

8. Информационное сообщение. Системы охлаждения агрегатов современных тракторов. Дифференцированное обеспечение руководства научно-технической информацией «ДОР НТИ» / Реф. В.М. Володин // Profi technik. – 2005. – № 9. – С. 76-79.
9. Петров, А.П. Зависимость с/х автомобиля от потока воздуха через систему охлаждения ДВС / А.П. Петров, К.А. Петров // Автомобильная промышленность. – 2008. – № 3. – С. 19-22.
10. Исаченко, В.П. Теплопередача: учеб. для вузов / В.П. Исаченко, В.А. Осипова, А.С. Сукомел. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1975. – 488 с.
11. Теплотехника / А.М. Архаров [и др.]; под общ. ред. В.И. Крутова. – М.: Машиностроение, 1986. – 432 с.

УДК 621.431.7

**А.И. Якубович, В.Е. Тарасенко**

*(УО «БГАТУ»*

*г. Минск, Республика Беларусь);*

**А.А. Жешко**

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси*

*по механизации сельского хозяйства»,*

*г. Минск, Республика Беларусь)*

## **СКОРОСТЬ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ГАЗОВ В ЦИЛИНДРЕ ДВИГАТЕЛЯ**

### **Введение**

В цилиндре двигателя с некоторой периодичностью осуществляются термодинамические циклы, которые сопровождаются непрерывным изменением термодинамических параметров рабочего тела – давления, объема, температуры. Энергия сгорания топлива при изменении объема превращается в механическую работу. Условием превращения теплоты в механическую работу является последовательность тактов. К этим тактам в двигателе внутреннего сгорания относятся впуск (наполнение) цилиндров горючей смесью или воздухом, сжатие, сгорание, расширение и выпуск. Изменяющимся объемом является объем цилиндра, который увеличивается (уменьшается) при поступательном движении поршня. Увеличение объема происходит вследствие расширения продуктов при сгорании горючей смеси, уменьшение – при сжатии нового заряда горючей смеси или воздуха. Силы давления газов на поршень при такте расширения превращаются в механическую работу.

Аккумулированная в топливе энергия превращается в тепловую энергию при совершении термодинамических циклов, передается стенкам цилиндров путем теплового и светового излучения, радиацией, от стенок цилиндров – охлаждающей жидкости и массе двигателя путем теплопроводности и в окружающее пространство от поверхностей двигателя свободной и вынужденной конвекцией. В двигателе присутствуют все виды передачи теплоты, что показывает сложность происходящих процессов.

Использование теплоты в двигателе характеризуется КПД: чем меньше теплоты сгорания топлива отдается в систему охлаждения и в массу двигателя, тем больше совершается работы и выше КПД.

Рабочий цикл двигателя осуществляется за два или четыре такта. Основными процессами каждого рабочего цикла являются такты впуска, сжатия, рабочий ход и выпуск. Введение в рабочий процесс двигателей такта сжатия позволило максимально уменьшить охлаждающую поверхность при одновременном повышении давления сгорания топлива. Продукты горения расширяются соответственно сжатию горючей смеси. Такой процесс позволил сократить тепловые потери от стенок цилиндров и с выпускными газами, увеличить давление газов на поршень, что значительно повысило мощностные и экономические показатели двигателя.

### Тепловые процессы в двигателе

Реальные тепловые процессы в двигателе существенно отличаются от теоретических, основанных на законах термодинамики. Теоретический термодинамический цикл является замкнутым, обязательное условие его осуществления – передача теплоты холодному телу. В соответствии со вторым законом термодинамики и в теоретической тепловой машине полностью превратить тепловую энергию в механическую невозможно [1, с. 47].

Двигатель внутреннего сгорания является тепловой машиной циклического действия. Рабочий цикл и его такты повторяются через строго определенный промежуток времени, то есть с определенной периодичностью. Время совершения одного рабочего цикла обусловлено частотой вращения коленчатого вала и для 4-тактного двигателя равно:

$$\tau_{ц} = \frac{120}{n_e}, \text{ с}, \quad (1)$$

где  $n_e$  – частота вращения коленчатого вала двигателя.

Частота вращения 4-тактных тракторных дизелей находится в пределах 1500–2400 об/мин, автомобильных дизелей – 2400–5600 об/мин. При указанных частотах вращения время совершения цикла рабочего процесса у тракторных дизелей находится в пределах  $8 \cdot 10^{-2}$ – $5 \cdot 10^{-2}$  с, автомобильных –  $5 \cdot 10^{-2}$ – $2 \cdot 10^{-2}$  с и бензиновых двигателей –  $5 \cdot 10^{-2}$ – $2 \cdot 10^{-2}$  с.

Продолжительность одного отдельно взятого такта определяется углом поворота коленчатого вала. Время совершения тактов неодинаково. Наибольшее время отводится тактам впуска и выпуска, наименьшее – сжатию и расширению вместе со временем сгорания горючей смеси. Соответственно, разный промежуток времени сохраняют свое значение термодинамические параметры – температура и давление.

Продолжительность тактов определяется диаграммой фаз газораспределения, для 4-тактных двигателей равна:

$$\tau_T = 0,17 \frac{\varphi_T}{n_e}, \text{ с}, \quad (2)$$

где  $\varphi_T$  – угол поворота коленчатого вала при совершении такта, в градусах.

Среднее статистическое значение угла поворота коленчатого вала дизеля при впуске равно  $245^\circ$ , сжатия –  $134^\circ$ , расширения –  $122^\circ$  и выпуска –  $258^\circ$ . При частоте вращения коленчатого вала  $2400 \text{ об/мин}$  продолжительность такта впуска составляет  $1,67 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ , сжатия –  $9,31 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ , расширения –  $8,47 \cdot 10^{-3} \text{ с}$  и выпуска –  $1,36 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ .

В эти бесконечно малые промежутки времени изменяется и температура в цилиндрах двигателя. Скорость изменения температуры при совершении тактов определяется перепадом температур рассматриваемого  $T_2$  и предыдущего  $T_1$  тактов ко времени совершения такта:

$$\omega = \frac{T_2 - T_1}{\tau_T}, \text{ град/с.} \quad (3)$$

*Такт впуска.* При такте впуска поршень перемещается от верхней к нижней мертвой точке, вследствие увеличения объема цилиндра и снижения в нем давления цилиндр заполняется рабочей смесью у бензиновых двигателей или свежим зарядом воздуха у дизелей. Сложность тепловых процессов, происходящих в цилиндре при впуске, состоит в том, что в цилиндре сохраняются остаточные газы от предыдущего такта и достаточно высокая температура внутренних поверхностей цилиндра, головки и поршня. Свежий заряд рабочего тела смешивается с остаточными газами, а также подогревается вследствие контакта с горячими поверхностями во впускном тракте и в цилиндре. Температура в конце такта впуска зависит от количества остаточных газов, оставшихся в цилиндре. Ориентировочно принимается, что 1% в рабочем заряде остаточных газов нагревает заряд на  $8^\circ$  [6, с. 35]. В дизелях, цилиндры которых заполняются свежим зарядом воздуха и имеют высокие степени сжатия, температура горючей смеси в конце такта впуска составляет  $310\text{--}350 \text{ К}$ , что объясняется относительно небольшим количеством остаточных газов, в бензиновых двигателях температура впуска в конце такта составляет  $340\text{--}400 \text{ К}$  [2, с. 104]. Тепловой баланс горючей смеси при такте впуска можно представить в виде

$$Q_{ГС} = Q_{РТ} + Q_{СЦ} + Q_{ОГ}, \quad (4)$$

где  $Q_{РТ}$  – количество теплоты свежего заряда рабочего тела в начале такта впуска;

$Q_{СЦ}$  – количество теплоты, поступившее в рабочее тело при контакте с нагретыми поверхностями впускного тракта и цилиндра;

$Q_{ОГ}$  – количество теплоты в остаточных газах.

Из уравнения теплового баланса можно определить температуру в конце такта впуска  $T_a$ . Примем массовое значение количества свежего заряда –  $m_{СЗ}$ , остаточных газов –  $m_{ОГ}$ . При известной теплоемкости свежего заряда  $c_P$ , остаточных газов  $c'_P$  и рабочей смеси  $c''_P$  уравнение (4) представляется [2, с. 104; 5, с. 75] в виде

$$c_P m_{СЗ} (T_{СЗ} + \Delta T_{СЗ}) + c'_P m_{ОГ} T_r = c''_P (m_{СЗ} + m_{ОГ}) T_a, \quad (5)$$

где  $T_{C3}$  – температура свежего заряда перед впуском;

$\Delta T_{C3}$  – подогрев свежего заряда при впуске его в цилиндр;

$T_r$  – температура остаточных газов в конце выпуска. Можно с достаточной точностью считать, что  $c'_p = c''_p$  и  $c'_p = \zeta c_p$ , где  $\zeta$  – поправочный коэффициент, зависящий от  $T_{C3}$  и состава смеси. При коэффициенте избытка воздуха  $\alpha = 1,8$  и для дизельного топлива  $\zeta = 1,1$ . С понижением температуры остаточных газов  $\zeta = 1,0$ .

При решении уравнения (5) относительно  $T_a$  обозначим отношение

$$\frac{m_{OG}}{m_{C3}} = \gamma_{OCT}.$$

Формула для определения температуры в цилиндре при впуске имеет вид

$$T_a = \frac{T_{C3} + \Delta T_{C3} + \zeta \gamma_{OCT} T_r}{1 + \gamma_{OCT}}. \quad (6)$$

Эта формула справедлива как для четырехтактных, так и для двухтактных двигателей, для двигателей с турбонаддувом температура в конце впуска рассчитывается по формуле (6) при условии, что  $\zeta = 1$ . Принятое условие не вносит больших погрешностей в расчет. По данным В.Н. Луканина [3, с. 85], значения параметров в конце такта впуска, определенные экспериментально на номинальном режиме, представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры конца такта впуска

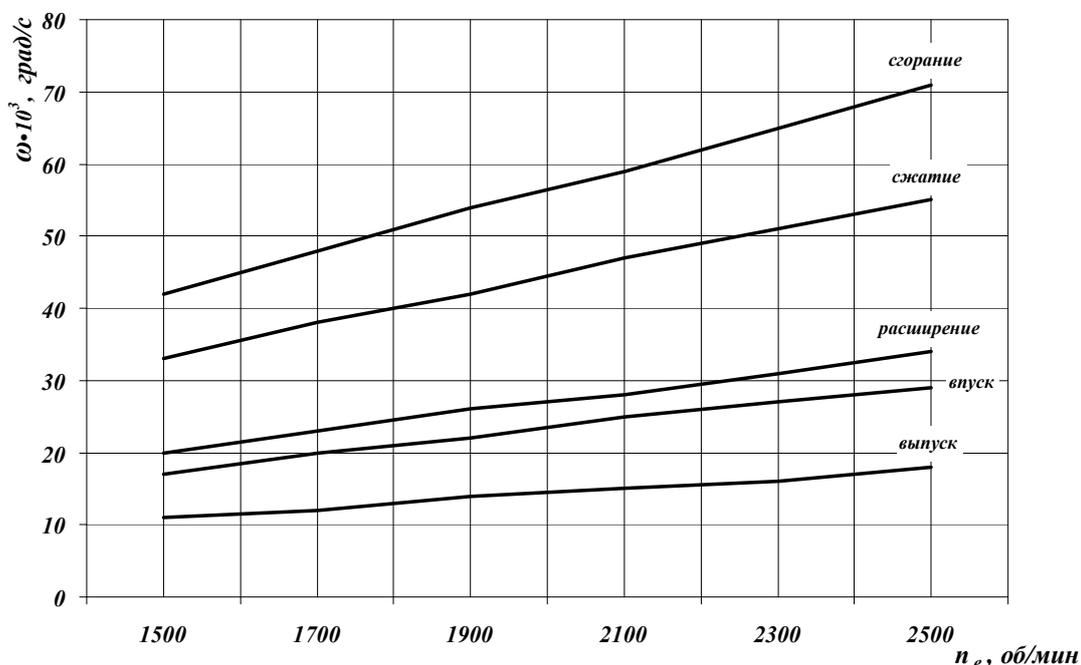
Показатели	Четырехтактные ДВС		Двухтактные ДВС с прямоточной схемой газообмена
	с искровым зажиганием	дизели	
Коэффициент остаточных газов, $\gamma_{OCT}$	0,06–0,08	0,03–0,06	0,04–0,10
Температура в конце выпуска, $T_r$ , К	900–1000	600–900	600–900
Подогрев свежего заряда, К	0–25	20–40	5–10
Температура в конце впуска, $T_a$ , К	320–380	310–350	320–400

При такте впуска впускной клапан в дизеле открывается за 20–30° до прихода поршня в верхнюю мертвую точку (ВМТ) и закрывается после прохождения нижней мертвой точки (НМТ) на 40–60°. Продолжительность открытия впускного клапана составляет 240–290°. Температура в цилиндре в конце предыдущего такта (выпуска) равна  $T_r = 600–900$  К. Заряд воздуха, имеющий температуру значительно ниже, смешивается с оставшимися в цилиндре остаточными газами, что снижает температуру в цилиндре в конце впуска до  $T_a = 310–350$  К. Перепад температур в цилиндре между тактами выпуска и впуска равен  $\Delta T_{a-r} = T_a - T_r$ . Поскольку температура  $T_a < T_r$ , теплота остаточных отработавших газов и теплота от стенок цилиндров нагревают заряд воздуха и уменьшают температуру в цилиндре на  $\Delta T_{a-r} = 290–550^\circ\text{C}$ .

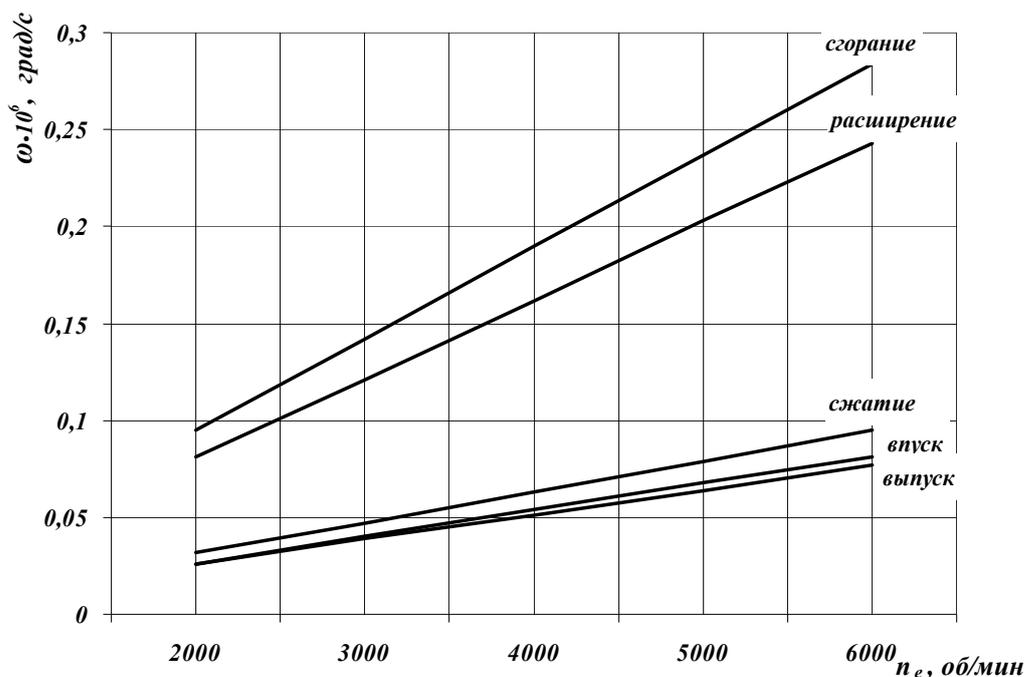
Скорость изменения температуры в цилиндре в единицу времени за такт равна:

$$\omega_a = \frac{T_a - T_r}{\tau_a} = \frac{(T_a - T_r)n_e}{0,17\varphi_a}. \quad (7)$$

Для дизеля скорость изменения температуры при такте впуска при  $n_e=2400$  об/мин и  $\varphi_a = 260^\circ$  составляет  $\omega_a = 2,9 \cdot 10^4 - 3,9 \cdot 10^4$  град/с. Таким образом, температура в конце такта впуска в цилиндре определяется массой и температурой остаточных газов после такта выпуска и нагревом свежего заряда от деталей двигателя. Зависимости скорости изменения температуры такта впуска от частоты вращения коленчатого вала для дизелей и бензиновых двигателей, представленные на рисунках 8 и 9, указывают на значительно большую интенсивность теплового потока от рабочего тела в цилиндре бензинового двигателя в сравнении с дизелем и ее рост с увеличением частоты вращения коленчатого вала. Среднестатистическое расчетное значение скорости изменения температуры при такте впуска дизеля в пределах частоты вращения коленчатого вала 1500–2500 об/мин равно  $\omega_a = 2,3 \cdot 10^4 \pm 0,18$  град/с, а у бензинового двигателя в пределах частоты вращения 2000–6000 об/мин –  $\omega_a = 4,38 \cdot 10^4 \pm 0,16$  град/с. При такте впуска температура рабочего тела примерно равна рабочей температуре охлаждающей жидкости, теплота стенок цилиндра расходуется на нагрев рабочего тела и не оказывает существенного влияния на температуру охлаждающей жидкости системы охлаждения.



**Рисунок 8 – Скорость изменения температуры тактов в зависимости от частоты вращения коленчатого вала дизеля**



**Рисунок 9 – Скорость изменения температуры тактов в зависимости от частоты вращения коленчатого вала бензинового двигателя**

*Такт сжатия.* При такте сжатия происходят достаточно сложные процессы теплообмена внутри цилиндра. В начале такта сжатия температура заряда горючей смеси меньше температуры поверхностей стенок цилиндра и заряд нагревается, продолжая отнимать теплоту от стенок цилиндра. Механическая работа сжатия сопровождается отнятием теплоты из внешней среды. В некоторый бесконечно малый промежуток времени температура поверхности цилиндра и заряда смеси выравниваются, вследствие чего теплообмен между ними прекращается. При дальнейшем сжатии температура заряда горючей смеси превышает температуру поверхностей стенок цилиндра и тепловой поток изменяет направление, то есть теплота поступает к стенкам цилиндра. Общая отдача теплоты от заряда горючей смеси незначительна, она составляет около 1,0–1,5% от количества теплоты, поступающей с топливом.

Температура заряда горючей смеси в конце впуска и в конце сжатия связаны между собой уравнением политропы сжатия в виде [2, с. 108; 5, с. 90]

$$T_C = T_a \varepsilon^{n_1 - 1}, \quad (8)$$

где  $\varepsilon$  – степень сжатия;

$n_1$  – показатель политропы.

Принято температуру в конце такта сжатия рассчитывать по среднему постоянному для всего процесса значению показателя политропы  $n_1$ . В частном случае показатель политропы рассчитывается по балансу теплоты в процессе сжатия [5, с. 89; 7, с. 106]. На основании первого закона термодинамики

$$Q_C = U_C - U_a + L_{ac}, \quad (9)$$

где  $U_C$  и  $U_a$  – внутренняя энергия заряда горючей смеси при сжатии между точками  $c$  (конец сжатия) и  $a$  (начало сжатия) по индикаторной диаграмме цикла;

$$L_{ac} = \frac{p_a V_a - p_c V_C}{n_1 - 1} - \text{теплота, эквивалентная работе политропного сжатия}$$

горючей смеси между точками  $c$  и  $a$  цикла;

$$Q_C = \mathcal{G}H_U - \text{количество теплоты, получаемой горючей смесью от стенок цилиндра между точками } c \text{ и } a \text{ цикла вследствие внешнего теплообмена};$$

$H_U$  – низшая теплота сгорания топлива,  $\text{кДж/кг}$ ;

$\mathcal{G}$  – количество теплоты, характеризующее теплообмен в период сжатия, выраженное в долях теплотворной способности топлива  $H_U$ .

Для количества горючей смеси, состоящей из свежего заряда  $m_1$  ( $\text{кг}\cdot\text{моль}$ ) и  $m_T$  ( $\text{кг}\cdot\text{моль}$ ) остаточных газов, уравнение (9) представляется [5, с. 89] в виде

$$\mathcal{G}H_U = m_{C3}U_C + m_{OG}U_C'' - m_{C3}U_a - m_{OG}U_a'' + \frac{p_a V_a - p_c V_C}{n_1 - 1}, \quad (10)$$

где  $U_C$  и  $U_C''$  – внутренняя энергия свежего заряда;

$U_a$  и  $U_a''$  – внутренняя энергия остаточных газов.

Совместное решение уравнений (8) и (10) при известном значении температуры  $T_a$  позволяет определить показатель политропы  $n_1$ . На показатель политропы влияет интенсивность охлаждения цилиндра. При низких температурах охлаждающей жидкости температура поверхности цилиндра ниже, соответственно, и  $n_1$  будет меньше.

Значения параметров конца такта сжатия по данным [3, с. 93] приведены в таблице 4.

Таблица 4 – Параметры конца такта сжатия

Параметры	Дизели		Двигатели с искровым зажиганием
	4-тактные без наддува	4-тактные с наддувом	
Степень сжатия, $\varepsilon$	15–23	12–15	6,5–12
Средний показатель политропы сжатия, $n_1$	1,35–1,38	1,33–1,37	1,35–1,38
Температура в конце такта сжатия, $T_C$ , К	700–900	>1000	600–900

При такте сжатия впускной и выпускной клапаны закрыты, поршень перемещается к ВМТ. Время совершения такта сжатия у дизелей при частоте вращения 1500–2400  $\text{об/мин}$  составляет  $1,49 \cdot 10^{-2}$ – $9,31 \cdot 10^{-3}$  с, что соответствует повороту коленчатого вала на угол  $\varphi_C = 134^\circ$ , у бензиновых двигателей при частоте вращения 2400–5600  $\text{об/мин}$  и  $\varphi_C = 116^\circ$  оно равно  $8,06 \cdot 10^{-4}$ – $3,45 \cdot 10^{-4}$  с. Перепад температур рабочего тела в цилиндре между тактами сжатия и впуска

$\Delta T_{c-a} = T_c - T_a$  у дизелей находится в пределах 390–550°C, у бензиновых двигателей – 280–370°C.

Скорость изменения температуры в цилиндре за такт сжатия равна:

$$\omega_c = \frac{T_c - T_a}{\tau_c} = \frac{(T_c - T_a)n_e}{0,17\varphi_c}. \quad (11)$$

Для дизелей при частоте вращения 1500–2500 *об/мин* значение скорости изменения температуры составляет  $3,3 \cdot 10^4$ – $5,5 \cdot 10^4$  *град/с*, бензиновых двигателей при частоте вращения 2000–6000 *об/мин* –  $3,2 \cdot 10^4$ – $9,5 \cdot 10^4$  *град/с*. Тепловой поток при такте сжатия направлен от рабочего тела в цилиндре к стенкам и в охлаждающую жидкость. Из графиков функции  $\omega_c = f(n_e)$  для дизелей и бензиновых двигателей, представленных на рисунках 8 и 9, следует, что скорость изменения температуры рабочего тела у дизелей по сравнению с бензиновыми двигателями при одинаковой частоте вращения выше.

Процессы теплообмена при такте сжатия определяются перепадом температур между поверхностью цилиндра и зарядом горючей смеси, относительно небольшой поверхностью цилиндра в конце такта, массой горючей смеси и ограниченно коротким промежутком времени, при котором происходит теплопередача от горючей смеси к поверхности цилиндра. Следует полагать, что такт сжатия не оказывает существенного влияния на температурный режим системы охлаждения.

*Такт расширения.* Процесс расширения является единственным тактом рабочего цикла двигателя, при котором совершается полезная механическая работа. Этому такту предшествует процесс сгорания горючей смеси. Результатом сгорания является повышение внутренней энергии рабочего тела, преобразуемой в работу расширения.

Процесс сгорания является комплексом физических и химических явлений окисления топлива с интенсивным выделением теплоты. Для жидкого углеводородного топлива (бензина, дизельного топлива) процесс сгорания осуществляется в виде химических реакций соединения углерода и водорода с кислородом воздуха. Теплота сгорания заряда горючей смеси расходуется на нагревание рабочего тела, совершение механической работы. Часть теплоты от рабочего тела через стенки цилиндров и головку нагревает блок-картер и другие детали двигателя, а также охлаждающую жидкость. Для дизелей и бензиновых двигателей процесс сгорания различен и имеет свои особенности. У дизелей сгорание происходит с разной интенсивностью в зависимости от хода поршня: вначале интенсивно, а затем замедленно. У бензиновых двигателей сгорание происходит мгновенно, принято считать, что оно совершается при постоянном объеме.

Для учета теплоты по составляющим потерь, в том числе теплоотдачи в стенки цилиндров, вводится коэффициент использования теплоты сгорания  $\xi$ . Коэффициент использования теплоты определяется экспериментально. Для дизелей  $\xi = 0,70$ – $0,85$  и бензиновых двигателей  $\xi = 0,85$ – $0,90$  [2, с. 119].

Участок сгорания индикаторной диаграммы процесса характеризует тепловой баланс, который, согласно первому закону термодинамики, можно записать в виде

$$\xi H_U = U_Z - U_C + l_{Z'-Z}, \quad (12)$$

где  $\xi H_U$  – количество теплоты, введенное в цилиндр при сгорании 1 кг топлива;

$U_Z$  и  $U_C$  – внутренняя энергия введенной рабочей смеси и продуктов сгорания;

$l_{Z'-Z}$  – работа расширения газов на участке  $z' - z$  индикаторной диаграммы.

Для дизелей это уравнение представлено [2, с. 119] в развернутом виде:

$$\xi H_U = (m_1 + m_2)U_Z'' - m_1U_C - m_rU_C'' + l_{Z'-Z}, \quad (13)$$

где  $U_Z''$  и  $U_C''$  – внутренняя энергия 1 кг·моль продуктов сгорания при температурах в точках  $z$  и  $c$ ;

$m_1$ ,  $m_2$  и  $m_r$  – массовое количество (кг·моль) свежего заряда, продуктов сгорания и остаточных газов на 1 кг введенного в цилиндр топлива.

Работа газов в период сгорания на участке индикаторной диаграммы  $z' - z$  равна:

$$l_{Z'-Z} = p_z V_z - p_{z'} V_C.$$

После подстановки значений уравнение (13) имеет вид

$$\frac{\xi H_U}{m_1(1 + \gamma_{OCT})} + (c_{\mu V} + 8,314\lambda_p)T_C = c_{\mu V}'' \mu T_z, \quad (14)$$

где  $\gamma_{OCT} = \frac{m_r}{m_1}$  и  $\mu = \frac{m_2 + m_r}{m_1 + m_r}$ ;

$c_{\mu V}$  – средняя молярная теплоемкость воздуха;

$c_{\mu V}''$  – средняя молярная теплоемкость продуктов сгорания;

$T_z$  – температура продуктов сгорания.

Из уравнения (14) определяется температура в конце процесса сгорания:

$$T_z = \frac{\frac{\xi H_U}{m_1(1 + \gamma_{OCT})} + (c_{\mu V} + 8,314\lambda_p)T_C}{c_{\mu V}'' \mu}. \quad (15)$$

Для бензиновых двигателей при полном сгорании топлива уравнение (15) имеет вид

$$T_z = \frac{\frac{\xi H_U}{m_1(1 + \gamma_{OCT})} + c_{\mu V} T_C}{c_{\mu V}'' \mu}. \quad (16)$$

Температура газов в конце сгорания в дизелях составляет 1800–2200 К и в бензиновых двигателях – 2300–2800 К. Это свидетельствует о том, что тепловой поток в охлаждающую жидкость в процессе сгорания имеет наибольшее значение.

Процесс расширения характеризуется интенсивным теплообменом между газами в цилиндре и стенками. Температура газов в конце расширения определяется [2, с. 122] из уравнения состояния газов в начале и конце расширения:

$$p_b V_b = 8,314(m_2 + m_{\Gamma})T_b;$$

$$p_z V_z = 8,314(m_2 + m_{\Gamma})T_z.$$

Откуда

$$T_b = T_z \frac{\varepsilon p_b}{\rho p_z}, \quad (17)$$

где  $\rho = \frac{V_z}{V_C}$ .

Для дизелей  $\frac{p_b}{p_z} = \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{n_2-1}$ , тогда

$$T_b = T_z \left(\frac{\rho}{\varepsilon}\right)^{n_2-1}. \quad (18)$$

Для бензиновых двигателей  $\frac{p_b}{p_z} = \frac{1}{\varepsilon^{n_2}}$  и  $\rho = 1$ , тогда

$$T_b = \frac{T_z}{\varepsilon^{n_2-1}}. \quad (19)$$

Значения параметров процесса сгорания в конце такта расширения для двигателей [3, с. 177] приведены в таблице 5.

Таблица 5 – Параметры конца такта расширения

Показатели	Дизели	Двигатели с искровым зажиганием
Температура в конце сгорания, $T_z$ , К	1800–2200	2500–2850
Давление, $p_z$ , МПа	7,5–12,5	3,0–5,5
Температура в конце такта расширения, $T_b$ , К	1000–1200	1400–1700
Давление, $p_b$ , МПа	0,25–0,60	0,4–0,6

Угол поворота коленчатого вала при сгорании горючей смеси в цилиндре составляет  $\varphi_z = 20\text{--}30^\circ$ , по времени сгорание происходит за  $1,39 \cdot 10^{-4}\text{--}5,95 \cdot 10^{-5}$  с. Мгновенное сгорание горючей смеси позволяет принимать, что сгорание происходит при постоянном объеме. За этот промежуток времени температура в цилиндре дизеля увеличивается до 1800–2800°C, у бензиновых двигателей температура достигает 2500–2850°C. Скорость изменения температуры при сгорании топлива у дизелей при  $n_e = 2400$  об/мин равна  $7,90 \cdot 10^6\text{--}9,36 \cdot 10^6$  град/с, у бензиновых двигателей при  $n_e = 5600$  об/мин –  $3,20 \cdot 10^7\text{--}3,40 \cdot 10^7$  град/с.

В последующем, под действием развивающегося давления газов в цилиндре, поршень перемещается к НМТ, совершая механическую работу.

Такт расширения продолжается до начала открытия выпускного клапана. По углу поворота коленчатого вала это составляет: у дизелей –  $122^\circ$ , у бензиновых двигателей –  $126^\circ$ . Такт расширения характеризуется интенсивной отдачей теплоты рабочего тела. Перепад температур между концом тактов расширения и сжатия составляет  $\Delta T_{b-c} = 300\text{--}350^\circ\text{C}$  у дизелей и  $\Delta T_{b-c} = 700\text{--}800^\circ\text{C}$  у бензиновых двигателей. Скорость изменения температуры у дизелей равна  $2,29 \cdot 10^4\text{--}3,20 \cdot 10^4 \text{ град/с}$ , у бензиновых двигателей –  $9,70 \cdot 10^4\text{--}22,0 \cdot 10^4 \text{ град/с}$  соответственно.

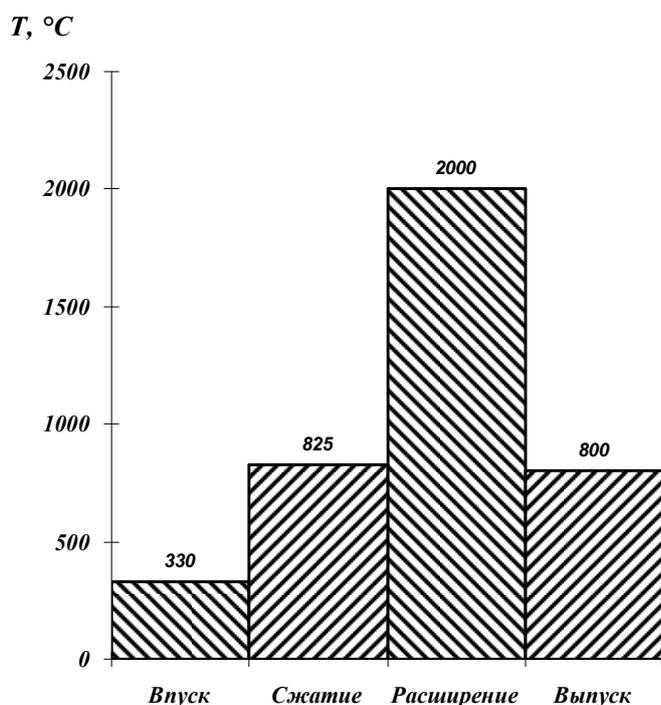
В дизелях, по сравнению с бензиновыми двигателями, температура в конце такта расширения ниже на  $400\text{--}500^\circ\text{C}$  вследствие большей степени сжатия. Снижение температуры в конце расширения у дизелей отмечено при уменьшении количества впрыскиваемого топлива, то есть при уменьшении нагрузки. Принимая такт расширения совместно с процессом сгорания, следует отметить, что тепловая нагрузка на стенки цилиндров и охлаждающую жидкость наибольшая при такте расширения.

*Такт выпуска.* Температура отработавших газов зависит от скоростного режима и от нагрузки двигателя и с увеличением указанных факторов повышается. Температура газов в конце процесса выпуска у дизелей составляет  $600\text{--}900 \text{ K}$ , у бензиновых двигателей –  $900\text{--}1000 \text{ K}$ . Продолжительность такта выпуска у дизелей по углу поворота коленчатого вала составляет  $253^\circ$ , по времени при частоте вращения коленчатого вала  $1500\text{--}2400 \text{ об/мин}$  равна  $2,81 \cdot 10^{-2}\text{--}1,76 \cdot 10^{-2} \text{ с}$ , у бензиновых двигателей по углу поворота коленчатого вала составляет  $265^\circ$ , что по времени равно  $1,84 \cdot 10^{-2}\text{--}7,89 \cdot 10^{-3} \text{ с}$ . Перепад температуры между тактом расширения и выпуска равен  $\Delta T_{r-b} = 300\text{--}350^\circ\text{C}$ , у бензиновых двигателей –  $400\text{--}600^\circ\text{C}$ . При такте выпуска температура в цилиндре уменьшается, скорость изменения температуры у дизелей (см. рисунок 8) равна  $1,1 \cdot 10^4\text{--}1,8 \cdot 10^4 \text{ град/с}$ , у бензиновых двигателей (см. рисунок 9) –  $2,6 \cdot 10^4\text{--}7,8 \cdot 10^4 \text{ град/с}$ .

Тепловая энергия отработавших газов достаточно значительна, часть ее расходуется на нагрев деталей двигателя при выпуске, оставшаяся часть рассеивается в окружающей среде. Поэтому ее утилизация, например с целью подогрева впускного коллектора, использования кинетической энергии газов для наддува и других целей, позволяет повысить эффективность двигателя и обеспечить экономию топлива.

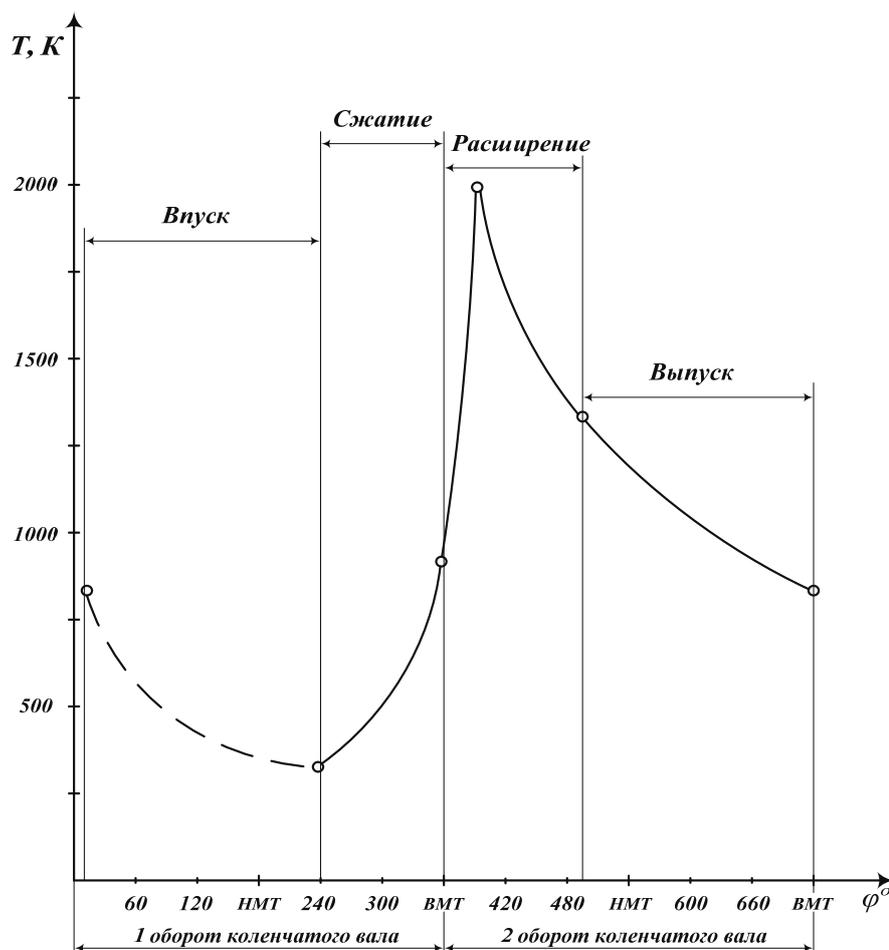
Температура рабочего процесса в цилиндрах двигателя характеризует внутренний и внешний теплообмен. Характерно, что процессы теплообмена совершаются в очень короткий период времени, который определяется частотой вращения коленчатого вала двигателя.

Средние значения температур в конце совершаемых тактов отличаются незначительно, перепад между ними составляет  $300\text{--}500^\circ\text{C}$ . Номограмма температур рабочего процесса по тактам приведена на рисунке 10.



**Рисунок 10 – Номограмма температуры в цилиндре при рабочем процессе в дизеле**

Однако в начальный период совершения такта расширения в промежутке по углу поворота коленчатого вала 20–30° температура достигает: у дизелей 1800–2200°С, у бензиновых двигателей 2500–2800°С. Среднее статистическое значение температуры рабочего процесса с учетом температуры сгорания горючей смеси составляет: у дизелей 1100°С, у бензиновых двигателей 1250°С. Характер изменения температуры в цилиндре по углу поворота коленчатого вала приведен на рисунке 11.



**Рисунок 11 – Температура в конце тактов рабочего процесса двигателя**

В таблице 6 приведены расчетные температурные параметры рабочего процесса дизеля, исходные расчетные данные приняты по среднестатистическим значениям, приведенным в таблицах 3–5.

Таблица 6 – Параметры рабочего процесса

Параметры	Такты			
	впуск	сжатие	сгорание расширение	выпуск
Частота вращения коленчатого вала, $\text{мин}^{-1}$	2400			
Продолжительность такта по углу поворота коленчатого вала, $\text{град.}$	265	116	25 122	253
Время совершения цикла рабочего процесса, $\text{с}$	$5 \cdot 10^{-2}$			
Время совершения такта, $\text{с}$	$1,84 \cdot 10^{-2}$	$8,06 \cdot 10^{-3}$	$1,74 \cdot 10^{-3}$ $8,47 \cdot 10^{-3}$	$1,76 \cdot 10^{-2}$
Температура в конце такта, $\text{К}$	370	675	2650 1500	950
Температурный напор, $^{\circ}\text{С}$	-580	305	1975 825	-550
Скорость изменения температуры, $\text{град./с}$	$3,2 \cdot 10^4$	$3,8 \cdot 10^4$	$11,3 \cdot 10^5$ $9,7 \cdot 10^4$	$3,1 \cdot 10^4$

### Заключение

Цикличность изменения температуры в цилиндре за очень малый промежуток времени показывает наибольшее значение теплового потока от рабочего тела на такте расширения при сгорании горючей смеси. В многоцилиндровых двигателях такты расширения соответствуют порядку работы цилиндров, промежутки между тактами уменьшаются, что приводит к увеличению количества теплоты, поступающей в массу двигателя и охлаждающую жидкость. Значения перепадов температуры свидетельствуют об интенсивности тепловых потоков. Высокая тепловая напряженность двигателя при работе требует эффективного принудительного отвода теплоты от двигателя.

Приведенные исследования позволяют отметить, что температура рабочего тела в цилиндре является определяющей процессов теплообмена, происходящих в двигателе. Теплота, поступающая в массу двигателя и охлаждающую жидкость, функционально зависит и от продолжительности совершения такта, его периодичности. Увеличение числа цилиндров сокращает периодичность между циклами поступления теплоты, что способствует увеличению количества теплоты, поступающей в систему охлаждения. Значения температуры рабочего тела по тактам свидетельствуют о неравномерности температуры деталей двигателя и их нагрева. В поток охлаждающей жидкости теплота также поступает периодически, однако смешивание слоев жидкости вследствие циркуляции выравнивает общую температуру жидкости.

Определение характера изменения температуры газов в цилиндре по углу поворота коленчатого вала, представленный анализ цикличности изменения температуры газов по тактам, а также выявление взаимосвязей, касающихся выделения теплоты в охлаждающую жидкость при различных конструктивных исполнениях двигателя, позволяют конструкторам создавать такие системы охлаждения, при которых становится невозможным наступление неустановившегося температурного режима (перегрева) двигателя.

17.06.11

### Литература

1. Якубович, А.И. Экономия топлива на тракторах: монография / А.И. Якубович, Г.М. Кухаренок, В.Е. Тарасенко. – Минск: Белорусский национальный технический университет, 2009. – 229 с.
2. Железко, Б.Е. Термодинамика, теплопередача и двигатели внутреннего сгорания: учеб. пособие для спец. 1616 «Орг. дор. движения». 1617 «Эксплуатация автомоб. трансп.» вузов / Б.Е. Железко, В.М. Адамов, Р.И. Есьман; под ред. Б.Е. Железко. – Минск: Высшая школа, 1985. – 271 с.
3. Двигатели внутреннего сгорания: теория рабочих процессов: учеб. для вузов: в 3 кн. / В.Н. Луканин [и др.]; под ред. В.Н. Луканина и М.Г. Шатрова. – 3-е изд., перераб. и испр. – М.: Высшая школа, 2007. – Кн. 1. – 479 с.
4. Двигатели внутреннего сгорания: учеб. для вузов по спец. «Строительные и дорожные машины и оборудование» / А.С. Хачиян [и др.]; под ред. В.Н. Луканина. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1985. – 311 с.
5. Орлин, А.С. Двигатели внутреннего сгорания. Рабочие процессы в двигателях и их агрегатах / А.С. Орлин, Д.Н. Вырубов, Г.Г. Калиш. – М.: Машгиз, 1957. – Т. 1. – 396 с.
6. Автомобильные и тракторные двигатели: учеб. для втузов / И.М. Ленин [и др.]; под ред. И.М. Ленина. – 2-е изд., доп. и перераб. – М.: Высшая школа, 1976. – 368 с.
7. Вырубов, Д.Н. Двигатели внутреннего сгорания. Теория поршневых и комбинированных двигателей: учеб. для вузов по спец. «Двиг. внутрен. сгорания» / Д.Н. Вырубов [и др.]; под ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1983. – 372 с.
8. Теплообмен в двигателях и теплонапряженность их деталей / Н.Х. Дьяченко [и др.]; под ред. С.Н. Дашкова. – Л.: Машиностроение, 1969. – 248 с.

УДК (631.374:621.867):62–189.2

Л.Я. Степук

*(РУП «НПЦ НАН Беларуси  
по механизации сельского хозяйства»),  
г. Минск, Республика Беларусь)*

**НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ  
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ПОТОЧНЫХ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ЛИНИЙ  
ПРИГОТОВЛЕНИЯ  
ПОЛИДИСПЕРСНЫХ  
СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

### Введение

По существу, процесс приготовления различных полидисперсных материалов является процессом точного дозирования компонентов и их равномерного смешивания. От дозирования зависит, насколько правильно в количественном отношении введены в состав кормовой смеси предусмотренные рецеп-