

## Процесс газообмена. Газообмен в четырехтактном дизеле.

*Процесс газообмена (наполнения). Физические основы. Критерии оценки газообмена (наполнения)*

**Общие сведения.** Для осуществления рабочего цикла необходимо после завершения процесса расширения удалить из цилиндра продукты сгорания и заполнить его к началу

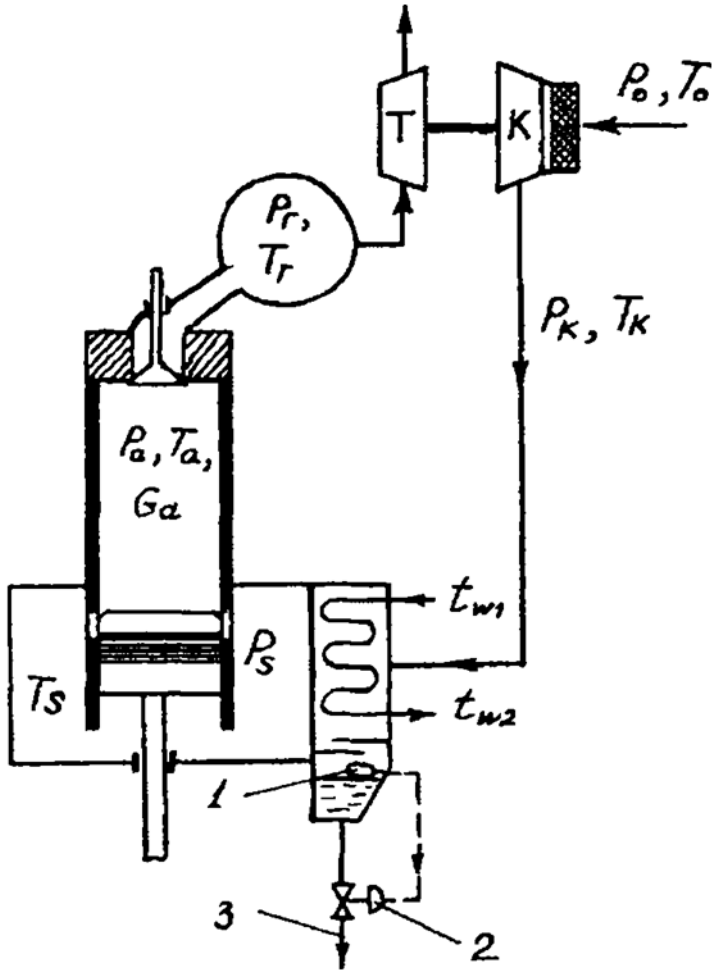


Рис. 1. Схема газозвушного тракта двигателя с наддувом.

сжатия зарядом свежего воздуха. Эти задачи решаются в *процессе газообмена*. Схема газоздушного тракта двигателя с наддувом и обозначения параметров воздуха и газов в отдельных его элементах показаны на рис. 1.

**Параметры воздуха и газов на выпуске и впуске.** Заданную степень форсирования рабочего процесса обуславливает *давление наддува*  $p_s$ , которое представляет собой давление воздуха в ресивере непосредственно перед впускными органами. Давление воздуха  $p_k$  создаваемое наддувочными агрегатами (см. рис. 1), должно быть выше давления  $p_s$  на значение сопротивления воздухоохладителя  $\Delta p = 0.002 - 0.004$  МПа. В свою очередь  $p_k = p_0 \pi_k$ , (где  $\pi_k$  — степень повышения давления в наддувочных агрегатах). В двигателе без наддува давление воздуха перед цилиндром определяется давлением окружающей среды.

*Среднее давление газов за цилиндром* (в выпускном патрубке)  $p_T$  или  $p_T$  в двигателях с наддувом находится в прямой зависимости от давления воздуха перед цилиндром (в ресивере)  $p_s$  и сопротивления продувочно-выпускного тракта цилиндра, в основном определяемого сопротивлением продувочно-выпускных окон или клапанов

$$p_T = \xi_n p_s \quad (10.5)$$

где  $\xi_n$  — коэффициент потери давления (для двухтактных дизелей  $\xi_n = 0,88 \div 0,96$ ).

В отличие от двухтактных двигателей, в которых давление  $p_s$  всегда больше  $p_T$ , четырехтактные могут работать с разными соотношениями давлений. В большинстве случаев  $p_s > p_T$ , но в целях повышения мощности турбины не исключена возможность работы при  $p_T > p_s$ .

В двигателях с выпуском в атмосферу давление  $p_T$  зависит от сопротивлений выпускного трубопровода утилизационного котла и глушителя шума на выпуске и лежит в пределах абсолютного давления  $p_T = 0,103 \div 0,105$  МПа. Такое же

давление характеризует условия в выпускном трубопроводе за турбиной в двигателе с газотурбонагнетателем (ГТН).

### *Температура наддувочного воздуха*

$$T_k = T_0 \pi_k^{(n_k-1)/n_k} \quad (10.6)$$

где  $T_0$  — температура окружающего воздуха, °С;  
 $\pi_k = p_k/p_0$  — степень повышения давления в наддувочных агрегатах;

$n_k$  — показатель политропы сжатия воздуха в нагнетателе (для центробежных нагнетателей  $n_k = 1.6 \div 1.8$  для поршневых насосов  $n_k = 1.45 \div 1.6$ )

В современных дизелях  $T_k$  достигает 140°С.

*Температура воздуха перед цилиндром (в ресивере)  $T_s$*  (после сжатия в наддувочных агрегатах воздух обычно направляется в воздухоохладитель и лишь, затем поступает в ресивер)

$$T_{s \min} = T_{\text{вз}} + (10 \div 15) \quad (10.7)$$

где  $T_{\text{вз}}$  — температура забортной воды на входе в воздухоохладитель, °С.

В двигателях без наддува температура воздуха перед цилиндрами определяется температурой охлаждающей среды  $T_0$ .

**Газообмен в четырехтактном дизеле.** На газообмен в четырехтактном цикле отводятся два хода поршня. В действительности для более полной очистки цилиндра от продуктов сгорания и лучшего наполнения свежим воздухом впускные и выпускные клапаны, как это видно из диаграммы газораспределения (рис. 2), приходится открывать раньше, а закрывать позже. В итоге продолжительность газообмена занимает более двух ходов поршня и состоит из следующих периодов: свободного выпуска  $bb'$  выпуска  $b'r$  продувки  $r''rr'$  наполнения  $ra'$  и дозарядки  $a'a$ .

Для более подробного ознакомления с процессами газообмена рассмотрим рис. 3, на котором приведены кривые

изменения давлений в цилиндре  $p_{ц}$ , в выпускном патрубке  $p_T$  и в ресивере  $p_S$  в функции угла поворота коленвала. Здесь же нанесены моменты открытия и закрытия клапанов.

*Свободный выпуск* начинается в момент открытия

Рис. 2. Фазы газообмена четырёхтактного двигателя

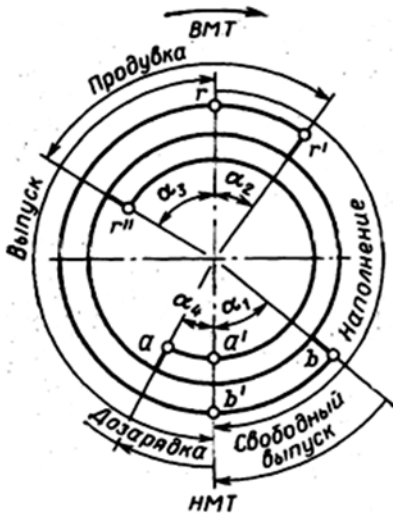
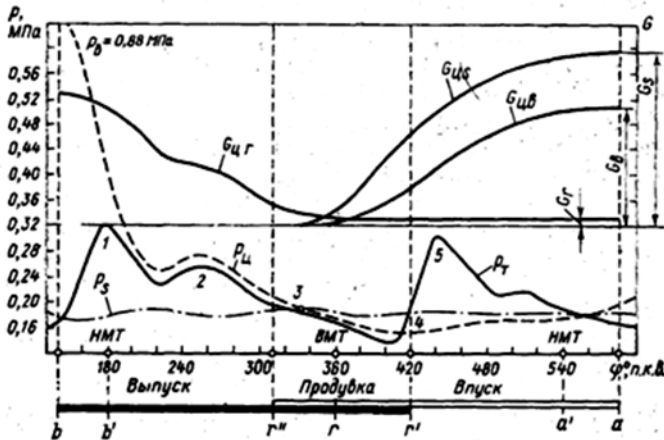


Рис. 3. Изменение давлений в процессе газообмена в четырёхтактном среднеоборотном двигателе



выпускного клапана, осуществляемого за 20—50° п. к. в. до прихода поршня в НМТ, поэтому расширение газов в цилиндре заканчивается ранее — в точке  $b$ . Давление в цилиндре в этот

момент равно 0,88 МПа, а давление в выпускном патрубке — 0,16 МПа. Столь значительная разница способствует тому, что, несмотря на продолжающееся движение поршня вниз, газы с большой скоростью устремляются из цилиндра в выпускной патрубок. Из-за малого объема патрубка и выпускного тракта, по которому газ направляется к газовой турбине, давление в нем резко поднимается и возникает импульс давления (на рисунке отмечен цифрой 1). Продолжительность свободного выпуска  $bb'$  приблизительно соответствует углу предварения открытия выпускного клапана  $\alpha_1$  (см. рис. 10.5).

Выпуск условно начинается в НМТ и продолжается в течение всего хода поршня к ВМТ. В начальной фазе восходящего движения поршня эффект выталкивания невелик, так как около мертвой точки мала скорость поршня, и истечение из цилиндра происходит в основном вследствие перепада давлений ( $p_{ц} — p_{т}$ ). В дальнейшем скорость поршня увеличивается, в средней части достигает максимума, растет и масса выталкиваемого газа. Это приводит к вторичному повышению давления (цифра 2, см. рис. 10.6) в выпускном патрубке, на которое существенно влияет также первый импульс давления.

В силу увеличивающегося сопротивления истечению газа из цилиндра падение давления в нем в это время замедляется. Изменение массы заключенного в цилиндре газа характеризуется кривой  $G_{цг}$ .

*Продувка* начинается с открытием впускного клапана (ориентировочно за 30—50° п. к. в. до прихода поршня в ВМТ) —  $r''$  и заканчивается в момент закрытия выпускного клапана (40-70° п.к.в. за ВМТ) —  $r'$ . К моменту полного открытия выпускного клапана давление  $p_{ц}$  оказывается равным, а затем и ниже давления воздуха в ресивере  $p_s$  — точка 3, благодаря чему он получает возможность поступать в цилиндр, несмотря на продолжающееся движение поршня вверх. Давление в выпускном патрубке  $p_{т}$  еще ниже ( $p_{т} < p_{ц} < p_s$ ); оставшиеся в камере сжатия газы вытесняются воздухом и уходят вместе с

ним в выпускной тракт. Падение давления в цилиндре и выпускном патрубке продолжается на протяжении всего периода продувки, и разность давлений  $p_s - p_u$  наибольшего значения (4) достигает в то время, когда поршень, двигаясь вниз, приобретает максимальную скорость. Это способствует еще большему поступлению воздуха в камеру сжатия и ее продувке.

Благодаря продувке обеспечивается возможность заполнения воздухом не только объема цилиндра, описываемого ходом поршня, но и объема камеры сжатия. Наличие периода продувки способствует также снижению температур стенок камеры, выпускного клапана и его седла, температуры выпускных газов, а это положительно сказывается на ресурсе газовой турбины.

Поэтому в двигателях с высоким наддувом, где проблема теплонапряженности особенно остра, идут на увеличение фазы перекрытия клапанов: в отдельных двигателях она достигает  $150^\circ$  п. к. в.

*Наполнение* цилиндра свежим зарядом воздуха фактически начинается вблизи ВМТ и вначале, до закрытия выпускного клапана —  $r'$ , протекает одновременно с продувкой. Окончание наполнения совпадает с приходом поршня в НМТ.

После закрытия выпускного клапана значение и характер изменения давления в выпускном тракте несущественны. Не оказывает влияния и то обстоятельство, что к патрубку в этот момент подходит волна давления (5), возникшая благодаря начавшемуся свободному выпуску и появлению импульса давления в цилиндре, объединенном с рассматриваемым общим выпускным трактом.

К окончанию наполнения давление в цилиндре  $p_u$  поднимается и достигает значения  $p_s$ .

*Дозарядка* продолжается от НМТ, и, хотя поршень пошел вверх, воздух продолжает поступать через открытый клапан в цилиндр вследствие отсасывающего действия столба

движущегося по инерции по впускному тракту воздуха, а также вследствие существования положительной разности  $p_s - p_c$ . В последней фазе дозарядки из-за движения поршня вверх давление в цилиндре  $p_c$  начинает расти, несмотря на все еще открытый впускной клапан. Здесь сказывается дросселирование воздуха в уменьшающейся щели под клапаном (поскольку он начал закрываться). С закрытием впускного клапана ( $a$ ) дозарядка и газообмен завершаются. Общая продолжительность газообмена четырехтактного двигателя составляет  $400—500^\circ$  п. к. в.

### **Литература**

Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 2. 2010 г.и. Стр. 20-30

Возницкий И. В. Судовые двигатели внутреннего сгорания. Том 2. 2008 г.и. Стр. 27-38

Возницкий И. В. Судовые дизели и их эксплуатация - 1990 г.и. Стр. 200-204