

# ПРОЕКТИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ДВИГАТЕЛЬ ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ – ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ НАСОС СО СВОБОДНЫМ ПЕРЕМЕЩЕНИЕМ ПОРШНЕЙ

Журнал SAE Off Highway Engineering, February 2001, pp 23–28. Материал предоставлен P. Achten, J. van der Oever, J. Potma и G. Vael, компания Innas BV

**Д**атские компании Noas и Innas создали двигатель внутреннего сгорания, в котором практически вся энергия сгорания топлива преобразуется в энергию гидронасоса.

Сложность никогда не являлась целью, которую ставили бы перед собой разработчики новой продукции, это в полной мере относится и к разработчикам дорожно-строительной техники. Однако, хотя более простые решения возможны, производители зачастую продолжают выпускать более сложную продукцию, а потребители вынуждены покупать эту продукцию из-за отсутствия альтернативных возможностей.

Двигатели внутреннего сгорания проектируются так, чтобы было низкое потребление топлива, низкий уровень вредных выбросов, чтобы они были надежны и, конечно, чтобы они удовлетворяли потребителя.

Примером снижения сложности может служить комбинация системы двигатель внутреннего сгорания/насос, которая довольно часто встречается в дорожно-строительной технике. В такой комбинированной системе вначале энергия сгорания топлива в двигателе преобразуется в механическую энергию движения поршня. Если смотреть со стороны насоса, то механическая энергия в нем преобразуется в гидравлическую также с помощью (своего) поршня (плунжера). Казалось бы, логичным соединить механически поршни двигателя внутреннего сгорания и гидронасоса. Это привело бы к конфигурации, которую естественно назвать конфигурацией «свободных поршней» (рис. 1).

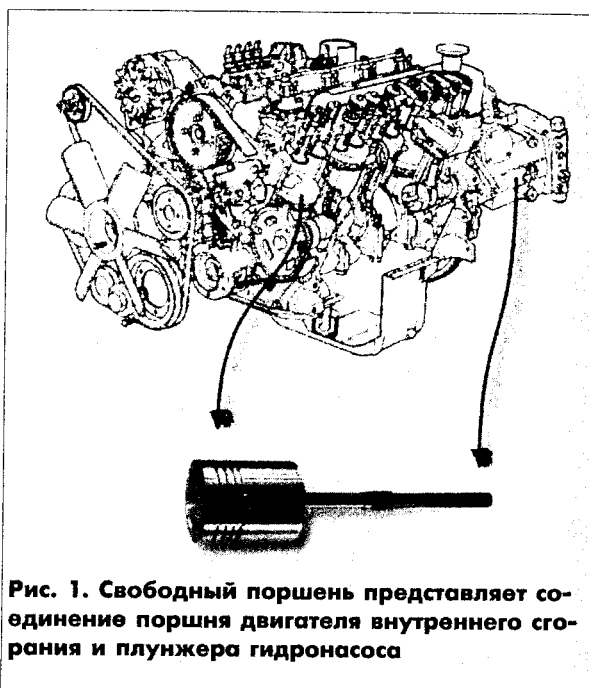
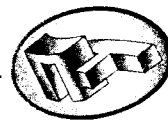


Рис. 1. Свободный поршень представляет соединение поршня двигателя внутреннего сгорания и плунжера гидронасоса

Однако в имеющейся на рынке продукции подобная конфигурация не встречается. Вместо этого двигатель внутреннего сгорания и гидронасос представляют две отдельные системы, причем обе машины имеют вращающиеся части, которыми они и соединяются друг с другом.

Причины такого усложнения общей системы очевидны. Технология гидравлических систем возникла относительно недавно, и, когда гидронасосы и гидродвигатели стали появляться на рынке, двигатели внутреннего сгорания, оснащенные коленчатым валом с кривошипно-шатунным механизмом, а так-



же другие типы двигателей, механические и электрические, уже установили «квазистандарт» вращающегося выходного вала. Промышленность, выпускающая гидротехнику, была вынуждена адаптироваться к этому «стандарту», так как в большинстве применений гидравлические системы дополняли другие имеющиеся системы, предоставляя основные функции передачи движения шестеренкам, цепям и ремням. Кроме того, дизельные двигатели производились в огромных количествах, и, вообще говоря, было мало причин для переконструирования их в дизельные двигатели, которые были бы предназначены для работы исключительно на рынке гидросистем. Таким образом, хотя комбинация двигатель внутреннего сгорания/насос и могла бы стать проще, влияние от такого упрощения ввиду сложности перестройки производственных линий, изменения розничных цен и стоимости обслуживания представлялось проблематичным.

Тем не менее было много попыток проектирования и создания комбинации двигатель внутреннего сгорания/насос, не содержащих механических рычагов передачи движения от поршня, коленчатых валов и промежуточных приводов. Так как при прямом соединении поршней двигателя внутреннего сгорания и гидропривода отсутствуют механические связи, накладываемые кинематической передачей, в такой системе объединенные поршни имеют свободу аксиального перемещения, именно поэтому такие системы принято относить к системам машин со свободным перемещением поршней.

В действительности свобода перемещения поршней в таких системах относительна. Как и для обычных двигателей, необходимо определить верхние и нижние мертвые точки положения поршней. В первую очередь это относится к верхней мертвой точке процесса сгорания, которая определяет коэффициент сжатия в цилиндрах и весьма существенно сказывается на показателях двигателя внутреннего сгорания, в том числе на возможности старта в холодном состоянии, на выхлопах и, разумеется, на к.п.д. В отсутствие кривошипно-шатунного механизма траектория движения поршня зависит только от управляемого усилия на поршень и, в конечном счете, от энергетического баланса движения поршня. Датчики, усилители и системы электронного управления необходимы для

того, чтобы реализовать нужное управление и синхронизировать момент начала впрыска топлива с движением поршня. Только лишь последние разработки электронных систем управления сделали возможным эффективно и относительно недорогой ценой решить наконец вопросы управления в системе со свободным движением поршня.

Существовали также проблемы и в использовании гидравлической системы со свободным движением поршня. В отличие от обычных насосов, гидравлические насосы со свободным движением поршня характеризуются пульсирующим выходным потоком. Эти пульсации потока, однако, могут эффективно сглаживаться, если применить гидропневматический аккумулятор. Обычный гидроаккумулятор, действуя как интегрирующее устройство, в значительной мере препятствует быстрой реакции на изменение режима работы. Последние разработки компании Innas по новому гидропреобразователю Innas Hydraulic Transformer (IHT) позволили предложить решение данной проблемы (опубликовано в апрельском номере 2000 г. журнала SAE Off-Highway Engineering). Такое устройство осуществляет преобразование любого потока на входе при данном давлении в выходной поток любого заданного давления, причем потери на преобразование потоков весьма малы. Кроме малых потерь, этот преобразователь реверсируем, то есть производство давления и расхода на входе равно производству этих величин на выходе. Этот новый преобразователь IHT дает возможность проектировать систему с обычным для гидросистем диапазоном давления. С помощью аккумуляторов возможно управление рекуперацией энергии и потоками мощности. Например, если нагрузка подъемника временно уменьшается, средняя мощность, потребляемая нагрузкой, может сохраняться с помощью накопления соответствующей энергии в это время в аккумуляторе. Запасенная энергия впоследствии может быть передана в нагрузку, например, при ускорениях подъемника.

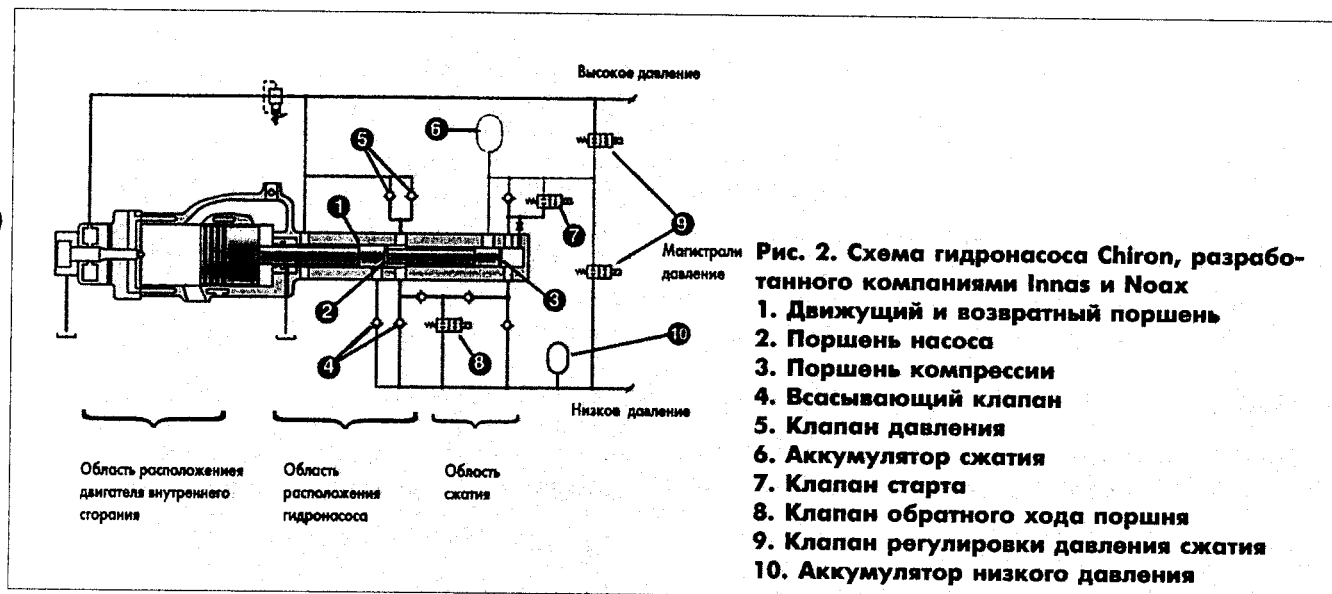
#### **Предварительное описание модели Chiron**

Существует большое количество отличающихся друг от друга концепций построения системы двигатель/насос со свобод-



ным движением поршней. Модель, названная Chiron, разработана компаниями Noax и Innax и принадлежит к семейству однопоршневых двигателей. Хотя движение поршня в принципе может быть уравновешено дополнительной массой противовеса, в гидронасосе Chiron противовесы не применяются (схема насоса Chiron показана на рис. 2).

пан задает «быстродействие», или рабочую частоту двигателя внутреннего сгорания. Если клапан старта будет закрыт некоторое время, то поршень будет стоять это время в положении нижней мертвой точки. Когда клапан открывается, начинается новый цикл движения. Длительность паузы между циклами является параметром, определяющим частоту движения пор-



**Рис. 2. Схема гидронасоса Chiron, разработанного компаниями Innax и Noax**  
1. Движущий и возвратный поршень  
2. Поршень насоса  
3. Поршень компрессии  
4. Всасывающий клапан  
5. Клапан давления  
6. Аккумулятор сжатия  
7. Клапан старта  
8. Клапан обратного хода поршня  
9. Клапан регулировки давления сжатия  
10. Аккумулятор низкого давления

В части, где расположен гидронасос, размещены баллоны, наполненные маслом, посредством которого осуществляется связь камер высокого и низкого давления. Процесс перекачки масла разделен на два потока. Около половины масла перемещается при движении поршня в течение цикла сжатия, когда поршень перемещается влево. Оставшаяся половина перемещается при рабочем ходе поршня. Клапаны всасывания и компрессии контролируют работу насоса. Относительно небольшой аккумулятор подает масло в гидроцилиндр, причем кавитационные процессы отсутствуют. В области поршня также предусмотрено предотвращение удара при движении поршня после зажигания рабочей смеси с помощью увеличивающегося объема перекачиваемого масла.

При сжатии энергия передается поршню, сжимающему газы в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Энергия, необходимая для сжатия, запасается в небольшом гидропневматическом аккумуляторе. Для передачи энергии от аккумулятора к поршню используется клапан старта. Этот кла-

пан, и тем самым определяет производительность гидронасоса Chiron.

Из-за имеющей место некоторой утечки масла поршень, находясь в нижней мертвой точке, при закрытом клапане старта, может медленно двигаться («ползти»). Для предотвращения «ползущего движения» поршня используется клапан возвратного хода, при открытии которого высокое давление гидросистемы насоса прикладывается к поршню, заставляя его передвигаться вправо. Однако, поскольку утечка весьма мала, контролировать «сползание» поршня необходимо только при очень малых частотах движения поршня, ниже 2 Гц. Клапан обратного хода используется также для возврата поршня в исходную нижнюю мертвую точку в случае отсутствия зажигания рабочей смеси.

Энергия, передаваемая поршню в ходе сжатия, определяет степень сжатия в цикле работы двигателя внутреннего сгорания. Изменяя давление в аккумуляторе посредством электрогидравлических клапанов, можно управлять энергией сжатия и соответственно, регулировать степень сжатия. На рис. 3 показан разрез гидронасоса

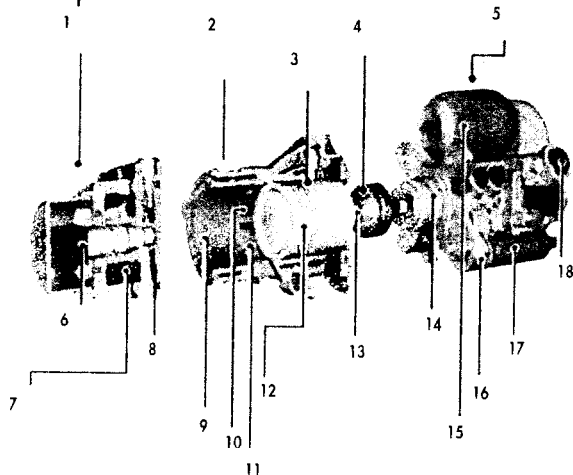
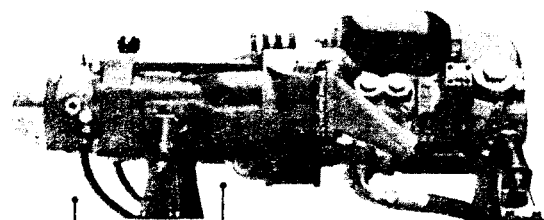
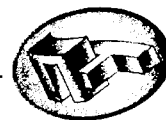


Рис. 3. Гидронасос Chiron имеет длину 820 мм, ширину 300 мм и высоту 350 мм.

Надписи на рисунке:

- 1 – головка цилиндра
- 2 – цилиндр двигателя внутреннего сгорания и отсасывающий насос
- 3 – поршень
- 4 – кольцо уплотнения между частями гидросистемы и двигателя внутреннего сгорания
- 5 – гидросистема
- 6 – инжектор топлива HEUI компании Caterpillar
- 7 – камера гидроаккумулятора
- 8 – пропускная камера для охлаждающей жидкости
- 9 – гильза цилиндра
- 10 – впускные отверстия
- 11 – отверстия выпуска
- 12 – поршень двигателя внутреннего сгорания
- 13 – шток поршня
- 14 – плунжер гидросистемы (находится внутри)
- 15 – аккумулятор сжатия
- 16 – штуцер линии низкого давления
- 17 – аккумулятор низкого давления
- 18 – клапан управления частотой работы двигателя

Chiron, который состоит из трех литых стальных блоков: блока головки цилиндра, цилиндра с охлаждающей камерой и блока гидравлики.

Гидронасос Chiron представляет двухтактный дизельный двигатель с естественной продувкой, с контуром охлаждения и прямым впрыском топлива. В системе впры-

ска применен гидроэлектрический блок производства компании Caterpillar с электронным управлением, разработанным компанией Innas. Гидравлический привод системы впрыска питается от гидронасоса. Система питания с каналами обратного хода интегрирована в литом блоке цилиндра (рис. 4).

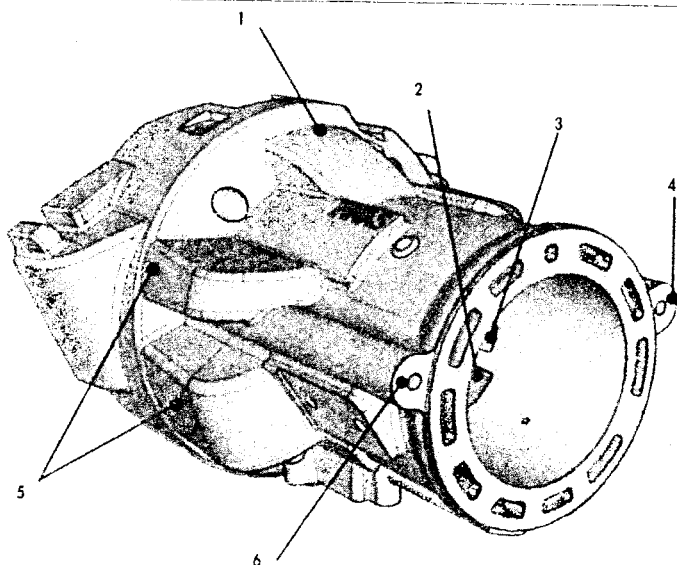
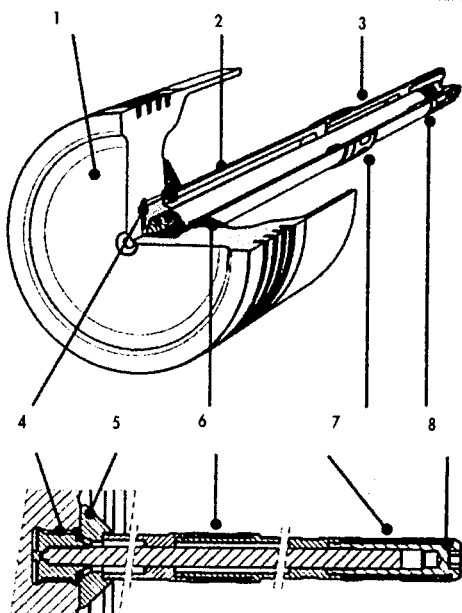
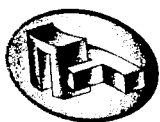


Рис. 4. Каналы питания и выхлопа интегрированы в корпус блока цилиндра гидронасоса Chiron.

Надписи на рисунке:

- 1 – канал возврата
- 2 – канал впуска
- 3 – канал выпуска
- 4 – питание маслом высокого давления инжектора топлива HEUI
- 5 – каналы впуска
- 6 – канал масла для обратного хода HEUI



**Рис. 5. Сборка поршня насоса Chiron.**

Надписи на рисунке:

- 1 – поршень двигателя внутреннего сгорания
- 2 – шток гидронасоса
- 3 – шток насоса сжатия
- 4 – внутреннее кольцо
- 5 – удерживающее кольцо
- 6 – кольцо насоса
- 7 – кольцо сжатия
- 8 – стягивающая втулка

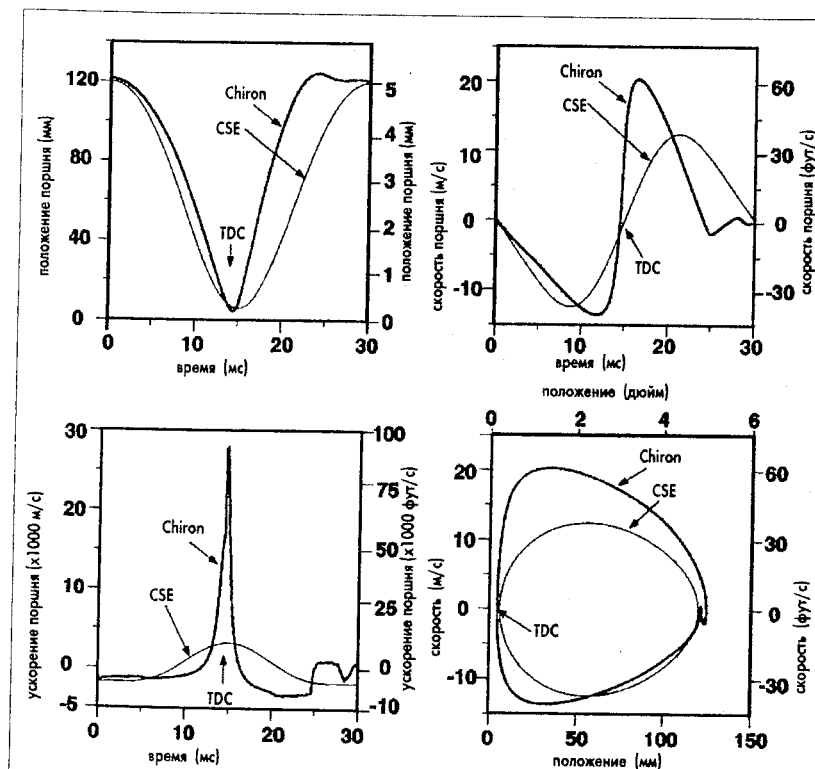
### Динамика движения поршня

Поршень собирается из нескольких частей совместно с деталями поршня гидравлической системы (рис. 5).

Штоки, цилиндрический насос, уплотняющие кольца скрепляются с поршнем двигателя внутреннего сгорания посредством

стержней и упругих втулок. Удерживающие кольца снижают усилия, прикладываемые к поршню. Гидравлический насос и уплотняющие кольца имеют небольшую степень подвижности в радиальном направлении.

На первый взгляд части, относящиеся к двигателю внутреннего сгорания, очень похожи на обычные компоненты двухтактного



**Рис. 6. Перемещение, скорость и ускорение поршня в двигателе внутреннего сгорания насоса Chiron в сравнении с теми же показателями двигателя внутреннего сгорания сопоставимых размеров (CSE), при одинаковой средней скорости движения (33,3 Гц, или 2000 об/мин)**



двигателя внутреннего сгорания с принудительным впрыском. Однако, если сравнивать процессы, происходящие в обычном двигателе внутреннего сгорания и в двигателе со свободным перемещением поршня, все не так однозначно (рис. 6).

В обычном двигателе движение поршня определяется вращением коленчатого вала, который по предположению, вращается с постоянной скоростью, скажем, 2000 об/мин. Положение поршня двигателя внутреннего сгорания, используемого в гидронасосе Chiron, является результатом действующих на него сил. Слегка упрощенный анализ показывает, что этот поршень эквивалентен соответствующей массе, на которую действуют две силы: с одной стороны, сжатый азот в гидропневматическом аккумуляторе, а с другой стороны, либо воздух, сжимаемый в цилиндре, либо продукты сгорания рабочей смеси. Максимальная скорость перемещения поршня определяет максимальную частоту повторения цикла, которая в гидронасосе Chiron составляет 42 Гц.

Частоту рабочего цикла можно изменять, приостанавливая движение поршня в нижней мертвой точке, в зависимости от требований к рабочему процессу. На рис. 6 пауза движения в мертвой точке составляет около 6 мс, при этом частота повторения цикла составляет 33,3 Гц. Такая частота соответствует частоте вращения 2000 об/мин для сопоставимого двигателя внутреннего сгорания с коленчатым валом. Однако в течение рабочего хода максимальная скорость перемещения поршня в двигателе Chiron намного превосходит максимальную скорость перемещения поршня в сопоставимом двигателе внутреннего сгорания с коленчатым валом. Наиболее существенные отличия имеют место в верхней мертвой точке, когда происходит воспламенение рабочей смеси. В двигателе со свободным движением поршня ускорение поршня, его скорость и положение прямо связаны с силами, действующими на поршень. В верхней мертвой точке, после зажигания рабочей смеси, давление в цилиндре двигателя внутреннего сгорания является доминирующим, определяя движение поршня в данный момент. В верхней мертвой точке ускоряющие силы максимальны, соответственно максимально и ускорение

поршня. В сравнении с двигателем с коленчатым валом ускорение поршня вблизи верхней мертвой точки для него примерно в девять раз меньше, чем максимальное ускорение в двигателе Chiron.

### Процессы при сгорании топлива

В обычных двигателях динамика движения поршня полностью определяется более или менее постоянной скоростью вращения коленчатого вала. Соответственно и изменяется объем рабочей смеси в цилиндре при ее сгорании. Это означает, между прочим, что в процессе сгорания давление в цилиндре не влияет ни на ускорение поршня, ни на его скорость и положение, не влияет также и на диаграмму изменения объема рабочей смеси в цилиндре.

В двигателях со свободным движением поршня вообще и в двигателе Chiron в частности давление в камере и текущий объем камеры сгорания связаны определенными функциональными соотношениями. Как и в двигателе с коленчатым валом, изменение объема цилиндра приводит к изменению давления в нем; однако увеличение давления в камере сгорания вызывает также повышенное ускорение движения поршня и следовательно более быстрое изменение объема камеры сгорания. Отсюда понятно, что в двигателе со свободным движением поршня необходимо обеспечить более быстрое протекание процесса сгорания топлива, так как давление и температура в камере сгорания будут падать быстрее из-за более быстрого увеличения объема камеры сгорания.

В двигателе внутреннего сгорания Chiron длительность такта сгорания составляет около 5 мс, что является обычной цифрой для машин такого класса; в этом двигателе ход поршня составляет около 100 мм, после чего открываются клапаны выпуска продуктов горения. Однако в такой ситуации часть горючей смеси не должна была успеть сгореть, так как процесс сгорания сопровождался быстрыми изменениями давления и температуры в камере. На самом деле, движение поршня двигателя со свободным движением имеет большое ускорение только из-за высокой скорости возрастания температуры. Результирующее давление увеличивает скорость движе-



ния поршня к нижней мертвой точке рабочего цикла, то есть движение поршня более или менее следует обычному процессу горения топлива, а тот, в свою очередь, отслеживает процесс движения поршня. Большая скорость движения поршня вызывает, в свою очередь, высокие скорости движения газов в камере сгорания, которые увеличивают и скорость протекания реакции горения. Как показывают измерения, около 90% тепловой энергии выделяется в течение первой миллисекунды после зажигания рабочей смеси.

### Изменение степени сжатия

Одним из важнейших параметров, определяющих процессы в двигателе внутреннего сгорания, является степень сжатия. Так как движение поршня в двигателе со свободным движением поршня является возвратно-поступательным, для такого двигателя также следует определять степень сжатия рабочей смеси. Для двигателя со свободным движением поршня, в отличие от обычных двигателей, закон движения поршня не определяется кинематическими соотношениями и степень сжатия не зависит от размеров механизмов. Вместо этого степень сжатия в таких двигателях можно вычислить по соответствующим соотношениям или же оп-

ределить опытным путем. Таким образом, степень сжатия не определяется конкретными проектными характеристиками двигателя со свободным движением поршня.

Более подходящим показателем, чем степень сжатия, является энергия, затраченная на сжатие воздуха в цилиндре, то есть та энергия, которая потребляется в цикле сжатия от гидропневматического аккумулятора при сжатии газовой смеси в двигателе внутреннего сгорания. Кинематические параметры обычного двигателя внутреннего сгорания изменить довольно сложно, а параметры двигателя со свободным движением поршня, определяющие степень сжатия, изменять очень просто. Управляя этими параметрами, степень сжатия может устанавливаться такой, чтобы максимально удовлетворять требуемому качеству процесса сгорания.

Среди прочего, энергия сжатия будет определять (индикаторный) к.п.д. двигателя, уровень выбросов окислов азота  $\text{NO}_x$ , и выбросы твердого углерода в виде сажи. В двигателе Chiron наиболее важным параметром, определяющим степень сжатия, является давление в гидропнеумоаккумуляторе. Как и момент впрыска топлива, так и давление в камере сгорания должны устанавливаться с высокой точностью, для того чтобы оптимизировать показатели к.п.д. и выбросов.

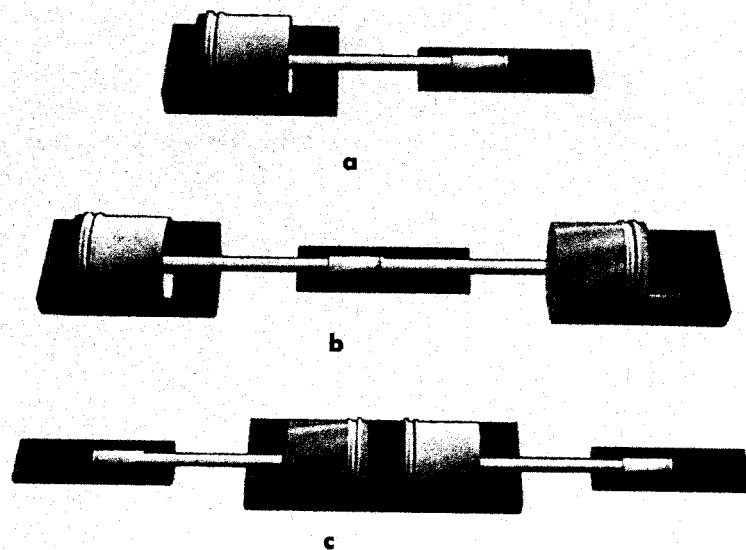


Рис. 7. Принципы построения двигателей со свободным движением поршня  
а – однопоршневой  
б – двухпоршневой  
с – с оппозитными поршнями



### Концепция двигателя внутреннего сгорания со свободным движением поршня

Требования к точному регулированию количества энергии является ключевым при выборе принципов построения двигателей со свободным движением поршня (рис. 7а).

Если использовать конструкцию противоположно расположенных поршней (рис. 7д), то в ней сжатие газов в цилиндре двигателя внутреннего сгорания вызывается текущим мгновенным относительным положением двух поршней. Количество энергии, потребляемой на сжатие смеси в обычном двигателе, является суммой энергий, прилагаемых к каждому из двух поршней. Поэтому все понятия модели двигателя с противоположными поршнями можно рассматривать как понятия двухпоршневых двигателей при энергии каждого поршня, соответствующей энергии однопоршневого двигателя Chiron.

Трудность здесь состоит в синхронизации движения двух поршней. Движением одного поршня в таком двигателе управлять не просто, тем более сложно управлять одновременно движением двух поршней и, тем более, будет сложнее управлять степенью сжатия в камере сгорания.

В двухпоршневой конфигурации поршни передвигаются в двух камерах сгорания (рис. 7б). Это позволяет исключить проблемы, связанные с усложнением гидравлических схем аккумулятора, и проблем, связанных со сжатием рабочей смеси. Нет проблем разделения энергии сжатия для одного цилиндра на два цилиндра. Кроме проблем с вопросами кавитации, пуска и проблем управления выходным потоком гидравлической системы, весьма трудно точно регулировать энергию сжатия.

Точное регулирование сжатия смеси должно выполняться не только на отдельном цикле процесса, но и для всех циклов. В структуре сдвоенных и противоположных поршней ошибки управления могут легко привести к их накоплению. Только структура однопоршневого двигателя позволяет устанавливать степень сжатия и управлять этим параметром в соответствии с установленными требованиями.

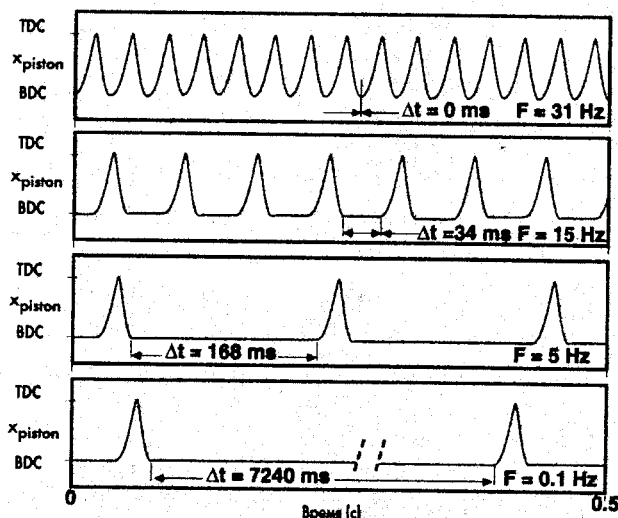
### Принцип управления длительностью пауз

Принципиальным преимуществом, которое дает использование гидравлической системы, является возможность управления энергией гораздо более гибко, чем это можно было бы реализовать при механической системе управления. Если же сравнивать гидравлические системы с электрическими, которые также позволяют синтезировать гибкое управление, то у гидравлических систем есть то преимущество, что для них характерна более высокая плотность мощности и большие удельные усилия, а также жесткость. Кроме того, гидравлические системы позволяют запасать и рекуперировать энергию в аккумулятор.

Обмен энергией между поршнем гидравлической системы и пневмогидроаккумулятором может быть в любой момент прекращен простым закрытием клапана. Этот принцип как раз и используется в гидронасосе Chiron. Если клапан закрывается, то поршень будет находиться в нижней мертвой точке. Таким образом, можно регулировать длительность интервала между последовательными циклами работы двигателя (рис. 8).

Преимуществом такого импульсного управления паузами между рабочими циклами является возможность использования в той или иной мере цифрового регулятора частоты работы двигателя и следовательно цифрового управления выходным потоком двигателя. При этом возможно добиться быстрого динамического отклика системы управления потоком, так как само управление длительностью закрытия клапана, определяющего частоту работы двигателя и выходной поток гидросистемы, построено на электронике.

Еще одно преимущество импульсного управления паузами и частотой работы двигателя состоит в том, что движение поршня в каждом цикле не зависит от выходных характеристик гидравлической системы. Каждый рабочий ход и ход сжатия в точности повторяют предыдущие независимо от длительности паузы или частоты работы двигателя. Это позволяет один раз и навсегда оптимизировать



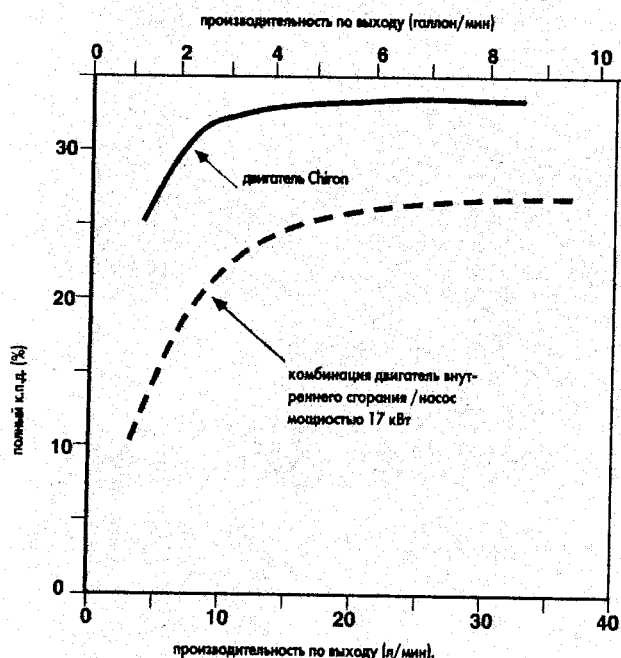
**Рис. 8. Диаграмма изменения положения поршня при различных частотах или при различной длительности нахождения поршня в нижней мертвой точке.**

**Надписи на вертикальных осях графиков (сверху вниз):**

**TDC** – верхняя мертвая точка

$x_{piston}$  – положение поршня

**BDC** – нижняя мертвая точка



**Рис. 9. Полный к.п.д. двигателя Chiron в сравнении к.п.д. гидравлического двигателя, образованного с помощью комбинации традиционного двигателя внутреннего сгорания сопоставимых размеров, и аксиального поршневого насоса**

процессы сгорания топливной смеси при рабочем ходе поршня, т.е. оптимизировать диаграмму движения поршня. Найденный оптимум будет автоматически сохраняться при любой частоте работы двигателя. В принципе сказанное выше справедливо, однако в реальной системе все-таки имеют место факторы, приводящие к некоторой зависимости характеристик процессов от частоты работы двигателя:

- поршень находится в нижней мертвой точке, имеет место некоторая утечка масла в течение паузы между циклами движения поршня. Влияние утечки на к.п.д. зависит, очевидно, от частоты: чем больше пауза, тем ниже к.п.д.;

- относительное потребление энергии вспомогательными системами (насосом системы охлаждения, генератором, топливным насосом, вентилятором) больше при низкой частоте работы двигателя;

- система подвода воздуха и вывода продуктов сгорания (воздухозаборник, нагнетатель, цилиндр и выпускное устройство) характеризуются зависимостью их характеристик от частоты работы двигателя. В результате количество выбросов будет изменяться в рабочей области частот двигателя.

На рис. 9. показана зависимость к.п.д. гидронасоса Chiron от рабочей частоты в области низких частот. Для сравнения там же приведены типовые зависимости к.п.д. от частоты для комбинации обычного дизельного двигателя и аксиального поршневого гидронасоса. В обоих случаях к.п.д. понимается как полный к.п.д. системы по отношению к энергии потребляемого дизельного топлива с учетом потерь энергии во вспомогательном оборудовании.

Как следует из рис. 9, влиянием частоты на к.п.д. насоса пренебрегать нельзя.

Из сопоставления кривых на рис. 9 следует со всей ясностью, что к.п.д. насоса Chiron выше. При полной мощности насос Chiron потребляет на 20% меньше топлива, чем обычные гидронасосы. При меньшей мощности (меньшей частоте работы двигателя) к.п.д. насоса Chiron на 50% превышает к.п.д. комбинации обычный дизельный двигатель – гидронасос.

