

Судовые двигатели внутреннего сгорания

Лектор: Доцент кафедры ДВС И АСЭУ, к.т.
н., ЖИВЛЮК Григорий Евгеньевич
Конт. Тел. 9190946

Лекция 12

- Задачи газообмена
- Параметры воздуха и газа на входе и выходе
- Газообмен в четырехтактных двигателях
- Газообмен в двухтактных двигателях
- Способы организации газообмена в двухтактном двигателе
- Динамика газообмена
- Время-сечение продувочных и выпускных окон
- Критерии оценки газообмена
- Время-сечение выпускных клапанов
- Показатели качества газообмена

Задачи газообмена

Задачи газообмена

ДВС это циклически работающий тепловой двигатель. В соответствии со второй основной технической термодинамики, циклически работающий тепловой двигатель для обеспечения цикличности своей работы должен не только получать тепло от окружающей среды но и часть этого тепла окружающей среде отдавать. Как мы уже выяснили, подвод тепла в реальной конструкции поршневого ДВС осуществляется путем сжигания топлива в воздухе, заполняющем цилиндр. Замыкание цикла в виде изохорного отвода тепла окружающей среде происходит в процессе выпуска отработавших газов. Таким образом:



Задачи газообмена

В обеспечение цикличности работы ДВС необходимо в каждом цикле производить наполнение цилиндра свежим зарядом воздуха для сгорания топлива и очистку цилиндра от отработавших газов. Эти процессы, протекающие в двигателе, называют **газообменом**.

В отличие от рассмотренных ранее процессов сжатия и расширения, происходящих в закрытой термодинамической системе, процессы газообмена происходят в открытых системах, когда термодинамическая система имеет возможность обмена веществом с окружающей средой.

Задачи газообмена

В основе термодинамики открытых систем лежат законы движения вещества в каналах.

Течение газа в любом канале подчиняется закону сохранения энергии в потоке и закону сплошности (неразрывности среды) из которых следует, что движение газа осуществляется благодаря работе сил проталкивания, которая производится под воздействием перепада давления (действием гравитационных сил при рассмотрении течений рабочего тела в ДВС можно пренебречь).



Задачи газообмена

• Из решения в дифференциальной форме закона сохранения энергии

$$w dw = -v dp.$$

Совместное решение уравнения сохранения и закона сплошности представляется как:

$$\frac{dF}{F} = (M^2 - 1) \frac{dw}{w}$$

Параметры воздуха и газа на входе и выходе из цилиндра



Параметры воздуха на входе в цилиндр

• Параметры воздуха на входе в цилиндр определяется давлением и температурой (p_s и T_s соответственно) во впускном ресивере (коллекторе).

Все современные двигатели имеют систему наддува, поэтому атмосферные двигатели из рассмотрения исключим, как устаревшие.

Давление перед цилиндром определяется давлением, создаваемым компрессором p_k , которое характеризуется степенью повышения давления в агрегате наддува π_k

$$p_k = p_o \pi_k ,$$

где p_o - давление на входе в агрегат наддува (меньше атмосферного на величину потерь фильтра и магистрали)

Параметры воздуха на входе в цилиндр

- Давление воздуха во впускном ресивере/коллекторе составит с учетом потерь как

$$p_s = p_k - \Delta p_s.$$

Потери давления Δp_s обусловлены сопротивлением охладителя надувочного воздуха и потерями в магистрали обычно $\Delta p_s = 0,02 - 0,04$ бар.

Температура воздуха за компрессором определяется из

$$T_k = T_0 \pi_k^{\frac{n_k - 1}{n_k}}.$$

Здесь T_0 температура воздуха перед компрессором, K , n_k - показатель политропы сжатия воздуха в компрессоре. Для объемных (поршневых, винтовых и пр.) компрессоров $n_k = 1,45 - 1,6$, для лопаточных (центробежных) - $1,6 - 1,8$.

Параметры воздуха на входе в цилиндр

- Температура воздуха за компрессором может достигать 170 – 190 °С. С ростом температуры нагнетаемого воздуха понижается его плотность, уменьшая массу воздуха, поступающего в цилиндр. Для повышения плотности воздуха перед цилиндром выходящий из компрессора горячий сжатый воздух охлаждают (отвод тепла – изобарный) в охладителе надувочного воздуха (ОНВ). На выходе из ОНВ температура воздуха превышает на 10 - 15 °С температуру воды, прокачиваемой через холодильник поэтому

$$t_s = t_w + (10 - 15)^\circ\text{C}$$

И редко превышает 50 °С.

Параметры газа за цилиндром

- Среднее давление отработавших газов за цилиндром двигателя p_T в выпускном канале (давление перед турбиной) для двухтактных двигателей находится в прямой зависимости от давления воздуха в продувочном ресивере p_s и должно быть ниже в обеспечение процесса продувки цилиндра.

$$p_T = \xi_{\Pi} p_s$$

Коэффициент потери давления ξ_{Π} определяется сопротивлением в окнах и клапанах и для двухтактных двигателей лежит в пределах 0,88 – 0,96

Параметры газа за цилиндром

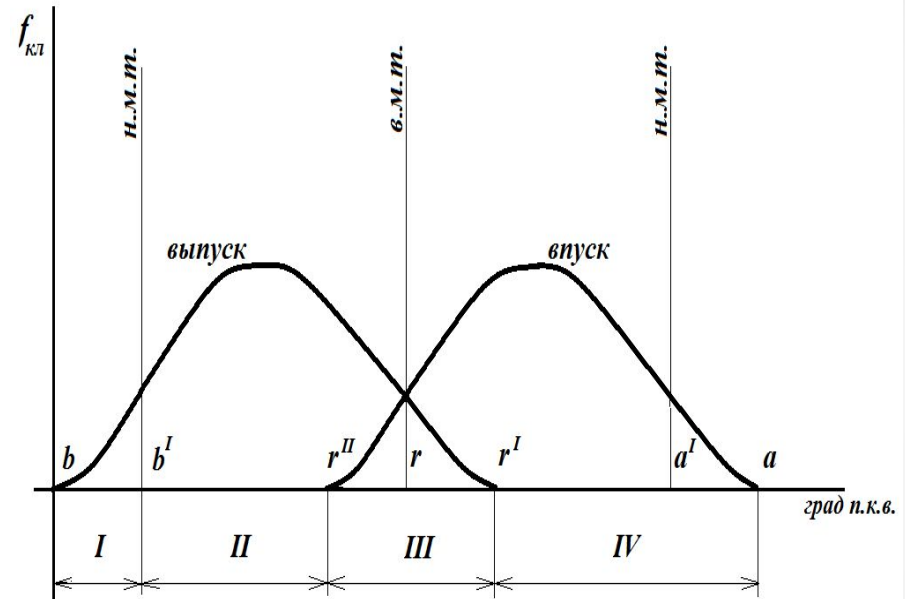
- Температура газа за цилиндром целиком определяется температурой рабочего тела в цилиндре на момент открытия выпускного клапана или окна (точка b цикла). Однако на среднюю температуру отработавших газов оказывают влияние ряд факторов, такие как тепловые потери в выпускном канале, гидродинамическое сопротивление, расширение газа, смешение отработавших газов с воздухом, подаваемым на продувку цилиндра.

Газообмен в четырёхтактных двигателях

Газообмен в четырёхтактном двигателе

На газообмен
четырёхтактного двигателя
отводится два такта
работы, но процесс
занимает несколько
больше, чем 360° град
п.к.в. и состоит:

- I. Свободный выпуск
- II. Принудительный выпуск
- III. Продувка камеры сгорания
- IV. Наполнение, включая дозарядку цилиндра.

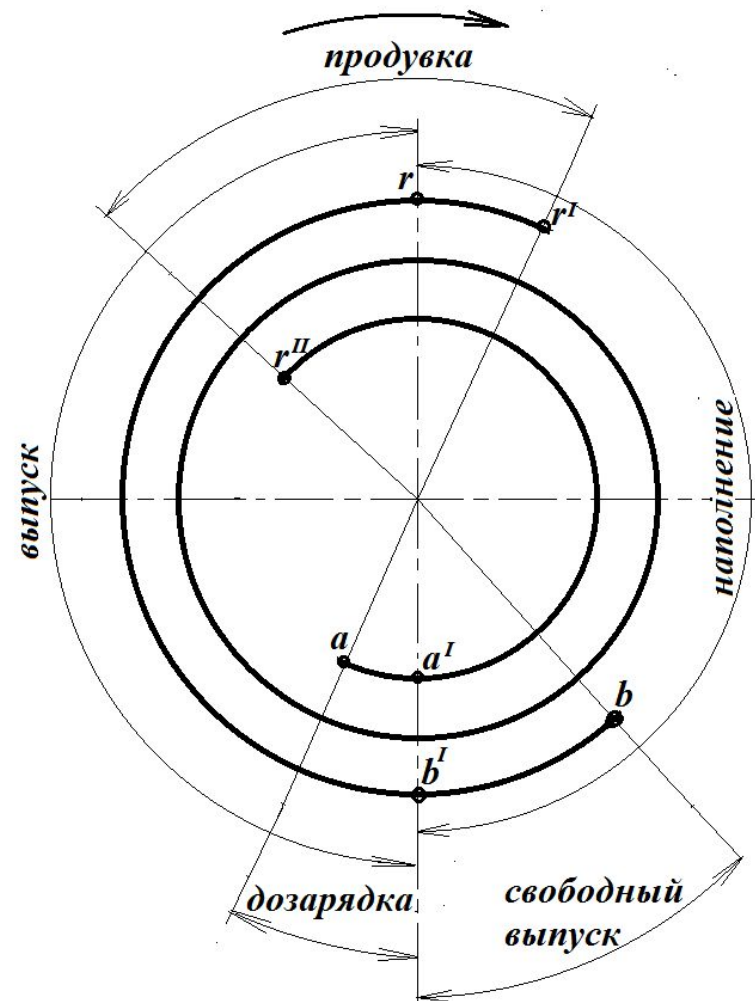


Газообмен в четырёхтактном двигателе

Более детально фазы газообмена можно рассмотреть на круговой диаграмме процесса.

Выделим такт выпуска дугой $b' - r$, а наполнения - $r - a'$

Процесс выпуска начинается свободным выпуском $b - b'$, когда открывается выпускной клапан до достижения поршнем НМТ. Затем следует принудительный выпуск, когда поршень совершает ход к ВМТ - $b' - r$.



Газообмен в

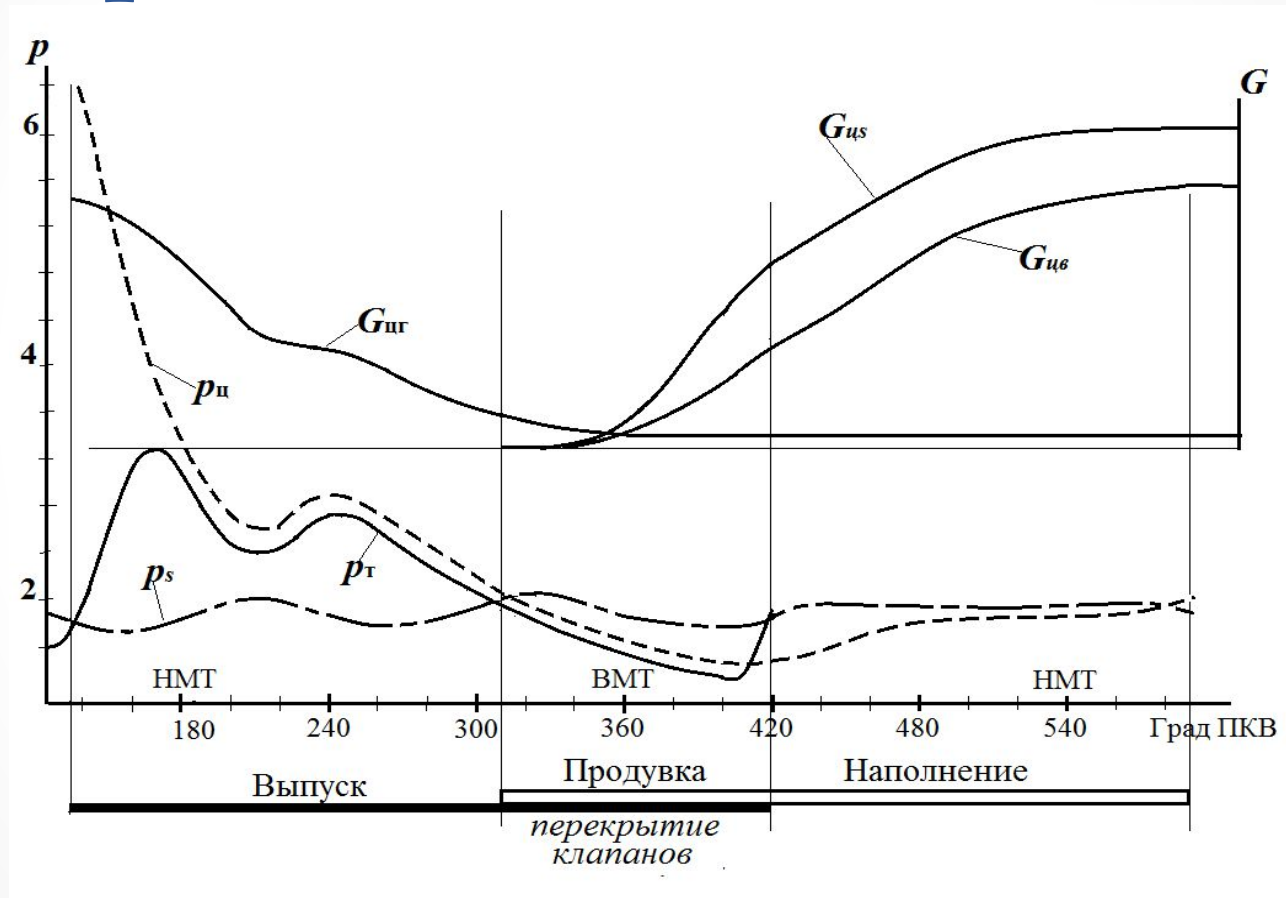
четырёхтактном двигателе

На этом процесс выпуска не заканчивается, поскольку клапан закроется только в точке r' . Запаздывание закрытия клапана после ВМТ - $r - r'$ обусловлено инерционностью газо-воздушных потоков и временем сечения клапанов.

Впускной клапан начинает открываться в точке r'' . При этом давление во впускном коллекторе четырёхтактного двигателя p_s с высоко эффективной системой газотурбинного наддува выше, чем давление перед турбиной p_T , что обеспечивает процесс продувки цилиндра - $r'' - r - r'$.

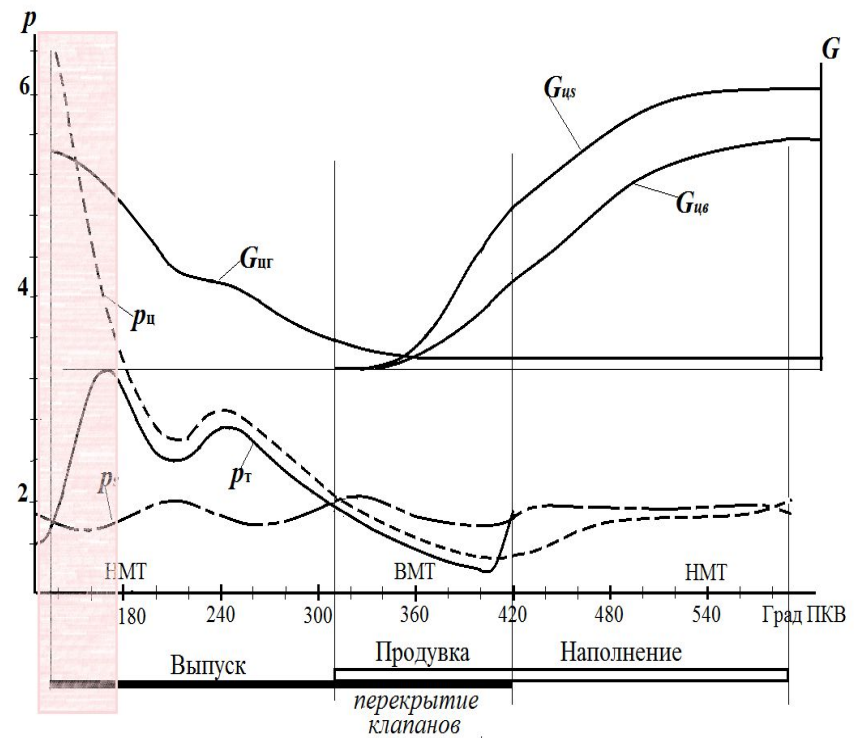
Движение поршня от ВМТ к НМТ инициирует процесс наполнения цилиндра - $r - a'$, а благодаря инерционности воздушного потока и запаздыванию закрытия впускного клапана относительно НМТ реализуется дозарядка цилиндра свежим зарядом - процесс $a' - a$.

Газообмен в четырёхтактном двигателе



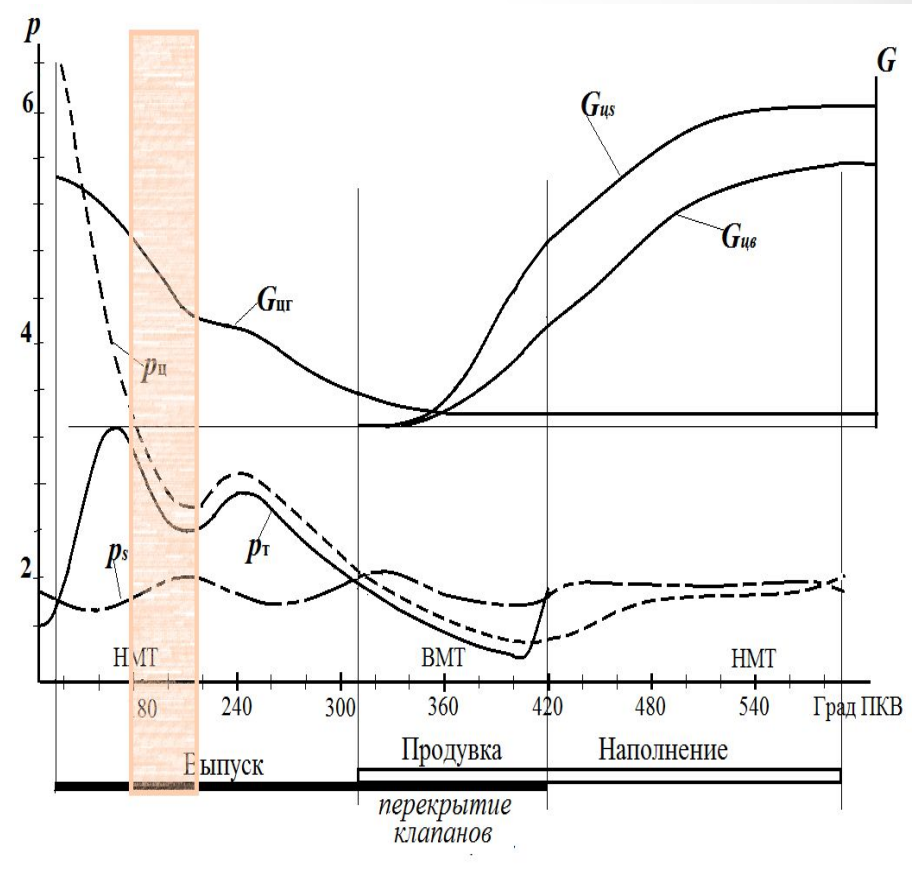
Газообмен в четырёхтактном двигателе

В момент открытия выпускных клапанов давление в цилиндре $p_{ц}$ может оказаться надкритическим, т.е. скорость истечения окажется равной местной скорости звука. Эта максимально возможная скорость истечения определит наибольший расход газа из цилиндра. Давление газа за цилиндром $p_{т}$ будет расти, и, несмотря на движение поршня к НМТ, истечение газа будет продолжаться, вызывая уменьшение массы газа в цилиндре $G_{цг}$. Поэтому этот период газообмена называют свободным выпуском.



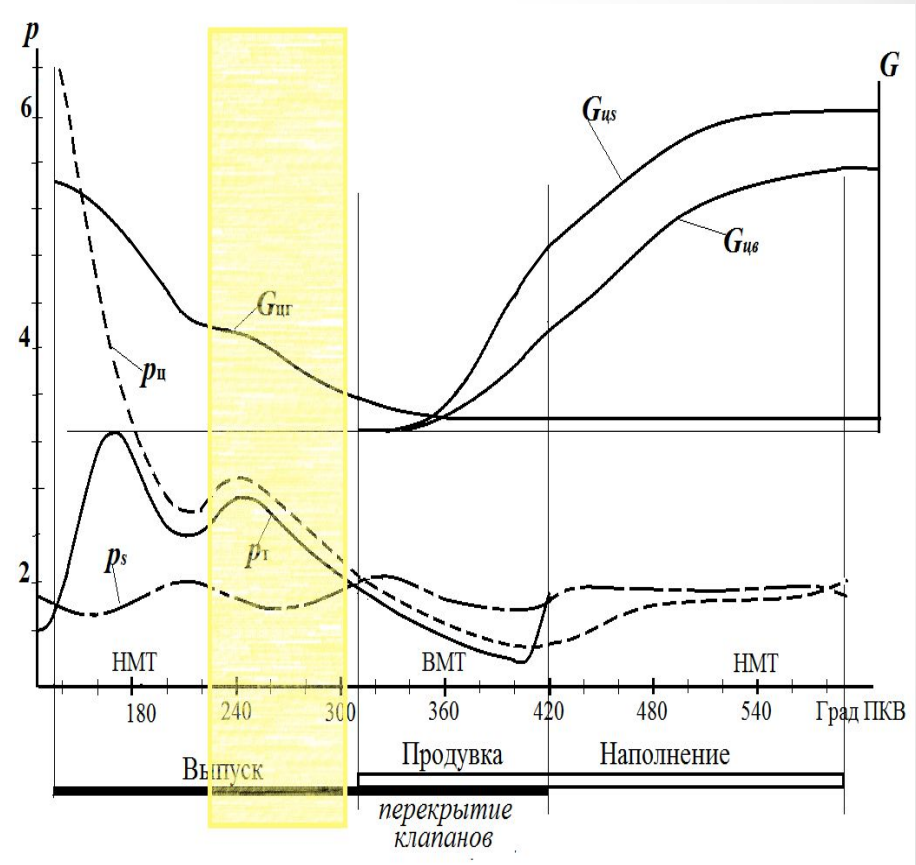
Газообмен в четырёхтактном двигателе

После НМТ поршень начинает движение в сторону уменьшения объема цилиндра, но вблизи МТ скорость поршня и его перемещение минимальны. Поэтому истечение газа происходит только под перепадом остаточного давления в цилиндре и давления в выпускном канале, давление p_T начинает снижаться, а расход газа подходит к локальному минимуму.



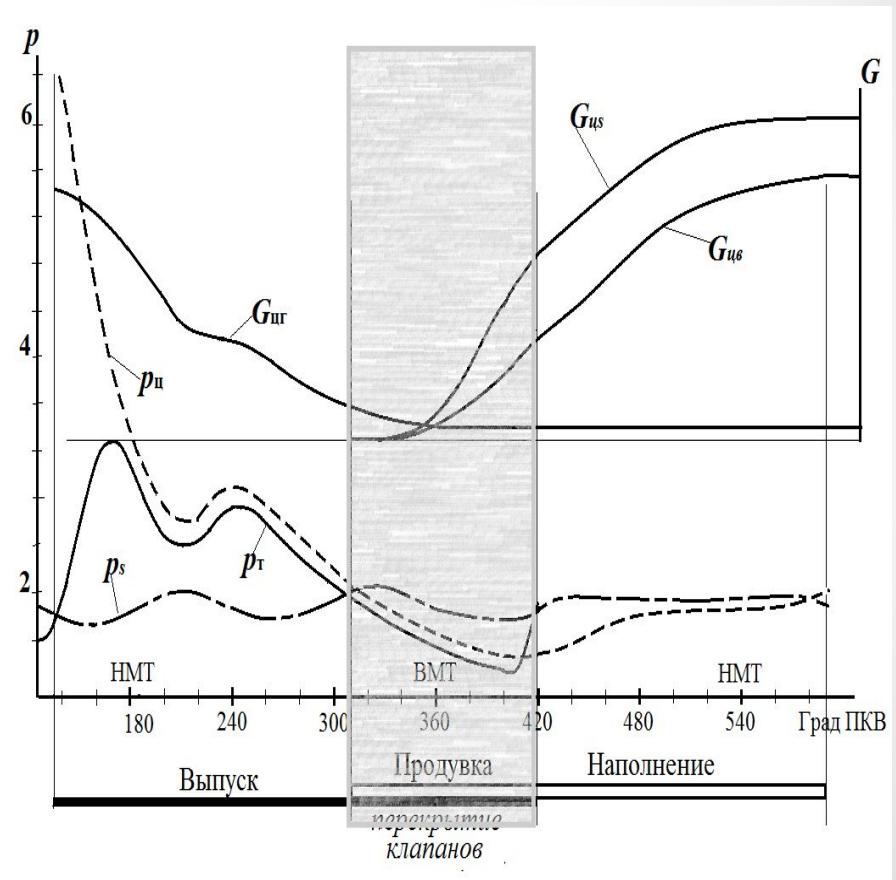
Газообмен в четырёхтактном двигателе

По мере увеличения скорости движения поршня, давление в цилиндре начинает увеличиваться, это приводит к некоторому росту давления за цилиндром и увеличению расхода газа, принудительно покидающего цилиндр. С некоторым запаздыванием от максимума скорости поршня, в расходе и давлениях реализуется второй максимум. Далее скорость поршня начинает падать, что вызывает падение давлений и расхода газа. Период газообмена, инициируемый движением поршня, называют принудительным выпуском.



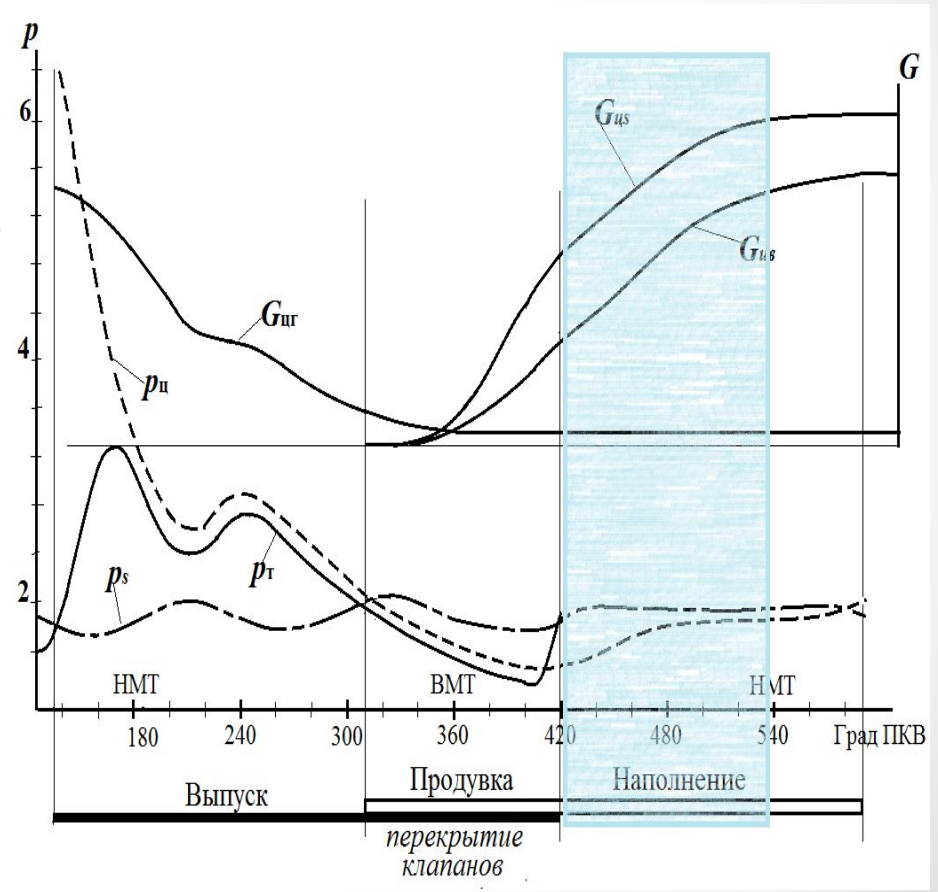
Газообмен в четырёхтактном двигателе

К началу открытия впускных клапанов, давление в цилиндре $p_{ц}$ и давление во впускном коллекторе p_s практически равны, поэтому открытие впускных клапанов не приводит к забросу отработавших газов во впускной коллектор. Давление за цилиндром оказывается меньше p_s и воздух начинает продувать цилиндр, обеспечивая: во-первых, более полную очистку цилиндра за счет инжектирующего действия струи; во-вторых, обдувая нагретые детали, в первую очередь, клапана, охлаждает их, уменьшая теплонапряженность конструкции.



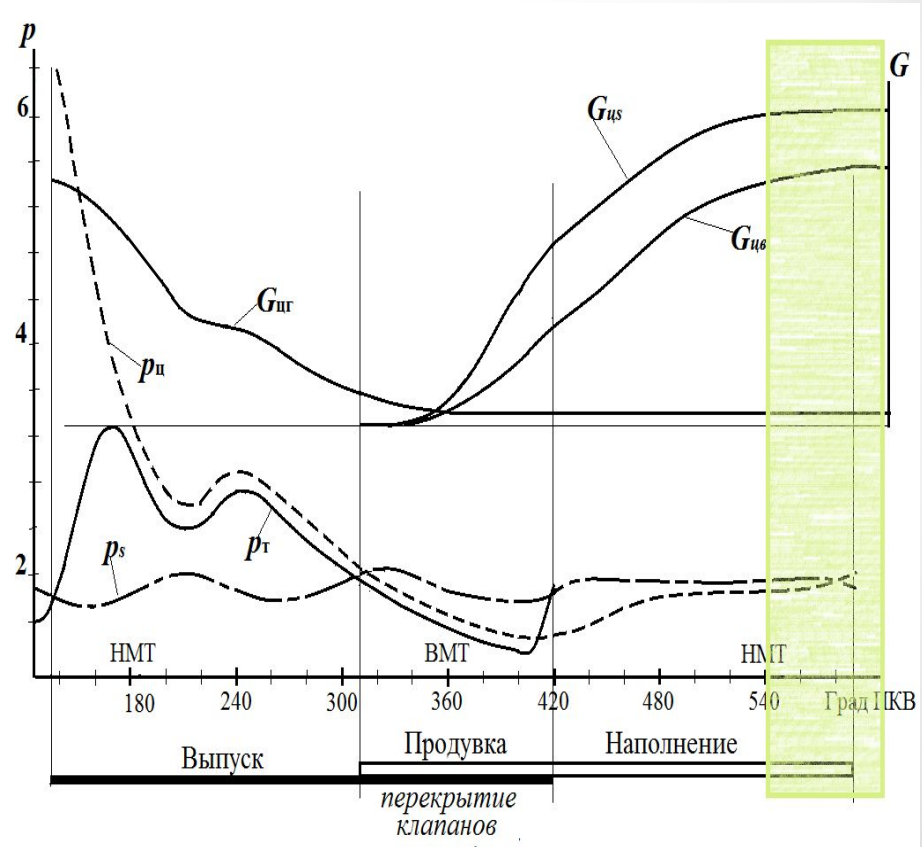
Газообмен в четырёхтактном двигателе

Когда закрываются выпускные клапана, поршень прошел ВМТ и движется к НМТ, высвобождая объем цилиндра и принудительно создает перепад давлений между p_s и $p_{ц}$. Следовательно воздух наполняет цилиндр, а расход воздуха увеличивается. По мере приближения к НМТ, скорость поршня падает, создаваемый перепад давлений уменьшается, что сдерживает рост расхода воздуха. Однако масса воздуха, находящегося в цилиндре $G_{вц}$ не достигает своего максимума.



Газообмен в четырёхтактном двигателе

Остановка поршня в НМТ такта впуска вызывает торможение потока воздуха, поступающего через открытые впускные клапана. Результатом снижения скорости потока является рост давления, которое обеспечивает перепад давлений достаточный для продолжения наполнения цилиндра. Поэтому, несмотря на начало движения поршня к ВМТ, происходит дозарядка цилиндра свежим зарядом, что отражается на графиках изменения масс воздуха $G_{цс}$ и $G_{цв}$. В конце наполнения клапана закрываются и начинается процесс сжатия, а ТДС

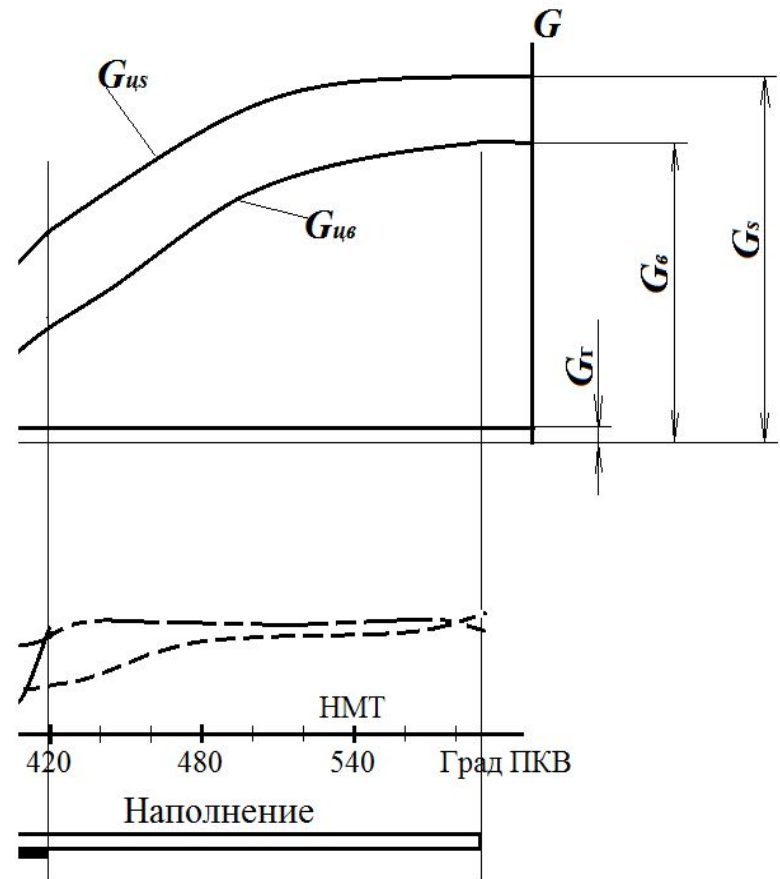


Газообмен в

четырёхтактном двигателе

Результатом процессов газообмена является:

- максимально полное удаление отработавших газов из цилиндра. Оставшаяся масса газа в цилиндре - G_{Γ} .
- наполнение цилиндра свежим воздушным зарядом. Масса воздуха, заполняющего цилиндр - G_B ,
- при этом масса воздуха, прошедшая через впускные клапана составит G_S , а $G_S - G_B$ - та масса воздуха, которая участвовала в процессе продувки цилиндра.



Газообмен в

четырёхтактном двигателе

Фазы газообмена (углы открытия клапанов) четырёхтактного атмосферного двигателя и с газотурбинным наддувом:

Дизель	Впускной клапан		Выпускной клапан		Перекрытие клапанов
	Открытие до ВМТ	Закрытие за НМТ	Открытие до НМТ	Закрытие за ВМТ	
Без наддува	15 - 20	20 - 50	20 - 50	15 - 20	30 - 40
С наддувом	80 - 50	40 - 50	40 - 50	50 - 60	100 - 140

Газообмен в двухтактных двигателях

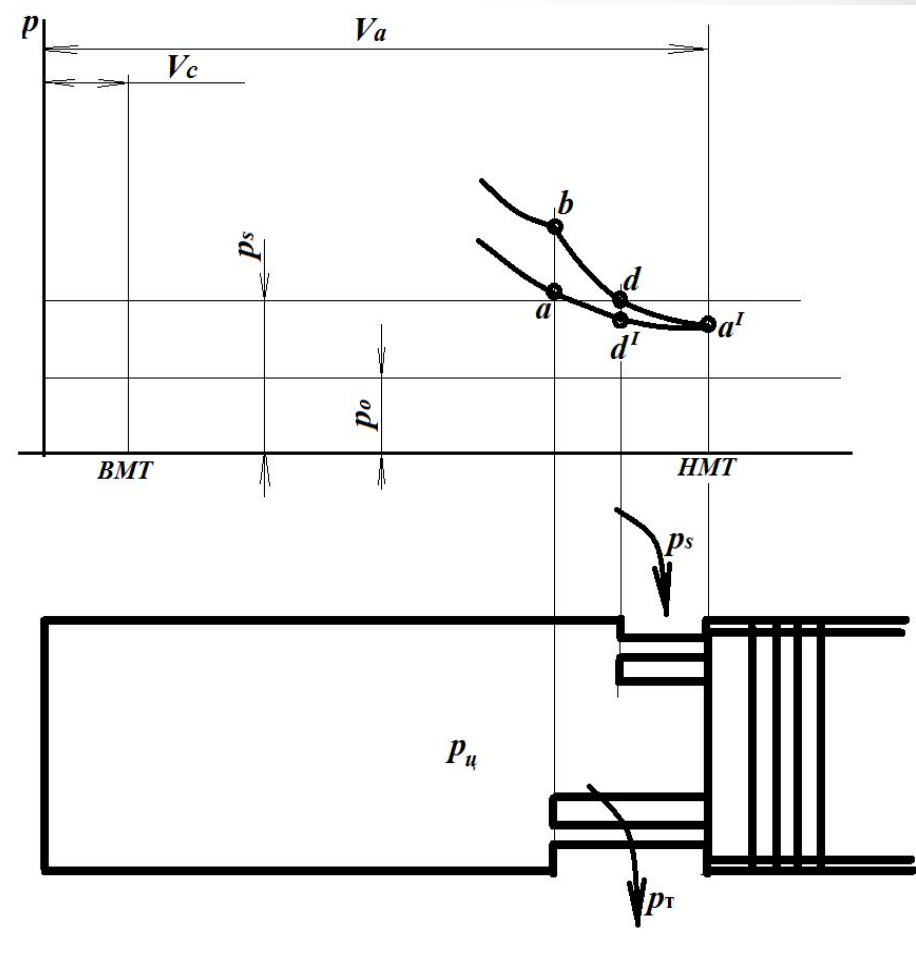
Газообмен в двухтактном двигателе

Особенностью процесса газообмена двухтактного двигателя является отсутствие насосных ходов поршня, которые реализуются в конструкциях четырехтактных двигателей. Из этого следует:

1. Двухтактный двигатель не способен полностью эффективно использовать рабочий объем цилиндра, поскольку газообмен управляется ходом поршня и занимает $140 - 150^\circ$ п.к.в. вблизи НМТ.
2. Для очистки цилиндра от отработавших газов используется продувка цилиндра воздухом, что м.б. реализовано только в том случае, если давление в продувочном ресивере p_s создается большее, чем в выпускном коллекторе, т.е. Для работы двигателя необходим источник сжатого воздуха.

Газообмен в двухтактном двигателе

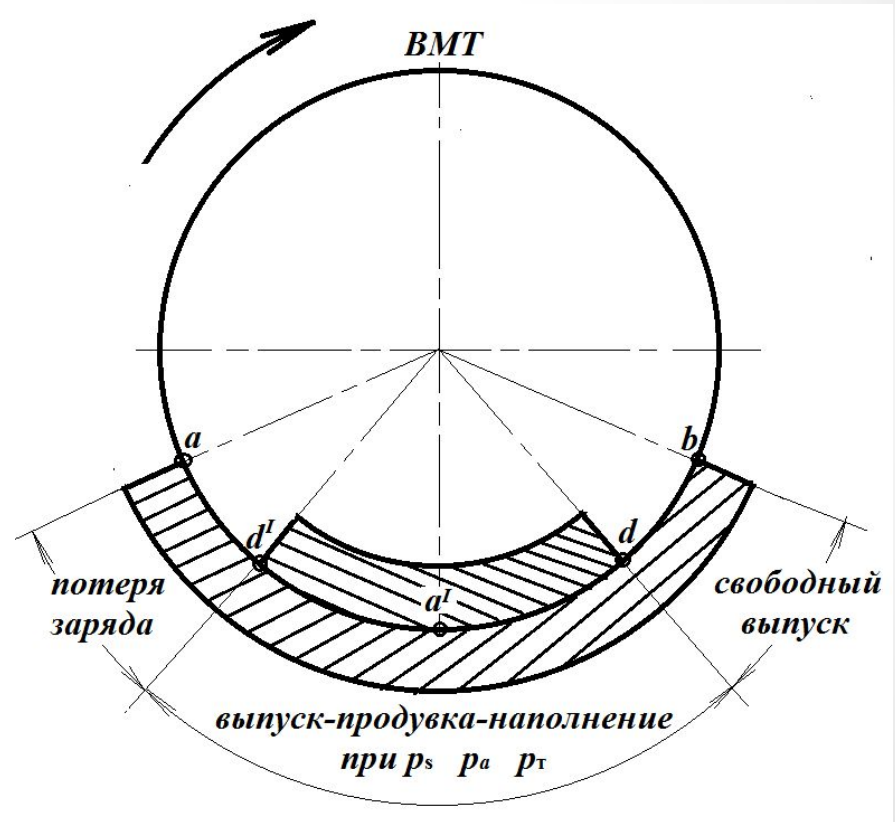
Газообмен в двухтактном двигателе происходит вблизи НМТ поршня, когда объем цилиндра изменяется не существенно, поэтому идеальный цикл и предусматривает изохорный отвод тепла. Процесс выпуска отработавших газов начинается при движении поршня к НМТ в момент открытия выпускного окна (клапана), поэтому такт называют такт расширения-выпуска. Процесс наполнения цилиндра заканчивается после закрытия выпускных органов газораспределения при движении поршня к ВМТ такта наполнения-сжатия.



Газообмен в двухтактном двигателе

Газообмен в двухтактном двигателе условно разделяют на три периода.

- I. Свободный выпуск, когда отработавшие газы (ОГ) покидают цилиндр благодаря высокому давлению в цилиндре.
- II. Продувка, когда поступающий из продувочного ресивера воздух вытесняет ОГ из цилиндра.
- III. Потеря заряда или дозарядка.



Газообмен в двухтактном двигателе

В момент открытия выпускных органов газораспределения давление в цилиндре достигает 10 и более бар, в то время, как давление газа за цилиндром (в выпускном коллекторе) – составляет 3 – 4 бара. Местная скорость звука при параметрах газа в цилиндре ($\sim 1000\text{ K}$) составляет 500 – 600 м/с и достигается при критическом перепаде давления

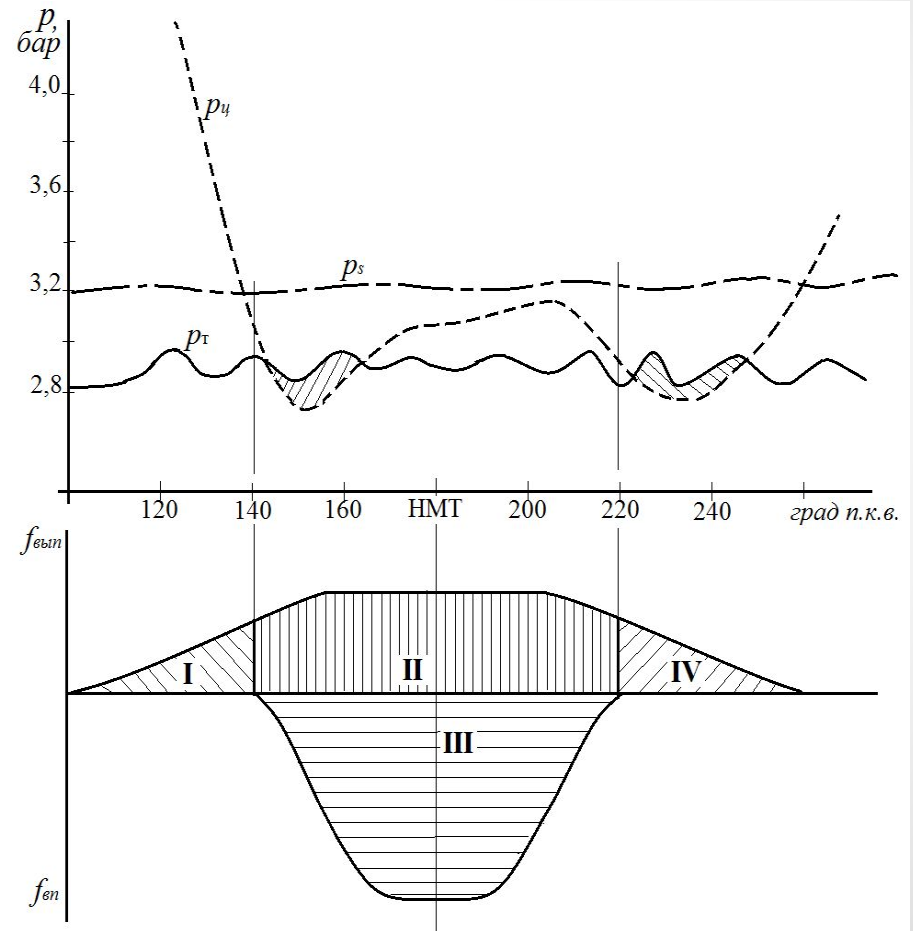
$$\beta_{\text{кр}} = p_{\text{ц}}/p_{\text{т}} \approx 1,83.$$

Это значит, что истечение газа из цилиндра будет происходить в надкритическом режиме со скоростью звука и не будет зависеть от давления газа за цилиндром до того, пока перепад давления не станет меньше $\beta_{\text{кр}}$. Разогнанная до высокой скорости струя газа оказывает инжектирующее действие и вызывает падение давления в цилиндре ниже, чем $p_{\text{т}}$ (заинтригованный участок)

Газообмен в двухтактном двигателе

Истечение отработавших газов их цилиндра под действием перепада давлений происходит до момента открытия впускных окон. К этому моменту времени цилиндр покидает $\approx 60\%$ газов. Период времени (I) от начала открытия выпуска до открытия впускных окон называется свободный выпуск.

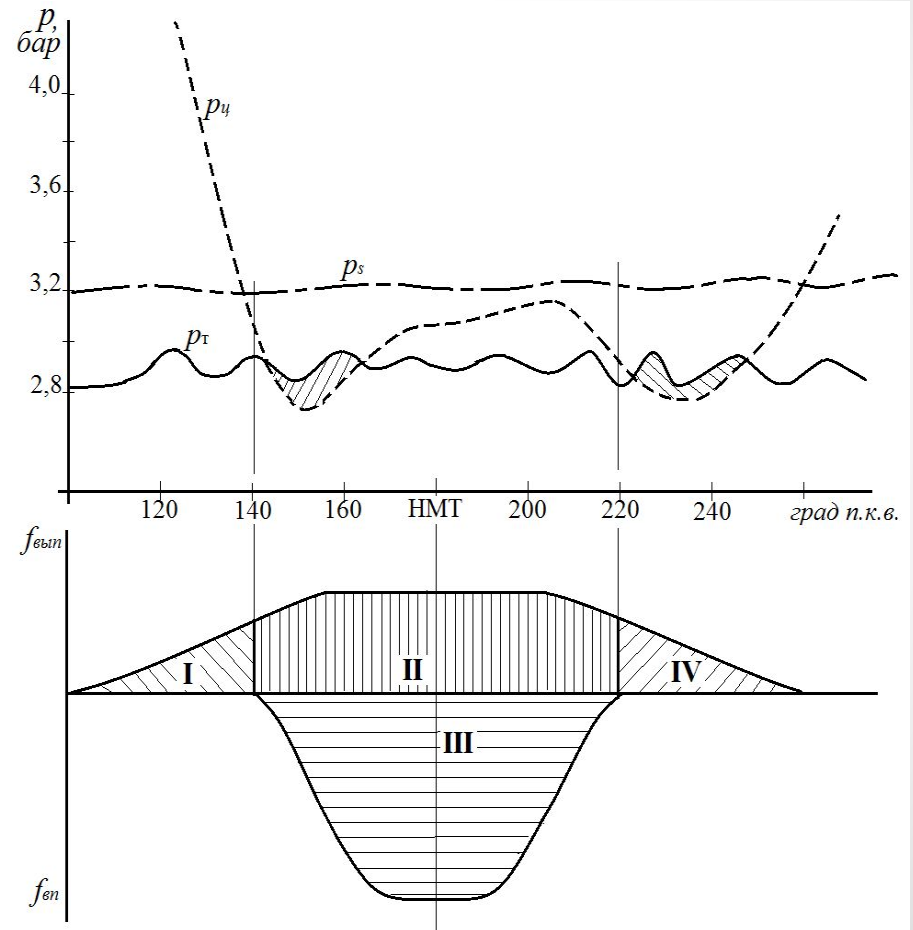
Обязательным условием открытия впускных окон является $p_{ц} < p_{с}$. В противном случае произойдет заброс газа в продувочный ресивер, что может вызвать пожар в ресивере.



Газообмен в двухтактном двигателе

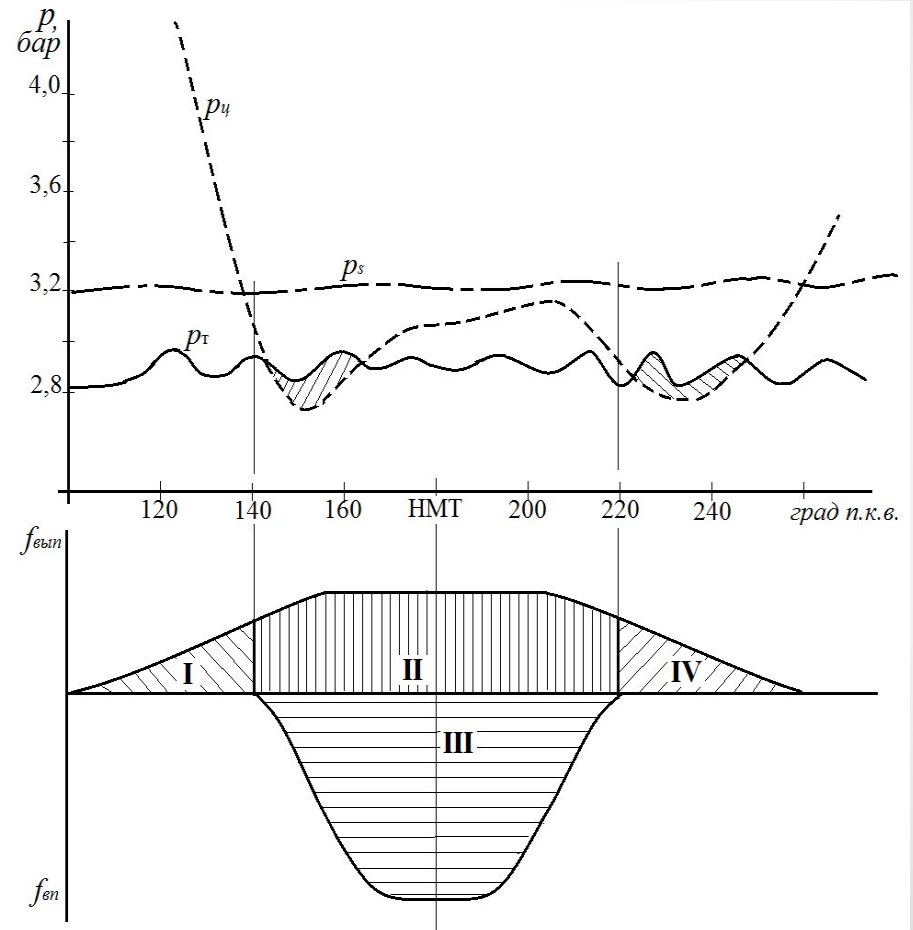
С открытием впускных окон отработавший газ продолжает покидать цилиндр под воздействием перепада давлений между продувочным ресивером и выпускным коллектором. Этот процесс (II) можно рассматривать как принудительный выпуск.

Одновременно происходит продувка цилиндра и наполнение его свежим зарядом (III), когда воздух из продувочного ресивера вытесняет из цилиндра отработавшие газы.



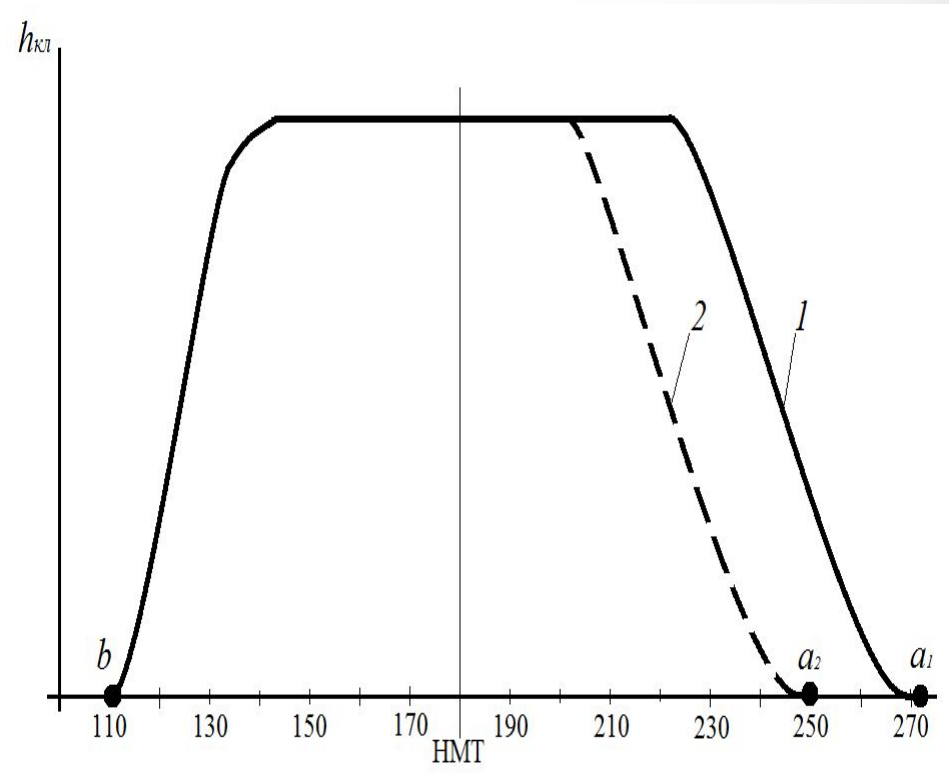
Газообмен в двухтактном двигателе

После закрытия впускных окон в рассматриваемой конструкции подача воздуха из ресивера прекращается, но свежий заряд продолжает покидать цилиндр. Это вызывает падение давления в цилиндре, причем давление может оказаться ниже, чем p_T за счет инжектирующего действия струи газа (заштрихованный участок). Этот период (IV) называется потеря заряда. Необходимо отметить, что в отдельных конструкциях возможна дозарядка цилиндра свежим зарядом.



Газообмен в двухтактном двигателе

С целью оптимизации процессов газообмена для различных режимов работы двухтактного двигателя в современных конструкциях используют электронное регулирование открытия выпускного клапана. Это позволяет на режимах частичной нагрузки (кривая 2) более полно использовать рабочий объем цилиндра, повышать действительную степень сжатия и обеспечивать более высокую топливную экономичность двигателя.



Способы организации
газообмена в
двухтактном двигателе

Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

Неоспоримым преимуществом двухтактных двигателей длительное время являлась простота конструкции, которая определялась отсутствием механизма газораспределения. Газообмен в таких конструкциях осуществлялся при помощи впускных и выпускных окон, расположенных в нижней части цилиндра, открытие которых управляется перемещением поршня. В таких системах газообмена газовые потоки при продувке омывают цилиндр по всему его контуру. Поэтому эти системы получили название контурные.

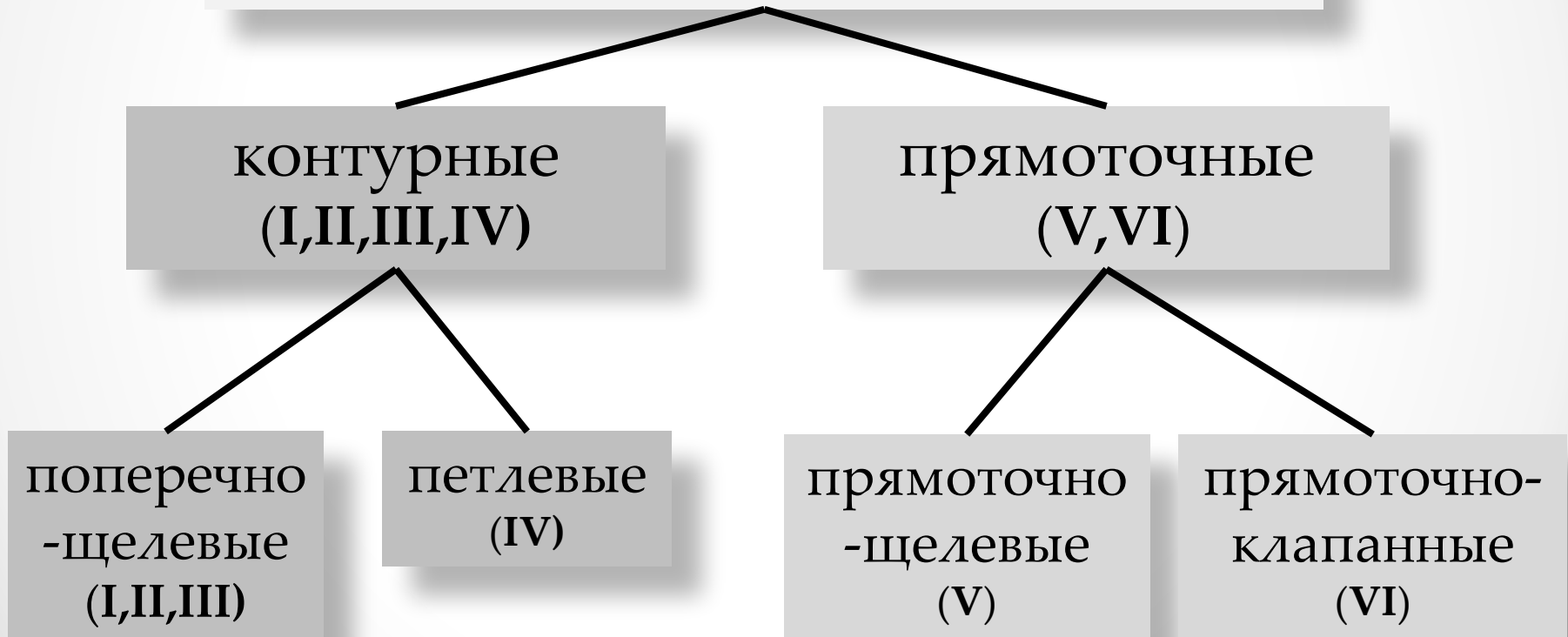
Наряду с контурными системами существуют системы прямоточные.



Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

Схемы газообмена

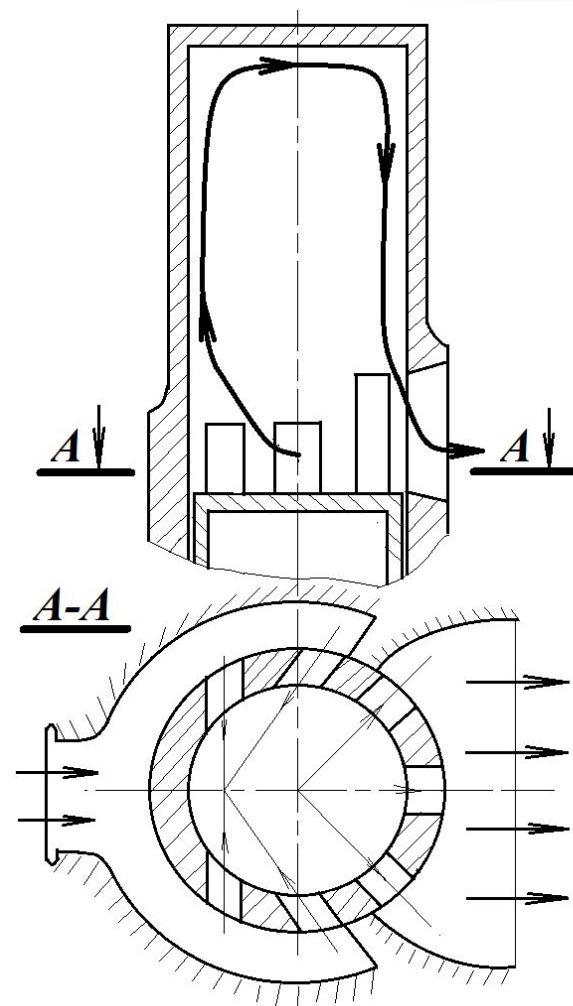


Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

I

В представленной схеме газообмена (которая рассматривалась ранее) при продувке цилиндра воздух в диаметральной плоскости движется поперек цилиндра (с лева на право). Такие системы получили название поперечно-щелевые.

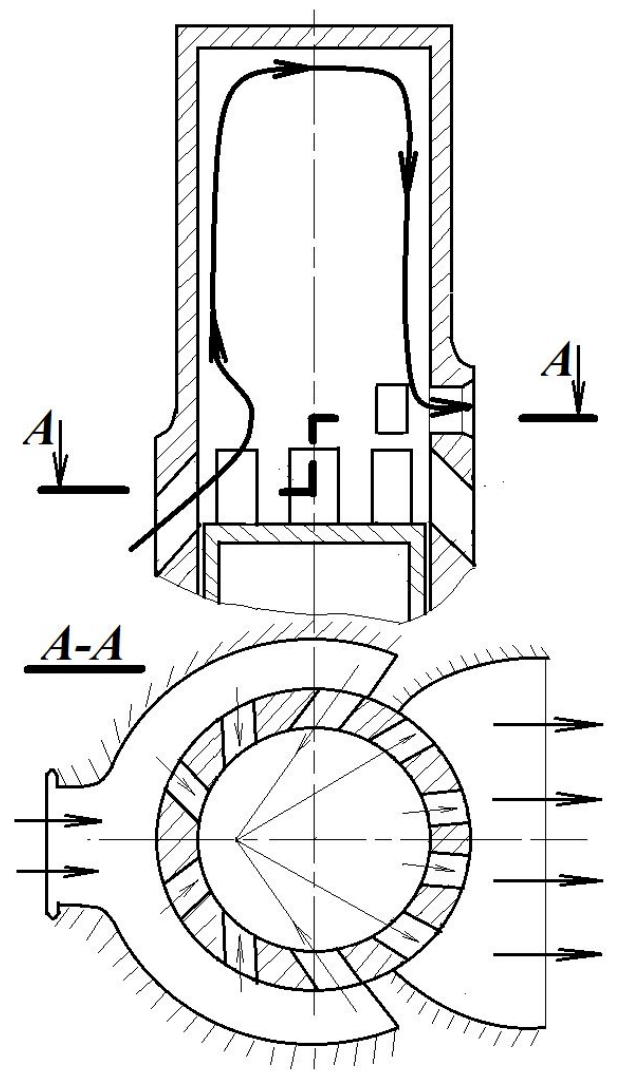


Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

II

Поперечно-щелевая продувка может быть организована, когда продувочные и выпускные окна располагаются на разных уровнях. Избежать потерю заряда в I и II на последней стадии газообмена возможно за счет установки в выпускном канале управляемых заслонок.

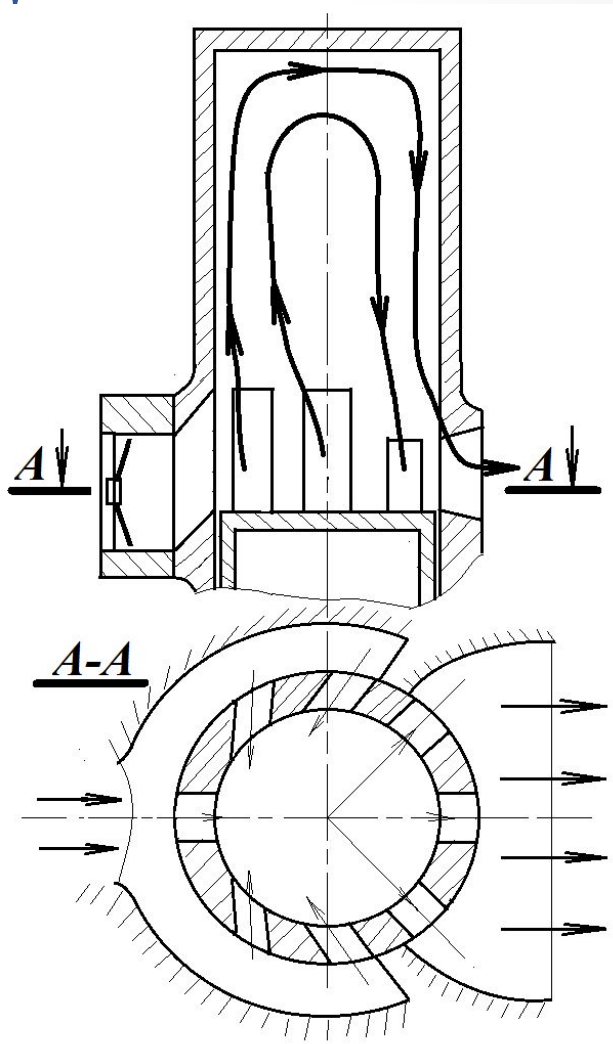


Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

III

Показанная схема газообмена позволяет организовать дозарядку цилиндра вместо периода потери заряда. Для предотвращения заброса отработавших газов в продувочный ресивер во впускном канале устанавливается заслонка.

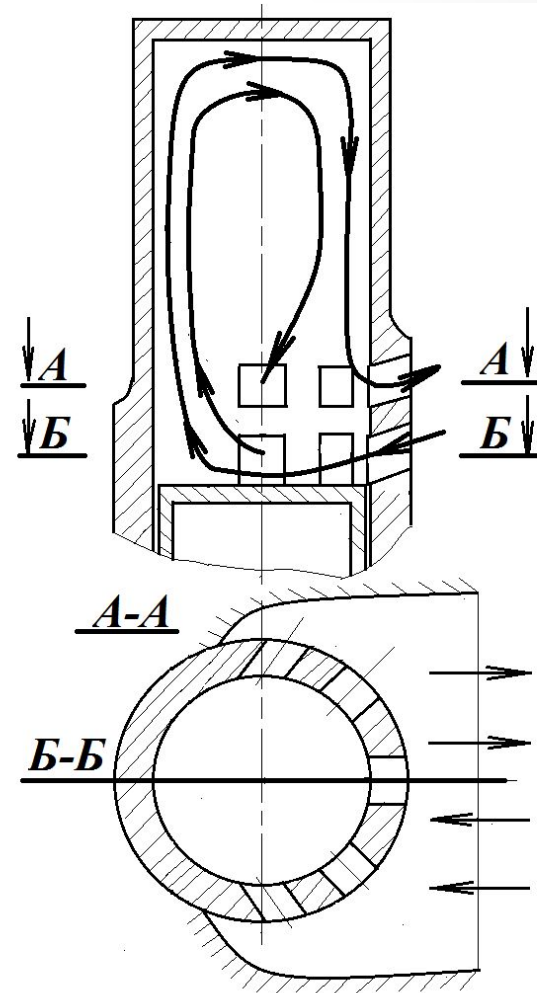


Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

IV

Конструктивно газообмен может быть организован так, что продувочный воздух при движении в цилиндре описывает петлю. Такая продувка называется контурно-петлевой



Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

Несмотря на преимущества двигателя с контурной продувкой, выраженной в простоте конструкции, исключающей использование механизма газораспределения, двухтактный двигатель в таком конструктивном исполнении современными двигателестроителями больше не производится в основном по двум причинам.

- Контурная продувка предполагает достаточно большой путь прохождения продувочного воздуха, что ухудшает очистку цилиндра от отработавших газов. Этот недостаток усугубляется тем положением, что современные тенденции двигателестроения проявляются в увеличении S/D .
- Неуклонный рост уровня форсировки по p_e современных двигателей приводит к росту тепловой напряженности деталей, в то время, как конструкция двигателя имеет очень уязвимое в этом отношении место на перемычке между продувочными и выпускными окнами.

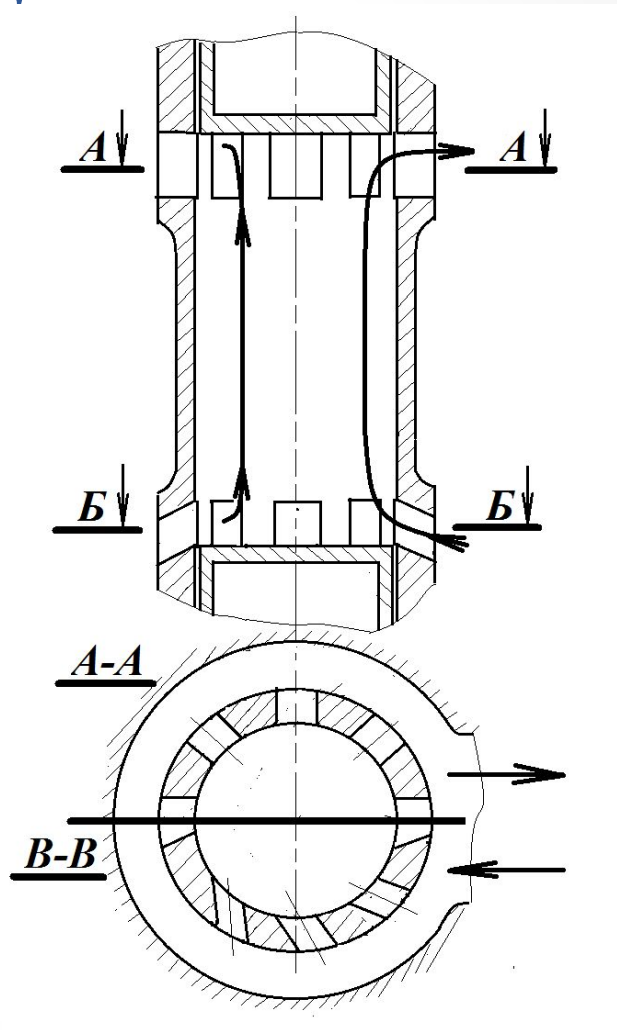
Этих недостатков лишена конструкция двигателя с прямоточной

Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

V

Классическая конструкция, в которой реализуется прямоточная продувка это двигатель с противоположно движущимися поршнями – ПДП. Однако она конструктивно слишком сложна и требует использование двух КШМ с двумя коленчатыми валами и кинематической связи между ними.

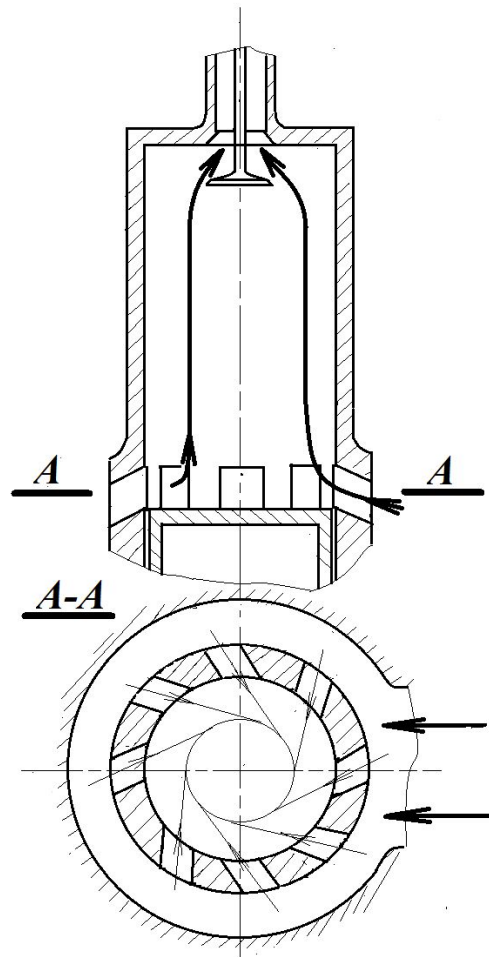


Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

VI

Самой совершенной на сегодняшний день является прямоточно-клапанная продувка цилиндра, предпочтение которой отдают все производители современных высокофорсированных двухтактных судовых ДВС. Как уже отмечалось, эта схема позволяет управлять фазам газообмена на различных режимах.



Способы организации газообмена в

двухтактном двигателе

Прямоточные системы газообмена по сравнению с контурными системами обеспечивают:

- лучшее качество газообмена за счет минимизации застойных зон и пути, который проходит воздух при продувке цилиндра;
- сокращение потерь воздуха при газообмене;
- возможность варьирования энергией отработавших газов, подаваемых на газовую турбину турбокомпрессора благодаря управлению процессом выпуска отработавших газов;
- симметричное распределение температурных полей на втулке цилиндра и на днище поршня, снижая тем самым их тепловую напряженность.

Динамика газообмена

Динамика газообмена

Проходные сечения органов газораспределения изменяются во времени цикла работы двигателя. Управление площадью органов может производиться движением поршня (для окон) или кулачками распределительного вала (для клапанов). Характер изменения площади определяют аналитически или отражают графически в виде зависимости площади проходных сечений выпускных и/или продувочных органов от угла поворота коленчатого вала. Такую зависимость называют диаграммой площадей проходных сечений, а площадь под графиком (диаграммы) – **время-сечение** органов газораспределения.

Динамика газообмена

Время-сечение отражает время и динамику изменения площади органов газораспределения и определяет характер протекания газообмена в целом. Для обеспечения качества протекания процессов законы изменения площади тщательно рассчитываются, а потом доводятся на опытных отсеках или головном образце двигателя. Результатом процесса доводки является наиболее полное обеспечение основных требований, предъявляемых к процессам газообмена поршневого ДВС.

Динамика газообмена

К впускным органам газораспределения предъявляются следующие требования:

- 1. Время-сечение должно обеспечивать поступление в цилиндр необходимого количества воздуха для продувки и наполнения;
- 2. Форма окон или каналов должна обуславливать такое направление воздушного потока, которое обеспечивало бы хорошее качество газообмена и необходимое для процесса смесеобразования интенсивность движение заряда камеры сгорания;

Динамика газообмена

- 3. Размеры впускных окон и фазы их открытия должны максимально обезопасить продувочный ресивер от заброса отработавших газов, а также обеспечить требуемую задержку подачи продувочного воздуха;
- 4. Площадь открытия окон по углу поворота коленчатого вала в начальный момент должна увеличиваться по возможности быстро для того, чтобы максимально эффективно реализовать повышенные перепады давления между продувочным ресивером и цилиндром.

Динамика газообмена

К выпускным органам газораспределения предъявляются следующие требования:

- 1. Время-сечение выпускных органов должно обеспечивать максимально полное удаление продуктов сгорания из цилиндра двигателя;
- 2. Необходимо учитывать, что уменьшение времени-сечения свободного выпуска для увеличения полезного хода поршня и более полного использования рабочего объема цилиндра может привести к повышению давления в цилиндре к моменту открытия впускных окон;

Динамика газообмена

- 3. Необходимо максимально возможно резкое увеличение площади открытия выпускных органов на начальной стадии выпуска.

Для контроля соблюдения перечисленных требований производится построение или аналитический расчет время-сечения органов газораспределения.

Построение диаграммы производится в следующем порядке



Время-сечение
продувочных и
выпускных ОКОН

Время-сечение продувочных и выпускных окон

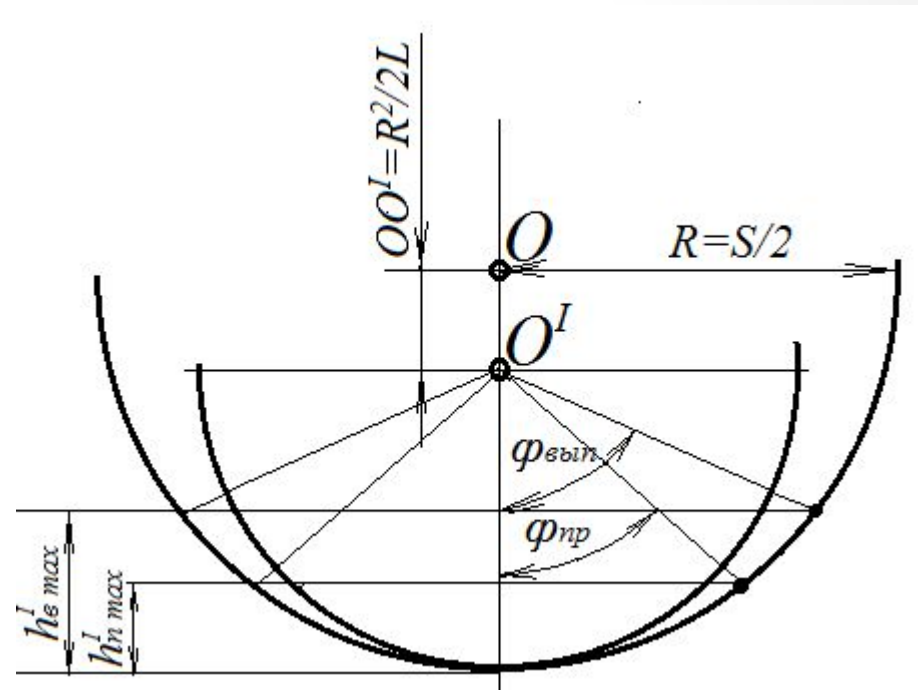
Для продувочных и выпускных окон в случае, если выбраны фазы газораспределения:

Выбирается масштаб оси ординат и проводится полуокружность диаметра $S/2$.

Рассчитывается поправка Брикса

$$OO^I = \frac{(S/2)^2}{L}$$

и проводится полуокружность со смещением OO^I (в выбранном масштабе). Под соответствующими фазам газораспределения углами, проводятся лучи из точки O^I . Таким образом размеры окон определены.



Время-сечение продувочных и

ВЫПУСКНЫХ ОКОН

Располагаемое время-сечение зависит от фаз газораспределения и размеров продувочных и выпускных окон или клапанов. При допущении, что окна прямоугольной формы и не имеют наклона,

$$f \cdot dt = b \cdot h \cdot dt,$$

где f – текущая площадь окна; h – высота окна, открытая поршнем в текущий момент; b – суммарная ширина окон по окружности.

При постоянной частоте вращения коленчатого вала

$$dt = \frac{d\varphi}{6n}$$

и

$$f \cdot dt = \frac{b}{6n} h \cdot d\varphi.$$

Время-сечение продувочных и

ВЫПУСКНЫХ ОКОН

В результате интегрирования получим располагаемое время-сечение

$$A = \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} f \cdot d\varphi.$$

Диаграмма время-сечение представляет собой совмещенную диаграмму линейных размеров окон и кривой пути поршня в функции угла поворота коленчатого вала. Для построения выберем масштаб линейных размеров высоты окон (масштаб ординат)

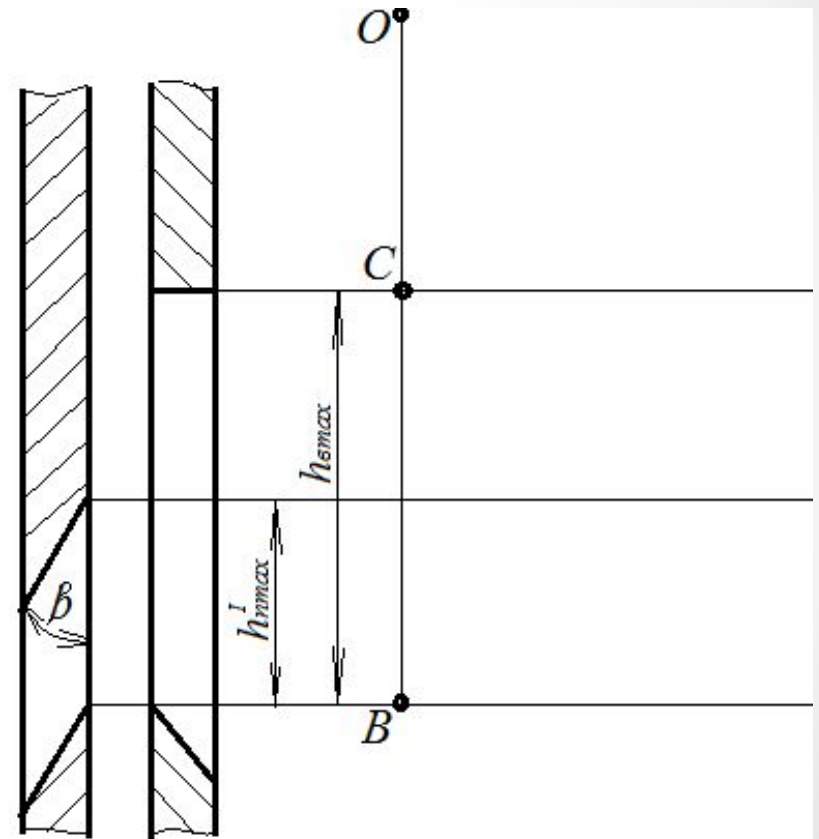
$$K = \frac{h_{\text{действ}}}{h_{\text{чертежа}}}, \left[\frac{\text{ММ}}{\text{ММ}} \right]$$

и масштаб углов поворота коленчатого вала (масштаб абсцисс)

$$m = \frac{\varphi}{l}, \left[\frac{\text{град}}{\text{ММ}} \right].$$

Время-сечение продувочных и выпускных окон

В масштабе чертежа прорисуем продувочные и выпускные окна высотой $h'_{п\max}$ и $h_{в\max}$ соответственно. Проводим горизонтали, выбираем произвольное положение точки B . Строим вертикальный отрезок $B - O$, равный половине хода поршня в масштабе чертежа. Отмечаем точку C .

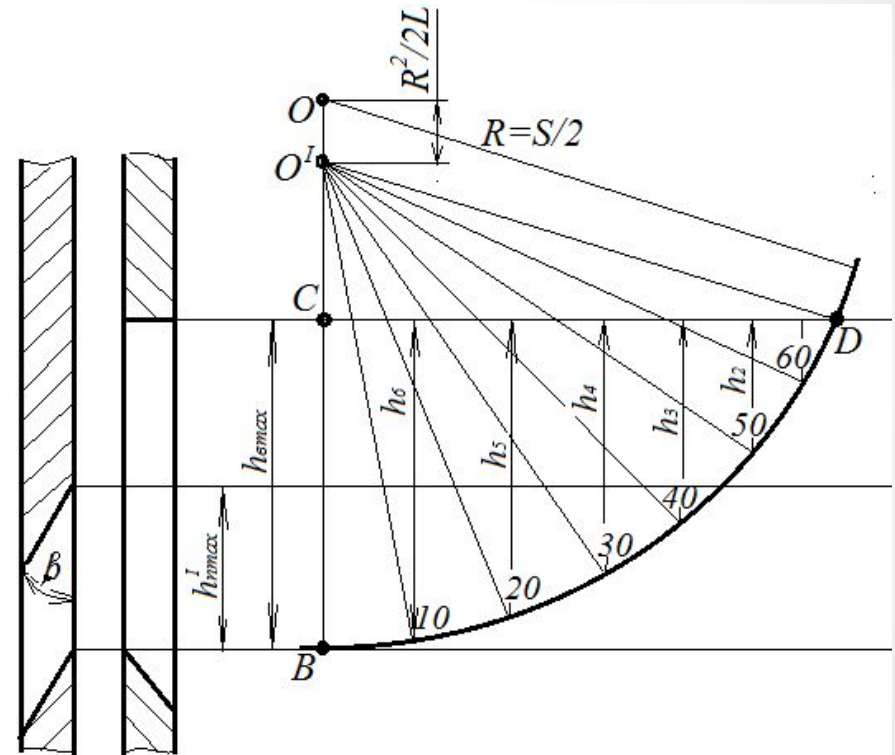


Время-сечение продувочных и выпускных окон

Из точки O проведем дугу окружности радиусом $S/2$.
Рассчитаем поправку

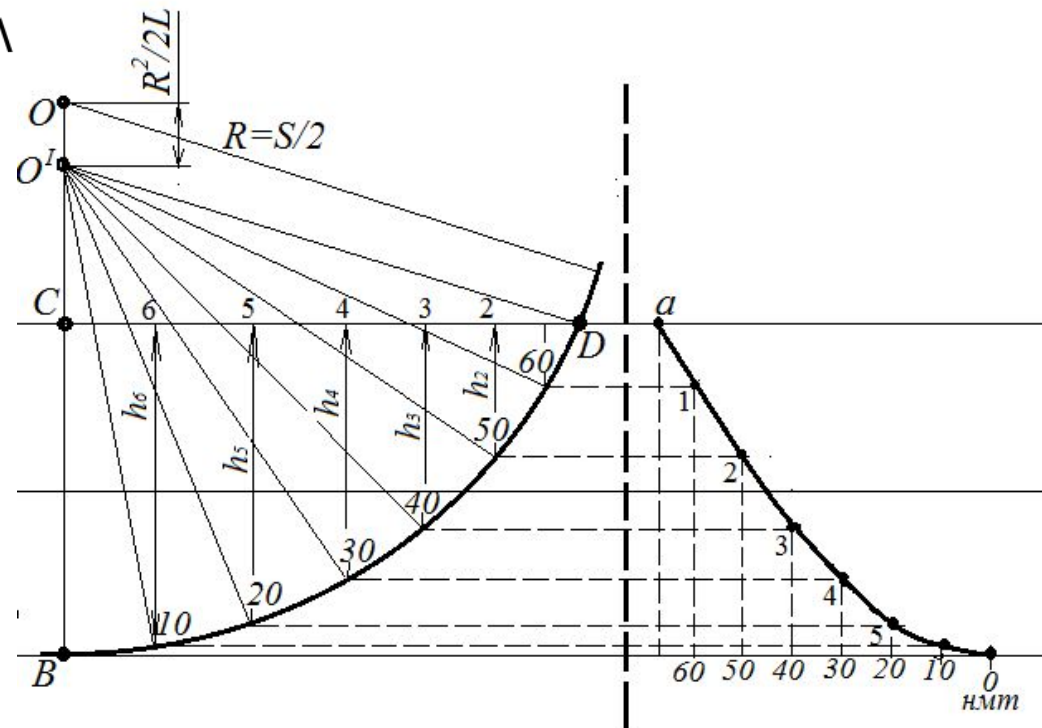
$$OO' = \frac{R^2}{2L}$$

и построим бицентровую диаграмму Брикса. На дуге BD наносим деления через 10 градусов поворота коленчатого вала (можно менее), чтобы получить не менее 5 точек. В результате получим текущие значения высот окон h_1, h_2, h_3 и т.д. для различных углов поворота КВ.



Время-сечение продувочных и выпускных окон

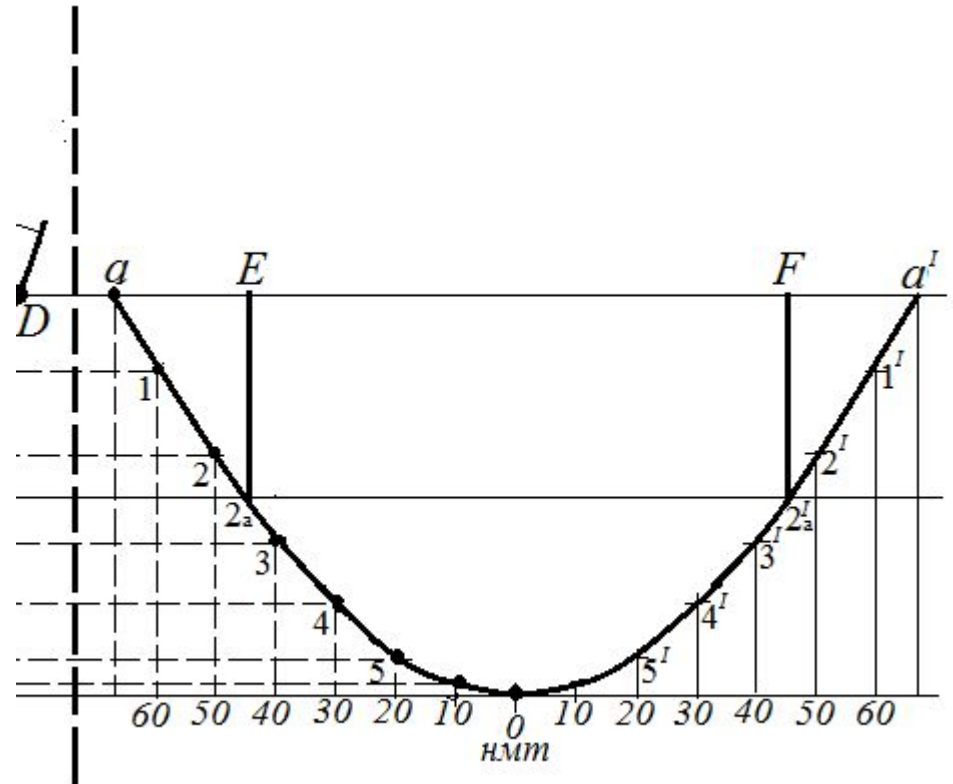
В масштабе l на оси абсцисс откладываем угловые положения коленчатого вала и находим точки пересечения ординат положения поршня с соответствующими значениями углового положения КВ. Соединяем точки плавной кривой.



Время-сечение продувочных и выпускных окон

Отдельно отметим на диаграмме момент начала открытия продувочных окон точкой 2_a . Тогда отрезок $E2_a$ - высота открытия выпускных окон в момент начала продувки (открытия продувочных окон).

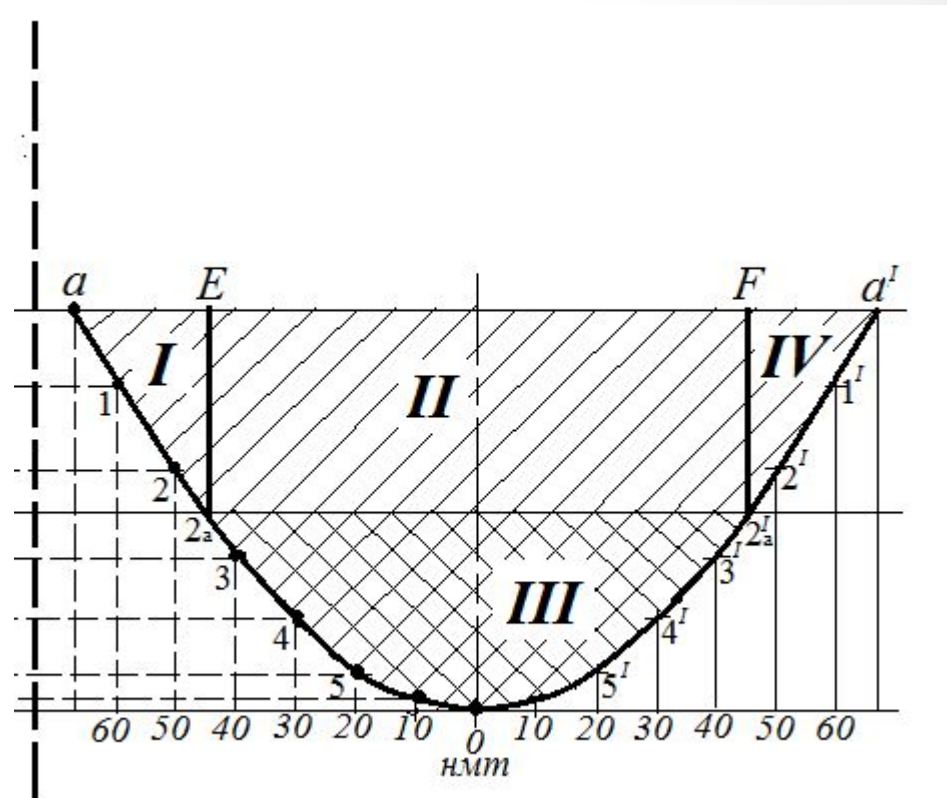
Как очевидно, в рассматриваемом случае контурной поперечно-щелевой продувки диаграммы открытия и закрытия окон симметричны относительно ВМТ. Обозначим точки идентично со штрихом.



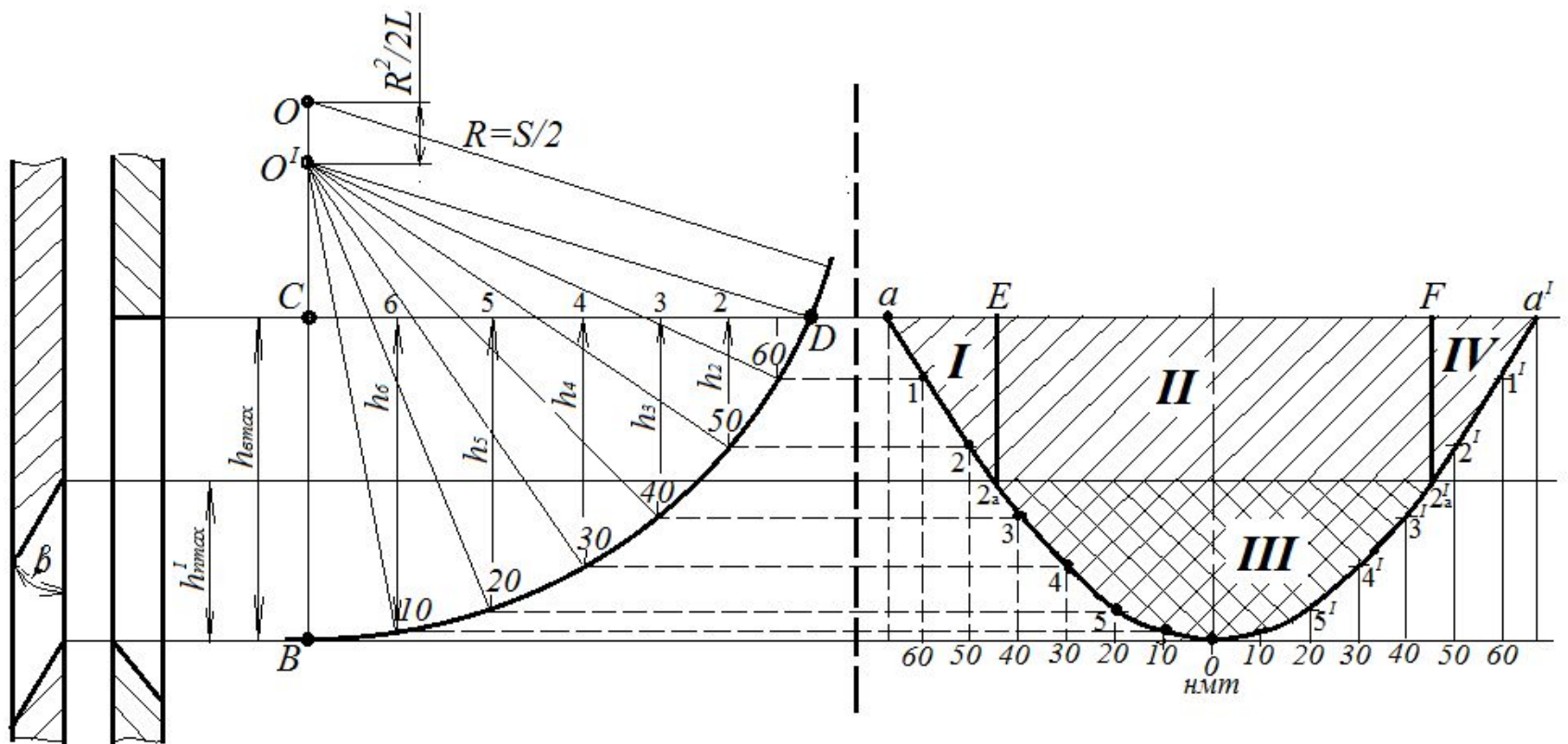
Время-сечение продувочных и выпускных окон

На диаграмме время-сечения можно выделить четыре области.

- I. Предварение выпуска или свободный выпуск, до момента открытия продувочных окон (площади $aE2_a$),
- II. Принудительный/принужденный выпуск (площадь $E2_a02'_aF$),
- III. Продувка-наполнение (площадь $2_a02'_a$),
- IV. Потеря заряда (площадь $F2'_a0'$).



Время-сечение продувочных и выпускных окон



Время-сечение продувочных и

ВЫПУСКНЫХ ОКОН

Измерив площадь F любого участка полученной диаграммы можно рассчитать действительное располагаемое время-сечение как

$$A = \frac{b}{6n} FKm \cdot 10^{-6} ,$$

если вести расчёты в $\text{м}^2 \cdot \text{с}$ и считать сечение окна прямоугольным.

Правильность выбора времени-сечения можно оценить по средней скорости движения продуктов сгорания или воздуха. Для определения средней скорости можно использовать обобщенную формулу

$$w = \frac{V}{A}$$

Критерии оценки газообмена

Критерии оценки газообмена

Так, средняя скорость продуктов сгорания в ходе свободного выпуска

$$w_I = \frac{V_f(1-\psi_b)}{A_I},$$

если A_I - время-сечение свободного выпуска.

Введем понятие коэффициента избытка продувочно-наддувочного воздуха как отношение **объёма** воздуха прошедшего по впускному тракту к рабочему объёму цилиндров двигателя,

$$\varphi_k = \frac{V_s}{iV_h},$$

где

$$V_s = V_0 \frac{p_0 T_s}{p_s T_0}$$

(индексы "0" относятся к условиям окружающей среды, "s" – к условиям продувочного ресивера).

Критерии оценки газообмена

Тогда средняя скорость истечения продуктов сгорания через выпускные окна/клапана в принудительном выпуске

$$w_{II} = \frac{\varphi_k V_h}{A_{II}},$$

а

$$w_{III} = \frac{\varphi_k V_h}{A_{III}}$$

средняя скорость течения воздуха в продувочных окнах.

Критерии оценки газообмена

У выпускаемых двигателей скорости (в м/с) находятся в следующих пределах

		МОД	ВОД	
Выпуск	свободный		200-500	400-1000
	Принудительный	через окна	50-100	100-200
		через клапана	50-100	75-150
Продувка-наполнение	щелевая		120-140	150-200
	с автоматическими клапанами		60-130	120-200

Критерии оценки газообмена

Наиболее важным критерием правильности выбора времени-сечения органов газораспределения является давление в цилиндре в конце свободного выпуска (перед открытием продувочных окон), которое рассчитывается как

$$p_d = \frac{0,102p_T}{\left[\frac{\mu_{с.в.} \sqrt{T_b}}{V_{ср}} A_I + 0,59 + 0,11 \ln \frac{V_d}{V_b} \right] \left(\frac{p_T}{V_b} \right)^{0,115} - 0,496}.$$

В том случае, если $p_d > p_s$, при открытии продувочных окон произойдет заброс высокотемпературных продуктов сгорания в продувочный ресивер, что может вызвать возгорание масла при его наличии в ресивере. Поэтому при конструировании и расчете время-сечения такое соотношение давлений следует избегать.

Время-сечение выпускных клапанов

Время-сечение выпускных

клапанов

Время-сечение выпускного клапана зависит от профиля кулачка и кинематики привода клапана. При выборе профиля кулачка руководствуются следующими положениями.

1. Начало подъёма, посадка на седло и переходы через сопряжения отдельных участков профиля должны осуществляться плавно во избежание чрезмерных динамических нагрузок на детали механизма.
2. Распределение характерных участков профиля должно обеспечивать наибольшую величину время-сечения открытия клапана.

Время-сечение выпускных

клапанов

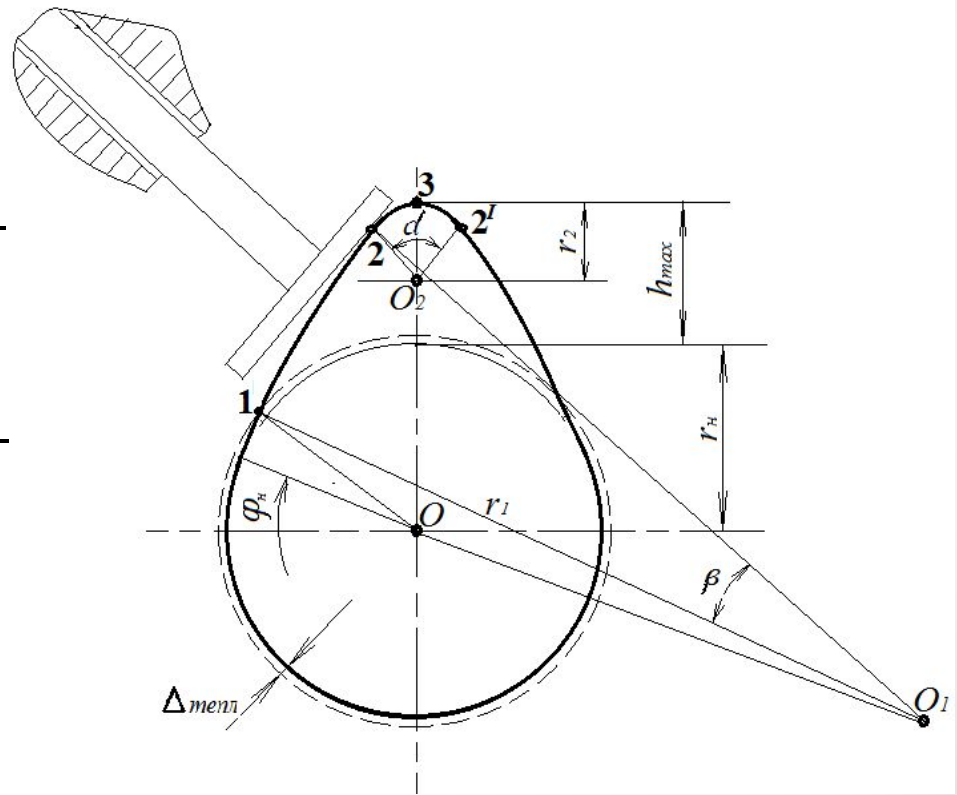
Исходя из этих положений, профиль кулачковой шайбы нужно задавать, из соображений ограничения максимальных динамических нагрузок, создавая благоприятные условия работы механизма, т.е. задаваясь ускорениями, действующими в механизме. Однако в таком случае радиусы кривизны профиля оказываются переменными, что обуславливает высокую технологическую сложность изготовления кулачка.

Поэтому идут по пути, задавая более простой способ формирования профиля из дуг окружности или касательных и дуг. Такой профиль, максимально приближенный к теоретическому, оказывается технологичным и дает вполне удовлетворительные результаты в эксплуатации.



Время-сечение выпускных клапанов

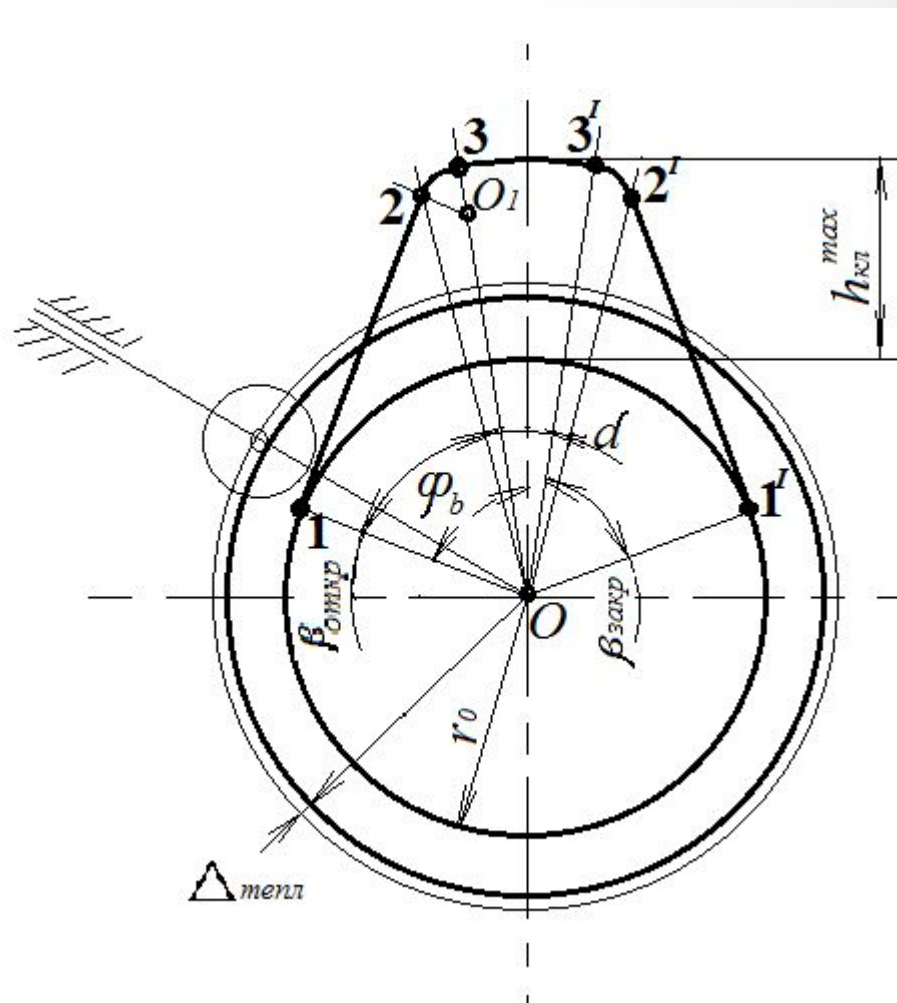
Таким образом, на практике получают широкое распространение выпуклые кулачки для плоских толкателей, которые обеспечивают наибольшее время-сечение при относительно умеренных динамических нагрузках и достаточно простую технологию изготовления.



Время-сечение выпускных клапанов

клапанов

Для конструкций с роликовыми толкателями распространение получили кулаки с тангенциальным профилем. Такие кулачковые шайбы просты в изготовлении и обеспечивают умеренные ускорения в начале подъема клапана.



Время-сечение выпускных

клапанов

Для кулачковой шайбы с тангенциальным профилем произведем построение диаграммы подъема клапана/время-сечения. Для этого разделим угол подъема клапана на четное число частей и зададим масштаб оси абсцисс

$$m = \frac{\varphi}{l}, \left[\frac{^\circ \text{ПКВ}}{\text{мм}} \right].$$

Также зададим масштаб ординат, как

$$K = \frac{f_{\text{кл}}}{h_{\text{ч}}}, \left[\frac{\text{м}^2}{\text{мм}} \right],$$

где

$$f_{\text{кл}} = \pi d_{\text{кл}} h_{\text{кл}} \cos \alpha_{\text{кл}}$$

Время-сечение выпускных клапанов

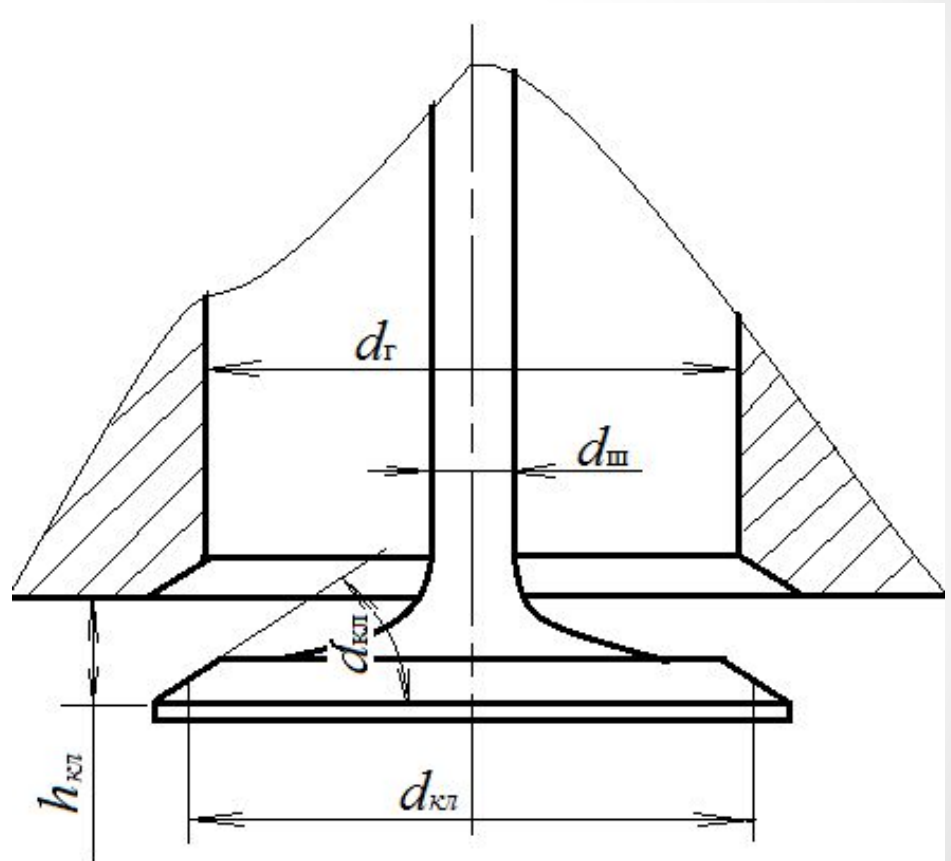
Максимальная высота подъема клапана

$$h_{\text{кл}}^{\text{max}} = \frac{f_{\text{кл}}^{\text{max}}}{\pi d_{\text{кл}} \cos \alpha_{\text{кл}}}$$

задается из соображений, когда

$$\begin{aligned} f_{\text{кл}}^{\text{max}} &= \pi d_{\text{кл}} h_{\text{кл}}^{\text{max}} \cos \alpha_{\text{кл}} = \\ &= \frac{\pi (d_{\Gamma}^2 - d_{\text{Ш}}^2)}{4} \end{aligned}$$

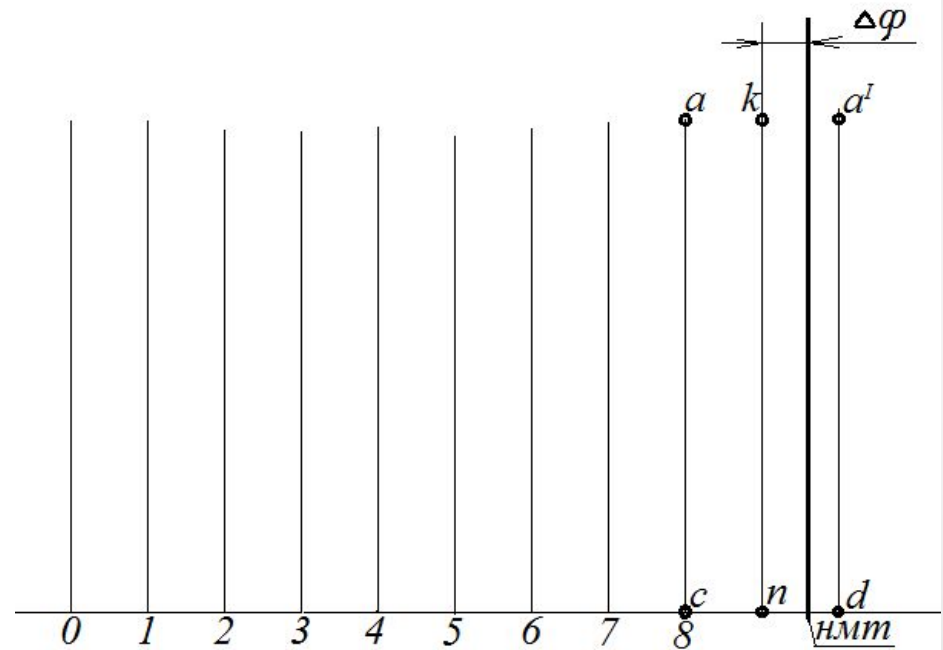
и дальнейшее увеличение подъема клапана оказывается не целесообразным, поскольку площадь сечения выпускного канала будет ограничивать время-сечение выпуска.



Время-сечение выпускных

клапанов

На оси абсцисс отметим положение НМТ и проведем ось симметрии кулачка nk , смещенную на угол асимметрии $\Delta\varphi$ от НМТ в сторону начала выпуска. $\Delta\varphi$ для импульсных систем наддува составляет $15 - 20^\circ$ пкв и $0 - 5^\circ$ пкв для изобарного наддува. Проведем вертикаль ca начала цилиндрической части профиля и разметим вышеупомянутые части профиля кулака.



Время-сечение выпускных

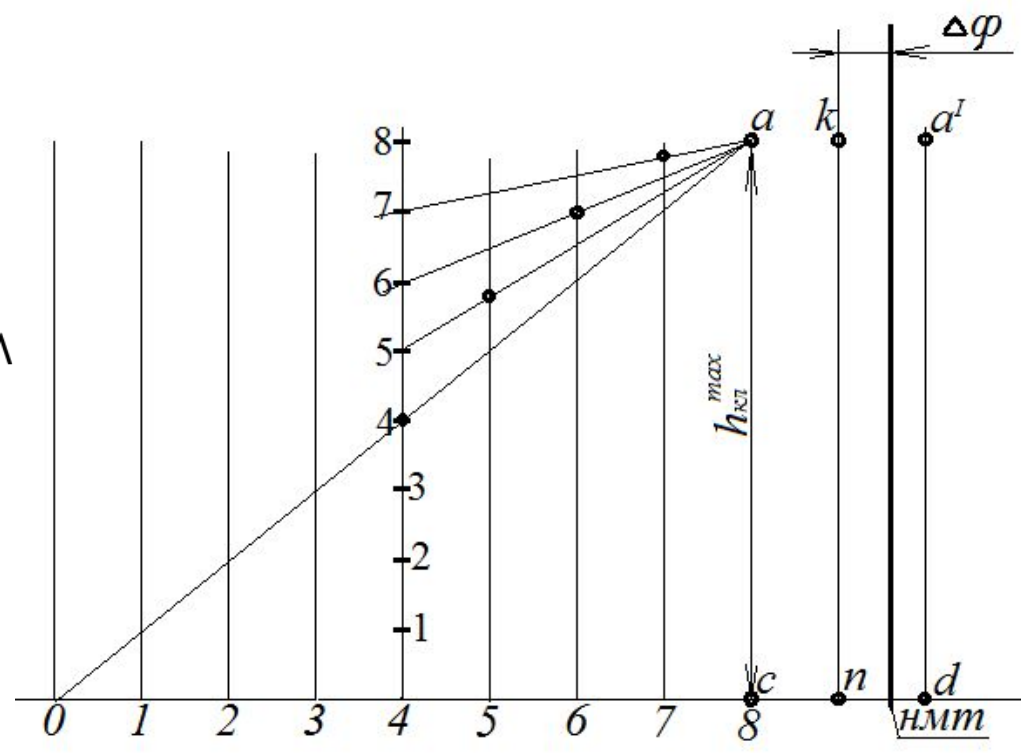
клапанов

На оси ординат отложим в масштабе максимальную высоту/площадь открытия клапана (отрезок ca) и разделим ее на число частей, равное числу отрезков разбиения угла открытия клапана на оси абсцисс. После этого перенесем разметку на вертикаль №4 (среднюю) и обозначим точки



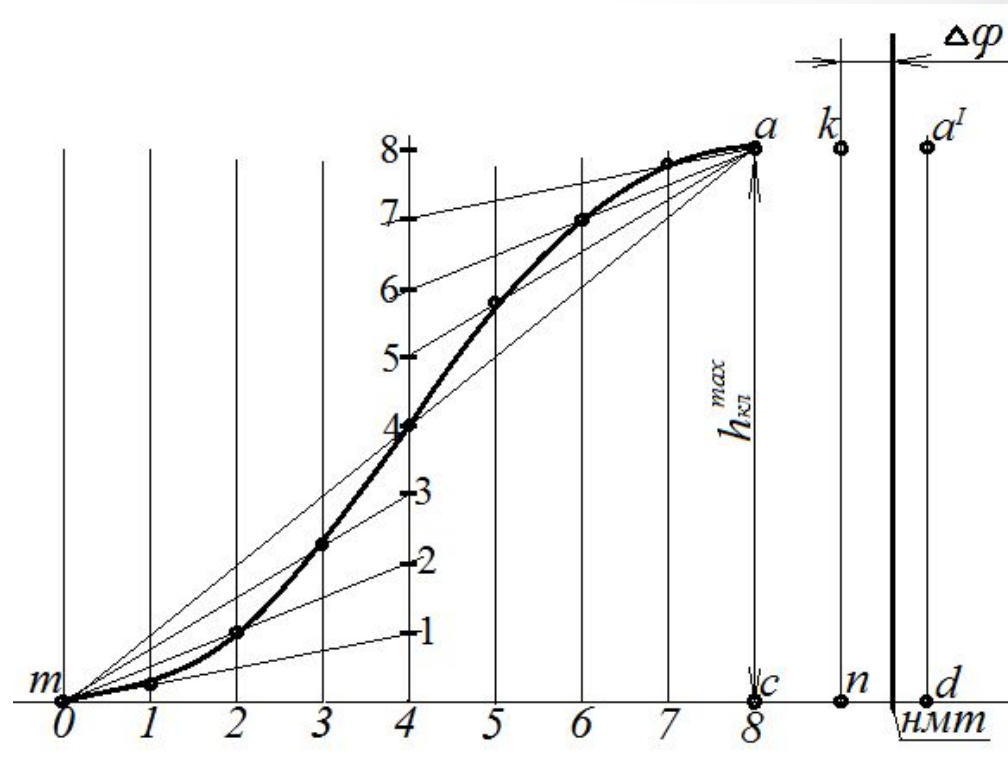
Время-сечение выпускных клапанов

Исходя из того, что профиль кулака образован прямой линией, перемещение клапана оказывается линейным относительно угла поворота. Следовательно проведем прямые из точки a к отметкам на оси вертикали №4 и найдем точки пересечения проведенных прямых с соответствующими вертикалями.



Время-сечение выпускных клапанов

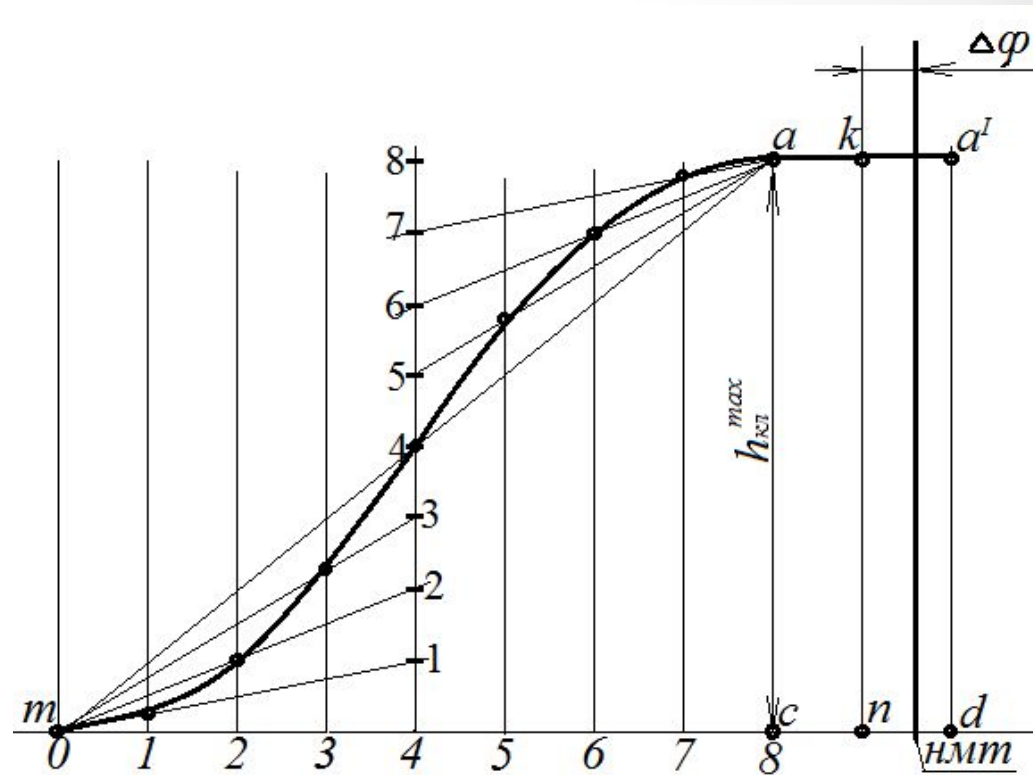
Проведем аналогичную процедуру с точкой m (0), в результате получим семейство точек, через которые проведем плавную кривую изменения высоты/площади открытия выпускного клапана. Таким образом получаем время-сечение клапана на линии открытия.



Время-сечение выпускных

клапанов

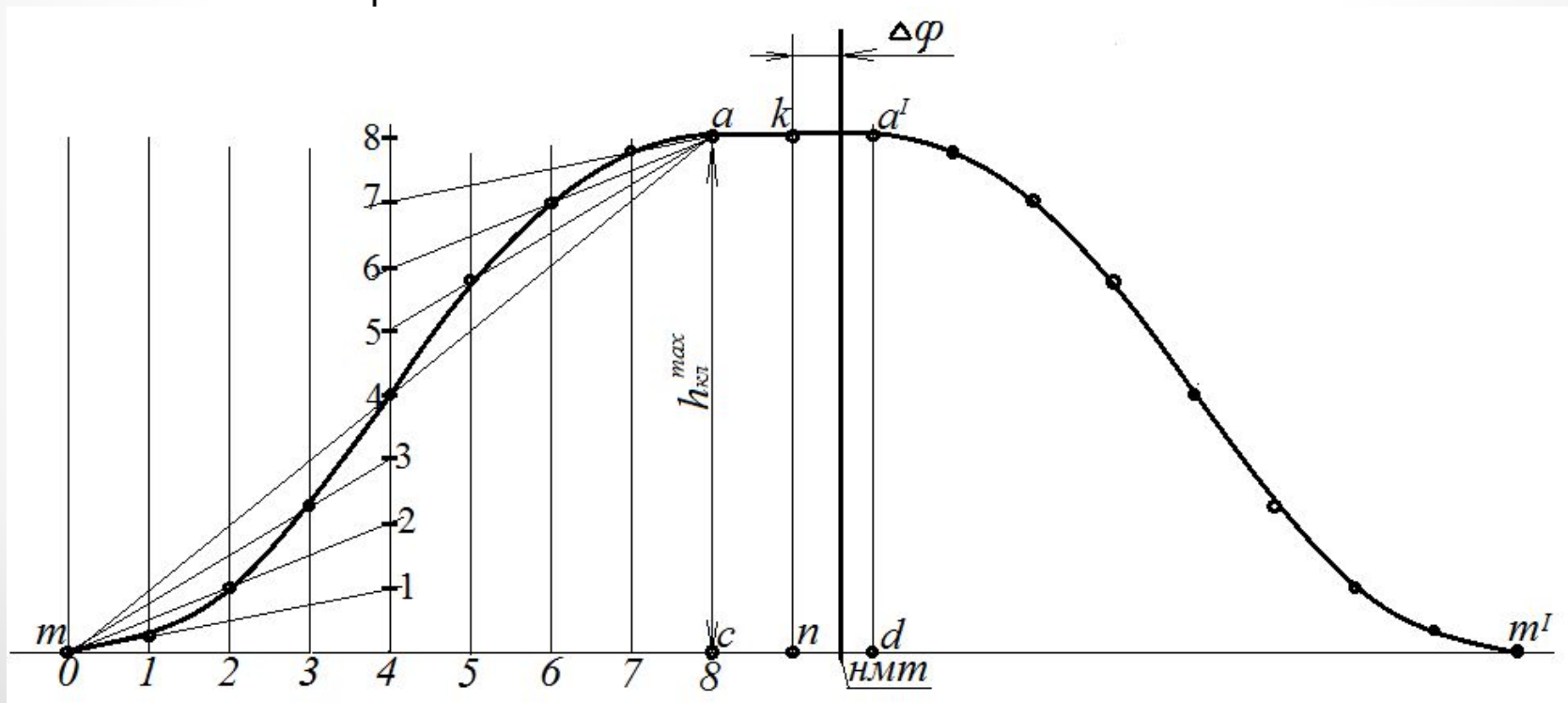
Достигнув максимальной высоты подъёма, ролик переходит на цилиндрическую часть профиля и клапан остается неподвижным. При этом время-сечение продолжает увеличиваться за счет прироста времени. Отметим это горизонтальной частью диаграммы, соединив точки aka' отрезком.



Время-сечение выпускных клапанов

клапанов

- В том случае, если профиль кулачка на закрытии клапана идентичен профилю подъема, участок закрытия клапана окажется зеркально-симметричным участку подъема относительно прямой nk .



Показатели качества газообмена

Показатели качества газообмена

В ходе протекания процессов газообмена в цилиндр двигателя поступает определенная масса воздуха, которая может быть определена как измеренный суммарный массовый расход воздуха через двигатель, отнесенный к количеству цилиндров:

$$G_s = \frac{G_{B\Sigma}}{i}.$$

В двигателе с газотурбинным наддувом эта величина может оказаться ощутимо больше той массы воздуха G_B , которая остается в цилиндре к моменту начала сжатия (особенно для двухтактных двигателей).

Показатели качества газообмена

Для относительной оценки эффективности использования воздуха для газообмена в двигателе вводят **коэффициент продувки**

$$\varphi_a = \frac{G_s}{G_B}$$

как отношение массы воздуха, прошедшего через цилиндр двигателя (впускные органы газораспределения) к массе воздуха, которая участвует в протекании процесса сжатия и др. процессов, которые происходят в последствии в закрытом цилиндре.

Показатели качества газообмена

Коэффициент продувки является важнейшим относительным параметром, оценивающим эффективность газообмена. Для различных двигателей он может составлять:

Тип двигателя	Коэффициент продувки
Двухтактный двигатель с механическим наддувом	1,15 – 1,25
Двухтактный двигатель с высоким газотурбинным наддувом	1,6 – 1,65
Четырехтактный двигатель	1 – 1,2

Показатели качества газообмена

Для абсолютной оценки эффективности газообмена используют **удельный расход воздуха**

$$g_s = \frac{G_s}{N_{eц}} = \frac{G_{в\Sigma}}{N_e}, \text{ кг/кВт} \cdot \text{ч}$$

как отношение массы воздуха, прошедшего через двигатель к мощности двигателя.

Тип двигателя	
Двухтактный МОД	8,6 -10,8
Четырехтактный СОД	6,8 – 8,2

Показатели качества газообмена

По завершении процесса газообмена в цилиндре неизбежно остается некоторая масса продуктов сгорания G_r , которая смешана со свежим воздухом, заполнившим цилиндр G_B .

Основным относительным показателем, оценивающим качество процессов газообмена является уже известный **коэффициент остаточных газов**

$$\gamma_r = \frac{G_r}{G_B}$$

Показатели качества газообмена

Коэффициент остаточных газов для различных видов двигателей:

Тип двигателей		Коэффициент остаточных газов
Четырехтактные	без наддува	0,06 – 0,04
	с наддувом	0,04 – 0,02
Двухтактные	С контурной продувкой MAN	0,08 – 0,09
	С контурной продувкой Зульцер	0,09 – 0,12
	С прямоточно-клапанной продувкой	0,04 – 0,08

Показатели качества газообмена

Примечание В современных двигателях в целях сокращения эмиссии оксидов азота широко распространены системы рециркуляции отработавших газов EGR, которые намеренно существенно увеличивают коэффициент остаточных газов.

Приведенные в таблице данные не отражают эту особенность конструкции современных двигателей.

Показатели качества газообмена

Еще одним известным относительным показателем газообмена является **коэффициент наполнения**

$$\eta_H = \frac{G_B}{\rho_s \cdot V_h},$$

представляющий отношение массы воздуха, оказавшейся в цилиндре к моменту окончания газообмена (начала сжатия) к массе воздуха способного заполнить рабочий объем цилиндра при параметрах воздуха на впуске (во впуск-ном ресивере или коллекторе) Чем выше η_H , тем эффективнее используется объем цилиндра, тем большее количество воздуха используется в процессе подвода тепла, тем большую максимальную мощность способен развивать двигатель.

Показатели качества газообмена

Дополнительно вводится параметр **суммарный коэффициент избытка воздуха**

$$\alpha_{\text{сум}} = \frac{G_S}{g_{\text{ц}}L_0}$$

как отношение массы воздуха, прошедшего через впускные органы газораспределения к теоретически необходимой массе воздуха L_0 , необходимой для сгорания цикловой подачи топлива $g_{\text{ц}}$. Именно этот параметр подлежит прямому измерению при испытаниях двигателя, а используемый ранее коэффициент α , применяемый в расчетах – является производной величиной на основе массы воздуха, находящегося в цилиндре $G_{\text{в}}$.

**Благодарю
за
внимание**