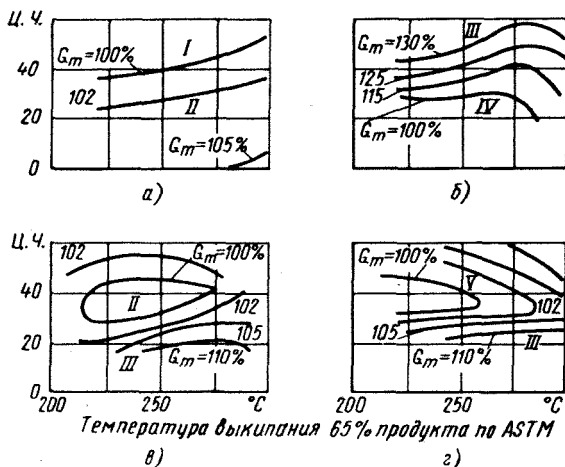


Рис. 178. Влияние цетанового числа и испаряемости топлива на дымность отработавших газов и расход топлива на режимах больших нагрузок в зависимости от типа двигателя:

I — зона бездымного выпуска; II — зона со светло-серым дымом; III — зона с черным дымом; IV — зона со слабым дымлением; V — зона с серым дымом; а — двигатель 1; $n = 850$ об/мин, $p_e = 6,9$ кг/см²;
 б — двигатель 2; $n = 1435$ об/мин; $p_e = 7,7$ кг/см²; в — двигатель 3; $n = 1400$ об/мин, $p_e = 6,4$ кг/см²; з — двигатель 4; $n = 1500$ об/мин; $p_e = 8,0$ кг/см²

сухая и черная; в небольших количествах она иногда придает отработавшим газам красноватый оттенок, если наблюдать струю отработавших газов на фоне чистого неба. Крупные частицы сажи свидетельствуют о том, что они образованы в зонах с недостаточно интенсивным движением заряда; темно-серый дым появляется в случае, если в отработавших газах имеются сажа и пары топлива.

Общие проблемы и последствия сгорания в двигателях

ЗАВИСИМОСТЬ МЕЖДУ ПРЕДЕЛОМ УДЕЛЬНОЙ МОЩНОСТИ И ГОРЕНИЕМ

367. Интересно выяснить, лимитируется ли и до какой степени развитие двигателей в направлении повышения удельной мощности процессом сгорания, и если нет, то что же лимитирует это развитие.

368. Наиболее просто выяснить этот вопрос применительно к двигателям с искровым зажиганием и гомогенным зарядом, в которых условия явно благоприятны: в этих двигателях горение происходит наиболее быстро при полном использовании всего кислорода. В дизелях возможно осуществить столь же быстрое горение, но для этого необходим достаточный избыток воздуха.

369. В связи с затронутой проблемой представляет интерес только действительная продолжительность основного горения; для начальной фазы горения (задержки воспламенения) может быть отведено достаточно времени в процессе сжатия. Правда, при очень высоких числах оборотов могут возникать проблемы, связанные с регулированием опережения зажигания [40]. Основной вопрос сводится к тому, как много энергии может быть превращено из химической в тепловую в течение интервала времени, отведенного для горения и соответствующего приблизительно 20° угла поворота коленчатого вала.

370. Несколько лет назад Лонгвелл [41] пытался найти предел скорости превращения энергии подачи в специальную бомбу пропано-воздушной смеси под высоким давлением. В этих исследованиях он в качестве оценочного критерия использовал относительное количество несгоревшей смеси.

Плотность смеси изменялась в широких пределах. В использованной им установке смесь подавалась непрерывно через большое число отверстий и отводилась через другие отверстия, т. е. имела место стационарная реакция, причем считалось, что практически реакция идет в гомогенной среде. Однако возможна и другая интерпретация: можно предположить, что имело место турбулентное горение со скоростью, соответствующей скорости поступления смеси. При этом происходило быстрое горение примерно такого же типа, как в двигателях с искровым зажиганием.

371. Опыты показали, что скорость превращения в бомбе Лонгвелла является функцией второй степени от плотности смеси и одновременно зависит от ее состава. Из этого следует, что решающим фактором является действительная скорость реакции между двумя реагентами, а не скорость поступления смеси.

Если рассматривать весь процесс разделенным на турбулентную диффузию и локальное распространение пламени с нормальной скоростью u_n в спокойных зонах, можно получить сопоставимые результаты, охватывающие как опыты на бомбе Лонгвелла, так и опыты в камерах сгорания двигателей.

372. Можно принять, что скорость u_n равна $0,5$ м/сек при комнатной температуре и коэффициенте избытка воздуха, равном единице. Соответствующее значение u_n в двигателе при температуре в конце сжатия на основании опытов, выполненных при высоких температурах с керосиновыми горелками, а также на базе экстраполяции результатов других опытов, может быть принято равным 5 м/сек. Предположим, что турбулентное распространение пламени в бомбе Лонгвелла проходило со скоростью звука, равной 330 м/сек, в то время как в двигателе оно идет со скоростью смеси на впуске, например, равной 50 м/сек, которая полностью трансформируется в турбулентность. Путь, который должен был быть пройден пламенем, составлял около $2,5$ см; в двигателе путь пламени может быть принят равным 5 см.

373. Примем размеры застойных зон, которые локально должны охватываться реакцией со скоростью нормального распространения пламени, равными $0,1$ мм в случае опытов Лонгвелла и 1 мм — в двигателе. При этом время завершения реакции может быть получено на основании измерения толщины фронта пламени в горелке Бунзена.

Достаточно разумная оценка дает и для бомбы Лонгвелла и для двигателя величину, равную 0,1—0,2 мсек, причем в обоих случаях плотность несгоревшей смеси принята равной 10 * (табл. 6).

Т а б л и ц а 6

Состояние смеси	Время в сек			Примечание
	турбулентного переноса	распространения реакции в застойных объемах	завершения реакции	
Неподвижная или ламинарно-текущая	—	$\frac{0,05}{0,5} = 0,1$ **	0,0002	Пламя горелки Бунзена, атмосферная плотность
Турбулизируемая	$\frac{0,05}{50} = 0,001$ *	$\frac{0,001}{5} = 0,0002$	0,0001—0,0002	Бензиновый двигатель, плотность 10
Непрерывный поток	$\frac{0,025}{330} = 0,00008$ *	$\frac{0,0001}{0,5} = 0,0002$ **	0,0001—0,0002 **	Предельные условия в бомбе Лонгвелла, плотность 10

* Не зависит от состава смеси.

** Зависит от состава смеси.

374. Данные, приведенные в таблице, показывают, что действительно лимитирующей в бомбе Лонгвелла является именно скорость реакции; турбулентное распространение пламени занимает там пренебрежимо малое время. В двигателе же именно время распространения пламени является лимитирующим фактором, из чего можно заключить, что интенсивность горения может быть увеличена за счет:

- 1) использования более высокой скорости впуска;
- 2) уменьшения линейных размеров камеры;
- 3) усиления турбулизации другими способами [42].

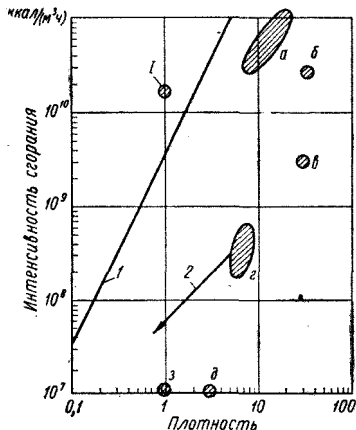
375. Максимальное значение интенсивности сгорания, достигнутое в двигателях, может быть с достаточным для данной цели приближением оценено следующим обра-

* Т. е. в 10 раз большая, чем при атмосферных условиях. *Прим. ред.*

зом: примем удельную мощность равной 100 (150) л. с./л. Эта удельная мощность получена при расходе тепла, равном 2000 ккал/л. с. ч); при этом тепло превращено в работу в объеме, равном

Рис. 179. Сравнение интенсивности сгорания, имевшей место в различных технических процессах, с предельными данными, полученными в опытах Лонгвелла:

1 — зона свечения горелок Бунзена; а — бензиновые двигатели; б — дизель (максимальное значение); β — ракеты; з — авиационные газовые турбины; д — стационарные газовые турбины; 1 — предельная зависимость по опытам Лонгвелла для теоретически правильной пропано-воздушной смеси; 2 — эффект высоты; 3 — высокоэффективные промышленные топки



0,1 дм^3 , что соответствует объему камеры сгорания при $\epsilon = 11$, за $\frac{20}{720}$ сек полного времени работы двигателя¹. Удельная скорость тепловыделения

$$W = \frac{720 \cdot 100 \cdot 2000}{20 \cdot 0,0001} \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}) = 7,2 \cdot 10^{10} \text{ ккал}/(\text{м}^3 \cdot \text{ч})$$

или приблизительно 10^{11} ккал/(м^3 ч), что свидетельствует о наличии очень большого запаса по сравнению со значениями, полученными в опытах Лонгвелла, показанными графически на рис. 179. При плотности, равной 10, различие 10-кратное, причем оно было бы больше при повышении степени сжатия и применении наддува. Прежде всего важно знать, возможно ли достигнуть рациональным способом большей турбулизации заряда, что необходимо для интенсификации горения. В связи с этим следует, во-первых, иметь в виду, что скорости впуска более 100 м/сек приемлемы только в тех случаях, когда энергия отработавших газов используется для облегчения процесса наполнения.

¹ Автор исходит из продолжительности основной фазы сгорания, равной 20° угла поворота кривошипа, что для быстрого двигателя явно мало. Прим. ред.

376. Во-вторых, нужно помнить, что при повышении плотности заряда решающее значение приобретает проблема теплоотвода через стенки камеры сгорания, особенно через днище поршня. Последнее вытекает также из того, что интенсивность горения в случае дизелей значительно меньше. Максимальное значение скорости превращения энергии в условиях дизеля, показанное на графике, подсчитано на основании максимальных показателей двигателя Нэпир Номад, которые не достигнуты в других двигателях. Отставание дизелей от бензиновых карбюраторных двигателей не является следствием относительного несовершенства процесса смесеобразования; ведь всегда можно в дизеле эффективно использовать, по меньшей мере, 75% воздуха, и даже с учетом относительно невысокого индикаторного к. п. д. при максимальной нагрузке удельная мощность дизеля не должна быть ниже 65% от соответствующего значения в бензиновом двигателе. Отсюда следует, что в дизеле очень многого еще можно достичь совершенствованием конструкции.

377. Очень низкие значения интенсивности горения, получаемые в камерах газовых турбин, связаны с необходимостью крайне экономно расходовать энергию на создание турбулизации: нельзя затрачивать более 5—10% общей кинетической энергии заряда. Причина этого заключается не только в относительно низком к. п. д. цикла, но также в крайне большом расходе воздуха. Тепловая нагрузка стенок здесь также оказывается существенным лимитирующим фактором.

ДОПОЛНИТЕЛЬНЫЕ ПОСЛЕДСТВИЯ ГОРЕНИЯ

378. К дополнительным эффектам горения относятся загрязнение, коррозия, износ [43]. Если та или иная машина подвержена только термическим и механическим нагрузкам при температурах ниже зоны ползучести металла, то в принципе оказывается возможным создание конструкции с практически неограниченным сроком службы. Для этой цели фактические напряжения в материале каждой детали должны оставаться ниже пределов усталости для соответствующего материала при рабочей температуре детали. Смазка движущихся частей должна удовлетворять определенным минимальным требованиям, а именно: должна быть обеспечена чисто жидкостная

смазка всех деталей при высоких относительных скоростях, причем непосредственный контакт металлических поверхностей допускается только при условиях, исключающих явление задира, истирания и коррозионного износа. Все эти проблемы могут быть решены при конструировании, правильном выборе материалов, размеров и качества обработки поверхностей. В последующем изложении эти вопросы не рассматриваются.

379. В поршневых двигателях, кроме механических и тепловых нагрузок, имеют место химические процессы, которые могут вызвать:

1. Осаждения или отложения на деталях, затрудняющие их работу (см. абзац 381 и последующие).

2. Изменение свойств смазочного масла или исчезновение его с определенных мест (см. абзац 393 и последующие).

3. Уменьшение допустимых с точки зрения усталостной прочности напряжений вследствие химической коррозии (абзац 400).

4. Разрушение поверхности материала химической коррозией (см. абзац 401 и последующие).

Из-за этих нарушений необходимо часто осматривать двигатели. Осмотры нередко сопровождаются очисткой и сменой деталей, ставших дефектными. Опыт показал, что по возможности необходимо планировать такие осмотры и не задерживать замену частей до того, как нарушение условий работы станет опасным, и в результате двигатель окажется неработоспособным (предупредительное обслуживание). Эти операции всегда в той или иной мере ухудшают экономичность использования двигателя как из-за стоимости самих работ, так и вследствие того, что двигатель или в некоторых случаях целый агрегат, составной частью которого этот двигатель является, находится в нерабочем состоянии в течение определенного периода времени. В этом отношении особенно невыгодны уже изношенные двигатели. Дизели, которые при их внедрении очень рекламировались в качестве наиболее экономичного теплого двигателя, оказались таковыми только с точки зрения к. п. д. Хотя топливо, необходимое для их эксплуатации, было относительно дешевле, повышенная стоимость обслуживания и ремонтов приводила к тому, что полная стоимость эксплуатации на 1 л. с./ч оказалась высокой. С течением времени эти показатели были улуч-

шены, и быстроходные дизели нашли применение на грузовых автомобилях, автобусах и тракторах, вытесняя бензиновые двигатели вследствие использования более дешевого топлива и более высокой экономичности. Сравнение степени загрязнения двигателей всевозможными отложениями оказалось не в пользу дизеля. Вследствие высокого износа цилиндров и поршневых колец у бензинового двигателя конструкторам и технологам пришлось решать большую проблему, когда автомобили стали универсальным средством повседневного транспорта.

380. Все приведенные выше проблемы возникли в тридцатых годах. Тогда же они были изучены и в принципе разрешены. Однако полное использование этих решений было повсеместно осуществлено только после второй мировой войны, что привело к весьма значительному улучшению экономичности эксплуатации поршневых двигателей различных типов. Последняя большая проблема аналогичного типа, которая была решена только после 1950 г., заключалась в обеспечении надежной эксплуатации при малой стоимости обслуживания судовых дизелей, сжигающих дешевое тяжелое нефтяное топливо (на 30—50% более дешевое, чем дизельное). Это обстоятельство помогло судовым дизелям выдержать конкуренцию с современными, весьма совершенными силовыми установками — паровыми турбинами. Ниже приведен обзор основных затронутых проблем с ссылками на абзацы, в которых уже рассматривались причины и следствия отдельных явлений.

НЕЖЕЛАТЕЛЬНЫЕ ОСАЖДЕНИЯ И ОТЛОЖЕНИЯ

381. **Осаждение топлива.** Бензин может осаждаться практически только в холодном двигателе непосредственно после пуска. При этом он может смыть пленку смазочного масла со стенок цилиндра (абзац 402).

Керосин, примененный в карбюраторных двигателях (старые тракторные двигатели), осаждается даже тогда, когда двигатель прогрет, и приводит к разжижению смазочного масла. Это обычно компенсировалось применением смазочного масла высокой вязкости и никогда не причиняло особых затруднений при эксплуатации указанных двигателей, имевших низкую степень сжатия и умеренную форсировку.

Дизельное топливо обычно не осаждается на стенках. Оно практически осаждалось только в нефтяном двигателе Гессельмана с искровым зажиганием и несколько разжижало смазочное масло, поэтому масло нужно было чаще менять. При этом стоимость эксплуатации повышалась.

Осаждение нефтяного топлива более вредно в двигателях, работающих значительное время на режимах малых нагрузок, так как нефть со своими остаточными компонентами способна образовать больше сажи, чем само смазочное масло (на поршне, в выпускных каналах). Для уменьшения сажеобразования необходимо стремиться к улучшению процесса горения и, кроме того, избегать длительной эксплуатации на малых нагрузках всех дизелей, работающих на нефти, кроме очень больших тихоходных судовых двигателей, или переходить на использование более легкого топлива.

382. Осаждение воды и водных растворов. Углеводороды в результате горения образуют воду в количестве, несколько превышающем массу самого сгоревшего топлива. Вода эта в холодном двигателе начинает осаждаться. В бензиновом двигателе вода осаждается в большей степени, чем в дизеле, так как коэффициент K_C здесь всегда равен единице и более, особенно при холодном двигателе. Парциальное давление паров воды при этом столь велико, что точка росы лежит примерно около 50°C . До достижения стенками цилиндра этой температуры они оказываются покрытыми осевшей водой. Это относится также к прочим деталям двигателя (картер, крышка головки, картер распределительных шестерен) вследствие утечки продуктов сгорания, содержащих водяной пар, вдоль поршней и стержней клапанов. Это осаждение воды, которое обнаруживается в виде тонкой эмульсии в смазочном масле, может быть весьма вредным и опасным из-за собирания на поверхности капелек воды загрязнений и продуктов окисления (рис. 180) как следствие образования диполей этих продуктов и воды. Когда по мере прогрева двигателя вода испаряется, твердые частички остаются и могут при дальнейшей коагуляции образовать отложения в самом масле, в полумесяце коленчатом вале (нарушение смазки), под крышкой головки и в других полостях.

Коррозия может быть вызвана также присутствием в конденсате кислот, образовавшихся в процессе горения, которые способствуют износу цилиндров и поршневых

колец (см. рис. 181, абзац 401). Скорость износа поршневых колец измеряется потерей массы кольца на каждый галлон израсходованного топлива.

383. Наиболее эффективное средство борьбы с указанными явлениями — ускорение процесса прогрева (воздушное охлаждение; водяное охлаждение с термостатом, обеспечивающим перепуск воды, минуя радиатор). Препятствуют коагуляции сажевых частиц присадки

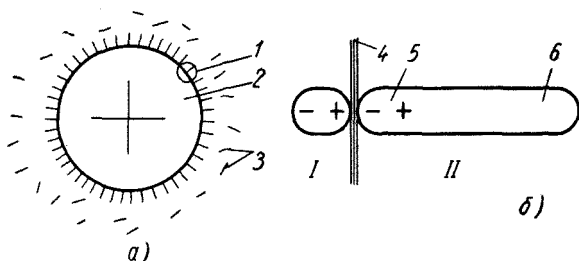


Рис. 180. Схематическое представление влияния содержания воды в масле на накопление кислородных соединений с заряженными концевыми группами:

/ — водная фаза; // — масляная фаза; а — общая схема; б — деталь схемы в увеличенном масштабе; 1 — деталь; 2 — капля воды; 3 — кислородные соединения, расположенные хаотично в масле; 4 — разделяющая поверхность; 5 — поляризованная оксигруппа; 6 — нейтральный СН-радикал

к смазочному маслу, обладающие диспергирующим (рассеивающим) действием, — так называемые моющие присадки. При этом твердые частички остаются взвешенными в масле и оказываются безвредными.

384. Осаждение воды в дизелях имеет место в значительно меньшей степени вследствие намного большего избытка воздуха (коэффициент KC при холостом ходе равен около 0,15), но во многих случаях это осаждение воды более вредно вследствие содержания в топливе серы. Сера первоначально сгорает в относительно безвредную двуокись серы SO_2 , которая, однако, вблизи стенки цилиндра может превратиться в трехокись серы SO_3 в результате каталитического действия кислородсодержащих соединений углеводородов и металлических частиц. Поэтому возможно образование разбавленной серной кислоты, обладающей намного более высокой точкой росы и приводящей к усиленному коррозионному износу (см. абзац 401 и последующие). Соединение SO_3 само по себе

также может оказать воздействие на смазочное масло, окисляя и науглероживая его, что может нарушать нормальные условия смазки поршня.

385. Отложения (продукты окисления) могут образоваться вследствие неполного горения топлива и смазочного масла. В очень редких случаях отложениями могут

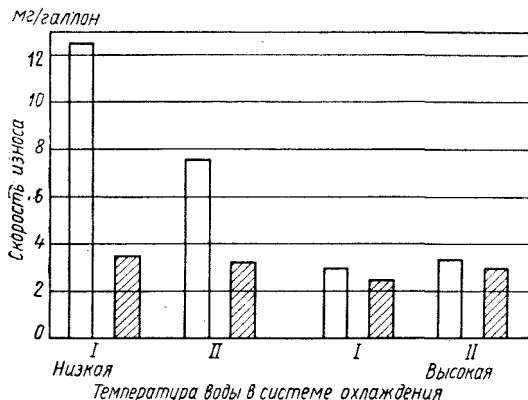


Рис 181. Влияние температуры воды в системе охлаждения на износ поршневого кольца:

/ — лабораторные испытания; // — дорожные испытания; незаштрихованные прямоугольники — результаты, полученные с минеральными маслами без присадок; заштрихованные прямоугольники — результаты, полученные с маслами, содержащими щелочные присадки

быть частицы пыли, попавшей в двигатель из атмосферы. Отложения называются первичными, когда они образуются в тех местах, где обнаруживаются, или вторичными, когда они выпадают из циркулирующего смазочного масла вследствие конденсации воды (абзац 382), экранирования, фильтрации или центрифугирования.

386. Образование первичных отложений продуктов окисления. Оно происходит:

1. В пространстве камеры сгорания (сажа, образовавшаяся из смазочного масла, тяжелого топлива в дизелях; коксовые раструбы на распылителях, см. абзац 318). Такие отложения могут вызвать преждевременное воспламенение в бензиновых двигателях и нарушение смесеобразования в дизелях.

2. На стенках цилиндра и на поршне, особенно в канавках для колец и на участках поршня между и над

поршневыми кольцами (лакообразование — см. абзац 122 и сажеобразование — абзац 125). Эти отложения могут вызвать пригорание поршневых колец, приводящее к неправильной их работе (пропуск газов) и перегреву поршней (прихват, задир). Отложения за поршневыми кольцами или на участках между ними, образованные при работе двигателя на малой нагрузке, могут вызвать мгновенный прихват (задир) на увеличенной нагрузке.

3. В выпускных окнах (двухтактные двигатели). Эти отложения могут привести к ухудшению продувки.

4. На стержнях выпускных клапанов. Эти отложения могут привести к неполному закрытию клапанов и, как следствие, их выгоранию.

387. Сильные лаковые отложения на малой нагрузке (абзац 299) или при позднем угле опережения впрыска в дизеле могут привести к захвату (заеданию) поршня в холодном состоянии (эти отложения растворяются спиртом). Избавиться от лако- и коксообразования можно снижением температуры поршневой группы (улучшение конструкции деталей, правильный выбор материала, принудительное охлаждение), увеличением сопротивляемости окислению смазочного масла (абзац 112) и добавкой диспергирующих присадок к маслу. Если, как в случае дизелей, сера, содержащаяся в топливе, оказывает влияние вследствие образования SO_3 , которое окисляет смазочное масло, то также полезной может оказаться добавка в масло основных (щелочных) присадок.

388. Удалось создать присадки, оказывающие диспергирующее действие, увеличивающие стойкость против окисления и в то же время являющиеся щелочными; это некоторые кальциевые мыла органических кислот, которые в дополнение к смоляной кислоте содержат длинные алкильные хвосты. Эти в высшей мере универсальные присадки были получены в результате значительного развития науки и технологии в области смазочного масла. Быстроходные дизели с этими присадками работают длительное время без дефектов. В то же время было доказано, что присадки предотвращают коагуляцию продуктов окисления и других отложений в бензиновых двигателях.

389. Теоретически для достижения рассеивающего эффекта достаточно содержания в масле очень небольшого процента диспергирующей добавки (несколько десятых долей процента). В действительности вследствие присут-

ствия продуктов окисления создаются условия [44], стимулирующие выпадение осадка. Только при значительно более высокой концентрации моющей присадки (несколько процентов) действие ее оказывается положительным в течение приемлемого периода работы.

390. Образование вторичных отложений продуктов окисления. Отложений можно полностью избежать равномерным рассеиванием продуктов окисления в смазочном масле. Сажа, которая никогда не осаждается в виде первичного отложения в недопустимых количествах, может также поддерживаться во взвешенном состоянии с помощью рассеивающих (диспергирующих) добавок.

391. Образование первичных зольных отложений. Они имеют место в бензиновых двигателях из-за выделений свинца из ТЭС в камере сгорания, особенно при наличии расслоения топлива во впускной системе (абзац 214). В случае образования корки нагара, что имеет, например, место в автомобильных двигателях при их работе на режимах малых нагрузок, окислы свинца могут активировать локальное развитие предпламенных реакций, завершающихся самовоспламенением (см. например, пассивирующее действие трикрезилфосфата, абзац 87).

На изоляторах свечей зажигания могут появляться отложения, вызывающие нарушения работы свечей зажигания. И в этом случае трикрезилфосфат оказывает положительное воздействие. Соединения свинца, образованные в результате реакции с металлом выпускных клапанов, очень хрупкие и быстро разрушаются, приводя к неплотности прилегания клапанов. Избежать этого можно правильным распределением ТЭС и бромида, изготовлением седел клапанов из твердого металла, надлежащим охлаждением (возможно применение клапанов с внутренним натриевым охлаждением), принудительным вращением клапана. Отложения на стержне также могут привести к неплотному закрытию клапана.

В дизелях зола из топлива (особенно из нефти) может осаждаться на носике распылителя, иногда на днище поршня и в небольших количествах на стенке цилиндра.

В каждом из двигателей этих типов может отлагаться зола из смазочного масла с присадками, содержащими мыльно-металлические комплексы, в канавках поршневых колец и на перемычках между ними, в выпускных окнах и на стержнях выпускных клапанов. Эти отложения в

целом невелики, если количество и активность присадки подобраны правильно, т. е. так, чтобы эффективно предотвращать образование SO_3 (а из него CaSO_3) и одновременно препятствовать окислению и чтобы отложения были маслянистыми.

392. Образование вторичных зольных отложений. Вторичные зольные отложения встречаются в бензиновых двигателях в виде отложений окисей свинца вследствие центрифугирующего действия в соответствующих полостях вращающихся деталей (широко известны были отложения в шатунной шейке коленчатого вала и фрикционных муфтах привода центробежного нагнетателя в некоторых авиационных двигателях). Отложения переносимых с газами зольных остатков (преимущественно из нефтяного топлива судовых дизелей) в турбинах, работающих на отработавших газах, могут также быть отнесены к этой категории. Эти отложения ведут к уменьшению производительности турбоагнетателя; их необходимо периодически удалять путем промывки горячей водой или соответствующей обработкой в процессе эксплуатации, например, с помощью скорлупы земляных орехов. Главным фактором, влияющим на появление этих отложений, является температура отработавших газов. Ниже определенного значения этой температуры отложений нет. Это привело к необходимости ограничения коэффициента KC величиной 0,4 или меньшей ($a > 2,5$) на полной нагрузке в современных двухтактных судовых двигателях с высоким наддувом.

ИЗМЕНЕНИЕ СВОЙСТВ СМАЗОЧНОГО МАСЛА

393. За счет окисления может возрасти вязкость масла. Только в чисто парафинистых маслах без ингибиторов это создавало опасность для нормальной циркуляции смазочного масла. Кроме того, образование кислот, от которого зависит отмеченное явление, могло оказать влияние на покрытия подшипников (свинцовистые и кадмиевые сплавы), причем очень существенное при температурах выше критической (около 150°C). Увеличение вязкости имеет место также при очень сильном окислении масел других типов, при эксплуатации которых также может появляться нежелательная тенденция к образованию твердых продуктов окисления. Все эти явления были

исключены в маслах современных двигателей соответствующим выбором их состава, очистки и применением присадок.

394. Значительное отложение сажи на пленке смазочного масла, покрывающей цилиндр, приводит к накоплению сажи в смазочном масле (особенно в некоторых дизелях с вихревой камерой сгорания) иногда до 5% и выше, что также увеличивает вязкость. Однако этого можно в значительной мере избежать, используя диспергирующую добавку. Тогда смазочное масло даже после накопления в нем сажи все еще пригодно для использования с точки зрения его основной функции — смазки, однако при таком масле снижается предохранительное действие присадки. Уменьшение вязкости вследствие конденсации топлива было уже рассмотрено выше.

395. Местами, с которых пленка масла может и даже должна исчезнуть за счет испарения и окисления, являются головка поршня и стержень выпускного клапана. Температуры металла, качество и количество подаваемого масла должны быть подобраны таким образом, чтобы исчезновение масляной пленки имело место выше области, охватываемой поршневыми кольцами в цилиндре и стержнем клапана в его направляющей. Этого, оказывается, возможно достигнуть при современных стабильных к окислению маслах в сочетании с конструктивными решениями, при которых верхнее поршневое кольцо не нагревается заметно выше 200° С даже при очень низких скоростях расходования масла.

396. В первые годы эксплуатации быстроходных дизелей применяли смазочные масла с нефтяной основой и расход смазочного масла умышленно увеличивали, применяя большие зазоры в поршневых кольцах, а иногда даже отказывались от применения маслосбрасывающих колец для обеспечения надлежащей смазки компрессионных поршневых колец и устранения отложений.

В судовых дизелях для смазки цилиндров применялись очень тяжелые и вязкие очищенные масла из нефтяных остатков.

397. В бензиновых двигателях для обеспечения гарантированной смазки поршня также в течение многих лет широко применялось смазочное масло из нефтяных остатков и даже касторовое масло. Тогда не только верхнее поршневое кольцо, но нередко также юбка поршня ока-

зывались в опасном состоянии. Юбка поршня вследствие деформации могла подвергаться очень высоким местным нагрузкам и соответственно высоким температурам, развивавшимся в результате трения. Повышенная вязкость и низкая испаряемость масла обеспечивали наилучшую гарантию против таких поломок. Современные совершенные конструкции и качество обработки деталей двигателя, а также высокая стойкость к окислению смазочного масла сделали возможным применение дистиллятных масел, имеющих сравнительно низкую вязкость и высокий индекс вязкости при чрезвычайно низком расходе масла. Низкая вязкость масла способствует получению высокого механического к. п. д., и, таким образом, все рассмотренные мероприятия в очень большой мере помогли улучшить общий эффективный расход топлива в автомобильных двигателях.

398. Для поддержания действия присадок, особенно кальциевых, масло должно достаточно часто меняться. Хотя этот расход масла с финансовой точки зрения эквивалентен расходу его через поршневые кольца, он более приемлем с точки зрения сохранения чистоты и повышения срока службы двигателя.

399. Следует отметить, что во многих автомобильных двигателях до настоящего времени не решена проблема смазки пары распределительный вал — толкатель.

В некоторых случаях оказалось необходимым применять специальную присадку для предотвращения истирания этих деталей.

СНИЖЕНИЕ УСТАЛОСТНОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ

400. Снижение пределов усталостной прочности может иметь место вследствие коррозии деталей. Из сказанного выше очевидно, что это может произойти в первую очередь тогда, когда имеются осадения влаги. Особенно чувствительными в этом отношении деталями являются пружины клапанов. Явления конденсации не ограничиваются периодом прогрева, но могут происходить и при работе двигателя под нагрузкой в результате прорыва продуктов сгорания мимо поршней и стержней клапанов, если пространство, в котором находятся клапаны (пространство под крышкой головки), остается достаточно холодным. Для предупреждения коррозии пружин надо так организовать вентиляцию картера и вспомогательных поло-

стей, чтобы под крышку головки просасывалось достаточное количество воздуха. В дополнение к этому кадмиевое покрытие пружин клапанов также предотвращает их коррозию.

ИЗНОС

401. При коррозии трущихся поверхностей силами трения удаляется подверженная коррозии поверхностная пленка металла. Далее подверженной коррозии оказывается следующая пленка и т. д. Коррозия является главной причиной высокого износа, происходящего как в бензиновых двигателях, так и в дизелях в период прогрева (см. абзацы 382, 384). Однако при этом имеют место и другие более сложные явления.

402. В бензиновом двигателе осаждающаяся вода агрессивна из-за растворенной в ней CO_2 и органических кислот [45]. В холодном двигателе имеет место смывание смазки бензином, находящимся в жидком виде в холодной смеси. Как следствие, происходит более интенсивный контакт между поршневыми кольцами и стенкой цилиндра, что может вызвать истирание металла. Опасность несколько смягчается тем, что в бензиновом двигателе на малых нагрузках низки давления сгорания. Как уже отмечалось, быстрый прогрев стенок цилиндра и впускной системы значительно уменьшили интенсивный износ в период пуска, прогрева.

403. Смазочное масло, содержащее присадки, действует в данном случае как очень сильное защитное средство вследствие наличия в нем полярных групп, а также из-за своей щелочной природы, в то время как хромирование верхнего поршневого кольца снижает скорость механического износа. Бензин в настоящее время очищается так, что он практически не содержит серы. Полная очистка бензина от серы осуществляется еще и потому, что сера оказывает отрицательное воздействие на активность ТЭС в подавлении детонации. Вследствие этого в последнее время оказалось возможным вновь вернуться к применению смазочных масел без щелочных присадок. Это уменьшило отложения в камере сгорания, особенно в сильно недогруженных американских автомобильных двигателях.

Совместный эффект всех указанных улучшений привел к увеличению срока службы цилиндро-поршневой группы

до значений, соответствующих пробегу в пределах 100 000—200 000 км, в то время как до 1940 г. во многих случаях пробег не превышал 25 000—50 000 км, несмотря на то, что удельная мощность за тот же период возросла от 25—30 л. с./л до почти удвоенного в ряде случаев значения.

404. В дизелях причиной большого износа гильзы цилиндра и поршневых колец является главным образом сера, содержащаяся в топливе. В холодном двигателе износ деталей действительно очень велик (рис. 182), и

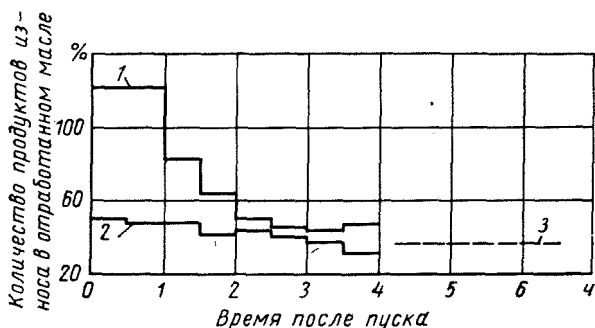


Рис. 182. Влияние предварительного подогрева охлаждающей воды на износ дизеля в период пуска:

1 — холодный пуск (15° С); 2 — горячий пуск (60° С); 3 — конечный уровень износа

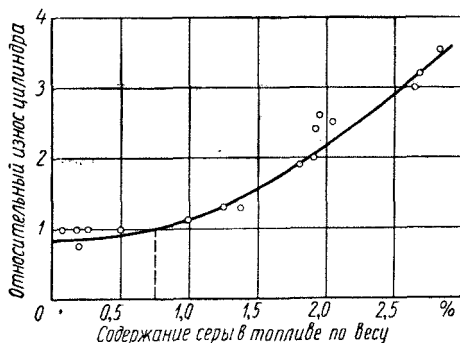
если не принимаются необходимые меры, то даже в прогретом двигателе износ в значительной мере зависит от процентного содержания серы (рис. 183).

В течение долгого времени полный срок службы рассматриваемых деталей в решающей степени определялся средней длительностью прогрева после пуска холодного двигателя (рис. 184).

405. Для уменьшения износа начали применять масла для тяжелых условий эксплуатации, содержащие мыльно-металлические комплексы. Эти масла очень эффективны, особенно в тронковых поршневых двигателях, в которых смазка происходит за счет циркуляции вдоль стенки цилиндра масла из картера. В дополнение к этому топлива для автомобильных дизелей в последние годы были улучшены резким уменьшением содержания в них серы до 0,1—0,2%.

В прогревом двигателе тенденция к износу из-за содержания серы в топливе вызвана не коррозией, а взаимодействием SO_3 с пленкой смазочного масла, как уже упоминалось выше (абзац 387).

Рис. 183. Влияние содержания серы на износ цилиндра



406. Это явление в большей степени имеет место, когда используется тяжелое нефтяное топливо. Связано это не только с тем, что такие топлива содержат обычно значительно больше серы (от 1 до 3% и больше), но также

и с всегда имеющим место явлением замедления развития реакции вблизи стенок, что приводит к образованию у стенок большого количества органических кислот, оказывающих каталитическое действие на образование SO_3 . В больших крейцкопфных двигателях, использующих в качестве топлива мазут, обычно применяется подача точно дозированного необходимого количества смазки к цилиндрам с помощью лубрикаторов («потребительская» смазка вместо «циркуляционная» смазки). При этом не представлялось возможным обеспечить двигатель маслом с достаточным количеством щелочной присадки. Поэтому эксплуатация дизелей на нефти сопровождалась чрезмерно высоким износом и поломками из-за прихвата колец.

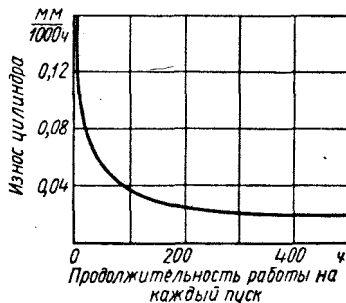


Рис. 184. Влияние продолжительности работы двигателя после каждого пуска на относительный износ цилиндра дизеля при использовании минеральных масел

407. Решение было найдено путем эмульгирования масла, предназначенного для смазки цилиндров, водным раствором ацетата кальция в значительных дозах, выпускаемого фирмой Шелл с 1954 г. под названием Алекси «А».

Это впервые сделало возможной успешную эксплуатацию судовых дизелей на том же дешевом топливе, которое применяется для судов с паровыми двигателями. Большое преимущество перед последними достигалось за счет более низкого расхода топлива в дизельном двигателе.

Позднее удалось добиться тех же результатов за счет содержания в самом масле во взвешенном состоянии большого количества щелочного вещества. Вследствие создания щелочной эмульсионной смазки судовые дизели стали значительно экономичнее, и поэтому быстро прогрессировало конструирование агрегатов мощностью от 10 000 до 20 000 л. с., причем сейчас возможно создание агрегатов мощностью и 30 000 л. с.

408. Коррозия материала подшипников (абзац 393) может вызвать очень быстрый износ подшипников под воздействием сил трения. В чрезвычайных случаях (главные подшипники шатунов в звездообразных авиационных двигателях) подшипники выходили из строя в течение всего нескольких часов. В дополнение к повышению антиокислительной стойкости масла эффективным средством защиты оказалось насыщение металла подшипника с помощью диффузии индием.

409. Весьма необычным примером является случай, когда удаление материала, подвергшегося химическому воздействию, происходит не за счет трения, а из-за высокой температуры. При этом имеет место плавление окиси или соединения, защищающего металлическую поверхность. Это происходило, в частности, с литыми стальными поршнями и горловинами предкамер в условиях, когда кроме серы и ванадия в топливе обнаруживались следы обычной соли.

410. Удаление непосредственно в газообразном состоянии алюминия из-за воздействия на него газообразных радикалов упоминалось выше (абзац 204).

411. Последним примером может быть случай, когда отложения свинца в выпускных каналах алюминиевых головок цилиндров приводили к реакции, подобной термитной, в результате которой алюминий выгорал.

ЛИТЕРАТУРА

1. Hinze J. O. Effect of cylinder pressure-rise on engine vibration. «De Ingenieur», 1949, Vol. 61, no. 48, p. W75—82.
2. Lewis B. and Elbe G. Combustion, flames and explosions of gases. New-York, 1961.
3. Boerlage G. D. and Dijck W. J. D. Causes of detonation in petrol and diesel engines. «Royal Aeronautical Society», 1934, Vol. 38, no. 288, p. 953—976.
4. Jost W. Explosions- und Verbrennungsvorgänge in Gasen. Berlin, 1939.
5. GuIdner H. Das Entwerfen und Berechnen der Verbrennungskraftmaschinen und Anlagen (historical). Berlin, 1914.
6. Towle W. L. and Sherwood T. K. Eddy diffusion. «Industrial Engineering Chemistry», 1939, Vol. 31, no. 4, p. 457—462.
7. Lloyd P. The spontaneous ignition of liquid fuel in a hot gas stream. Paper to sixth International congress for applied mechanics. Paris, 1946.
8. Broeze J. J., Drieh H. and Pelletier L. A. Betrachtungen über den Klopfvorgang im Otto-Motor. Schriften der Deutschen Akademie der Luftfahrtforschung, Berlin, 1939, Heft 9, p. 187—214.
9. Sitkei G. Beitrag zur Theorie des Wärmeüberganges im Motor. «Konstruktion», 1962, Vol. 14, no. 2, p. 67—71.
10. d'Alleva B. A. and Lovell W. G. Relation of exhaust gas composition to air/fuel ratio. «S. A. E.», 1936, Vol. 38, no. 3, p. 90—98, 118.
11. Ostwald W. Beiträge zur graphischen Feuerungstechnik. Leipzig, 1920.
12. Rassweiler G. M. and Withrow L. Motion pictures of engine flames, correlated with pressure cards. «S. A. E.», 1938, Vol. 42, no. 5, p. 185—204.
13. Taylor C. F. and Taylor E. S. The internal combustion engine. Scranton, 1950.
14. Broeze J. J. Combustion in internal combustion engines. II. The sparkignition engine. «Engineering», 1950, Vol. 169, no. 4396, p. 464—465.
15. Rothrock A. M. and Spencer R. C. The influence of directed air flow on combustion in a spark-ignition engine. 25th Annual Report N. A. C. A. 1939, Report 657, p. 313—326.

16. R i c a r d o H. R. The high-speed internal combustion engine. London, Glasgow, 1953.
17. W h a t m o u g h W. A. Combustion. An introduction to new studies of design in relation to flame propagation. «Automobile Engineers», 1933, Vol. 23, no. 314, p. 488.
18. T a u b A. Method and machine for avoiding combustion-chamber calculation. «S. A. E.», 1935, Vol. 36, no. 4, p. 159—162.
19. S e r r u y s M. Detonation et pseudo-detonation dans les moteurs a explosion. «Comptes rendus des seances de l'academie des sciences*», 1934, Vol. 199, no. 18, p. 830—833.
20. P o p e Jr. A. W. The Hesselman low-compression diesel-fuel-burning engine. «S. A. E.», 1934, Vol. 35, no. 4, p. 385—390.
21. D i l l s t r o m T. (Hesselman Motor Corp.). A high-power spark-ignition fuel-injection engine. «S. A. E.», 1934, Vol. 35, no. 6, p. 431—438.
22. B a r b e r E. M., R e y n o l d s B. and T i e r n e y W. T. Elimination of combustion knock—Texaco combustion process. «S. A. E.—Transactions», 1951, Vol. 5, no. 1, p. 26—42.
23. H i e t t G. F. and R o b s o n J. V. B. High-power two-cycle sleeve-valve engines for aircraft. «Aircraft Engineering», 1950, Vol. 22, no. 251, p. 21—23.
24. B r o e z e J. J. Automobiles and petroleum: past, present and future. «Proceedings Automobile Division of the Institute of Mechanical Engineers*», 1953/54, no. 7, p. 135—145.
25. B o e r l a g e G. D. and B r o e z e J. J. Ignition quality of diesel fuels as expressed in cetene numbers. «S. A. E.», 1932, Vol. 31, no. 1, p. 283—293.
26. B o e r l a g e G. D. and B r o e z e J. J. Combustion qualities of diesel fuels. «Ind. Engng. Chem.» 1936, Vol. 28, no. 10, p. 1229—1234.
27. B o e r l a g e G. D., B r o e z e J. J., M e s u r i e r L. J. and S t a n s f i e l d R. The correlation of tests on the ignition quality of diesel fuels, carried out at Delft and Sunbury. «Institute of Petroleum Technic» 1936, Vol. 22, no. 153, p. 455—468.
28. B r o e z e J. J. and H i n z e J. O. Experiments with doped fuels for high-speed diesel engines. «Inst. Petr.», 1939, Vol. 25, no. 192, p. 659—667.
29. N e u m a n n K. Untersuchungen uber die Selbstzundung flussiger Brennstoffe. «V. D. I. Sonderheft», Dieselmaschinen III, Berlin, 1927, p. 21—28.
30. B o e r l a g e G. D. and B r o e z e J. J. Ignition quality of fuels in compression-ignition engines. «Engineering», 1931, Vol. 132, nos. 3435, 3438 and 3440, p. 603—606, 687—689, 755—756.
31. B o e r l a g e G. D. and B r o e z e J. J. Some points in combustion efficiency of diesel engines. «Gas and Oil Power», 1935, Vol. 30, no. 352, p. 3—5.
32. B o e r l a g e G. D. and B r o e z e J. J. The combustion process in the diesel engine. Chem. Reviews, 1938, Vol. 22, no. 1, p. 61—87.
33. B o e r l a g e G. D. The cause of gummy pistons. «Inst. Petr. Techn», 1930, Vol. 16, no. 84, p. 678—680.
34. S c h w e i t z e r P. H. Penetration of oil sprays in dense air. «Penn. State College, School Eng. — Techn. Bulletins», 1934, no. 20, p. 108—124.

35. T i j e n H. W. Method for calculation of cylinder liner temperatures in diesel engines. «Dissertation T. H. Delfts, 1962.
36. L e e D. W. A study of air flow in an engine cylinder. «25th Annual Report N. A. C. A.», 1939, Report 653, p. 227—239.
37. D i c k s e e C. B. The high-speed compression-ignition engine. London, Glasgow, 1944.
38. B r o e z e J. J. and S t i l l e b r o e r C. Smoke in high-speed diesel engines. «S. A. E. annual meetings, Detroit, 1948. Abstract-«S. A. E.», 1948, Vol. 56, no. 4, p. 54—58.
39. B r o e z e J. J. and S t i l l e b r o e r C. Fuels for automotive and railroad diesel engines. «S. A. E. tractor and diesel engine meetings, Milwaukee, 1948. Abstract: «S. A. E.», 1949, Vol. 57, no. 3, p. 64—65.
40. K u m a g a i S. and K u d o Y. Flame studies by means of ionization gap in a high—speed spark—ignition engine. «9th Int. Symposium on Combustions, New York, London, 1963, p. 1083—1087.
41. L o n g w e l l J. P. Discussion to papers of P. Lloyd and B. P. Mullins and of J. Bertin. AGARD, Selected combustion problems, Combustion Colloquium Cambridge University, 1953, London 1954, p. 508—510.
42. B r o e z e J. J. Where are the limits of combustion intensity? Proceedings of the 5th AGARD general assembly at Ottawa, 1955. Paper AG20/P10, Ottawa, 1956, p. 92—101.
43. B o u m a n C. A. Properties of lubricating oils and engine deposits. London, 1950.
44. M i n n e J. L. Flocculation and peptization in oil as dispersion medium. «Recueil des travaux chimiques des Pays-Bas», Amsterdam, 1946, Vol. 65, p. 549—555.
45. W i l l i a m s C. G. Collected researches on cylinder wear. Inst. Aut. Eng., Aut. Res. Comm., London, 1940.
46. B o e r l a g e Q. D., B r o e z e J. J., D r i e l H. and P e l e t i e r L. A. Detonation and stationary gas waves in petrol engines. «Engineering», 1937, Vol. 143, no. 3712, p. 254—255.

СОДЕРЖАНИЕ

Общая теория горения	3
Отдельные виды процессов сгорания.....	7
Одновременный взрыв (объемное самовоспламенение)	10
Постепенный взрыв (распространение пламени)	22
Значения нормальной скорости сгорания. Пределы воспламеняемости	35
Инициирование постепенного взрыва (зажигание)	37
Диффузионное горение.....	39
Промежуточные процессы между одновременным и постепенными взрывами.....	41
Стабильность процессов сгорания как основа их практического применения.....	45
Химические основы процессов сгорания.....	49
Реакции образования альдегидов и пероксидов	61
Реакции распада	66
Два типичных случая горения углеводородов: голубое и желтое пламена	67
Анализ отработавших газов	72
Сгорание в бензиновых и газовых двигателях	75
Нормальное горение	75
Собственно горение	89
Практически используемые составы смеси	96
Авиационные двигатели	97
Автомобильные двигатели	100
Нарушения нормального горения.....	102
Многоцилиндровый двигатель. Проблемы карбюрации	118
Сгорание гетерогенной (расслоенной) смеси; воспламенение топливным факелом (впрыск вспомогательной поджигающей порции топлива или двухтопливные двигатели) . . .	122
Сгорание в дизелях	129
Идеальный процесс	129
Действительный процесс.....	140
Впрыск и распыливание.....	181
Движение заряда	195
Действие и использование горячих поверхностей	219
Оптимальное сгорание в дизелях	222
Общие проблемы и последствия сгорания в двигателях	226
Зависимость между пределом удельной мощности и горением	226
Дополнительные последствия горения	230
Литература	245

Д. Д. Брозе
СГОРАНИЕ В ПОРШНЕВЫХ ДВИГАТЕЛЯХ

Редактор издательства *Л. И. Степанова*
Технический редактор *Е. П. Смирнова* Корректор *В. В. Сабынич*
Переплет художника *Л. С. Вендрова*

Сдано в производство 15/VI 1968 г. Подписано к печати 14/V 1969 г.
Усл. печ. л. 13,02. Бум. л. 3,88. Уч.-изд. л. 13,5
Формат 84x108/32. Тираж 4000 экз. Цена 1 р. 12 к. Зак. № 2239

Издательство «МАШИНОСТРОЕНИЕ», Москва, Б-66, 1-й Басманный пер., 3.

Ленинградская типография № 6 Главполиграфпрома
Комитета по печати при Совете Министров СССР
Ленинград, ул. Моисеенко, 10