

УДК 536.8(045)

Г.А. Янченко

АНАЛИЗ ИДЕАЛЬНОГО ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОГО ЦИКЛА ВОЗДУШНО-ОГНЕСТРУЙНЫХ ТЕРМОИНСТРУМЕНТОВ

Установлено характер влияния на величину термического коэффициента полезного действия идеального термодинамического цикла воздушно-огнеструйного термоинструмента степени повышения давления воздуха в компрессоре, состава продуктов сгорания используемого топлива и режима истечения их в окружающую среду.

Ключевые слова: воздушно-огнеструйный термоинструмент, термодинамический цикл, термический коэффициент полезного действия.

В воздушно-огнеструйных термоинструментах рабочим телом, непосредственно воздействующим на разрушаемую горную породу, является высокотемпературная сверхзвуковая струя продуктов сгорания органического топлива в воздухе. Принцип работы этих термоинструментов аналогичен принципу работы жидкостных воздушно-реактивных двигателей компрессорного типа, в которых рабочим телом являются продукты сгорания жидкого органического топлива в сжатом атмосферном воздухе.

Для термодинамического анализа работы воздушно-огнеструйного термоинструмента рассмотрим представленную на рис. 1 принципиальную схему установки, составные части которой обеспечивают работу термоинструмента

Принципиальная схема установки включает: камеру сгорания 1 термоинструмента, сопловой аппарат 2 для получения сверхзвуковой струи продуктов сгорания 3, компрессор 4 для подачи сжатого атмосферного воздуха в камеру сгорания 1, ёмкость 5 для жидкого органического топлива и насос 6 для подачи топлива в камеру сгорания.

Работа термоинструмента обеспечивается следующим образом. Компрессор 4 засасывает атмосферный

воздух, сжимает его и направляет в камеру сгорания 1 термоинструмента, куда одновременно через форсунку впрыскивается жидкое топливо, подаваемое под давлением топливным насосом 6. В камере сгорания жидкое топливо испаряется, смешивается с воздухом и сгорает под постоянным давлением. Продукты сгорания расширяются в сопловом аппарате, включающим сопло Лаваля, и со сверхзвуковой скоростью направляются на разрушаемую поверхность горной породы (забой шпура или скважины, стенки скважины, обрабатываемая поверхность каменного блока). Сверхзвуковая скорость истечения продуктов сгорания обеспечивает высокую интенсивность передачи тепла от высокотемпературных продуктов сгорания нагреваемой поверхности горной породы, что обеспечивает её хрупкое разрушение. Стенки камеры сгорания с внешней стороны и сопловой аппарат принудительно охлаждаются воздухом или водой.

Строго говоря, работа воздушно-огнеструйного термоинструмента не является замкнутым термодинамическим процессом, то есть циклом, ибо продукты сгорания, расширившись и разогнавшись до сверхзвуковой скорости, выбрасываются в атмосферу, а на их

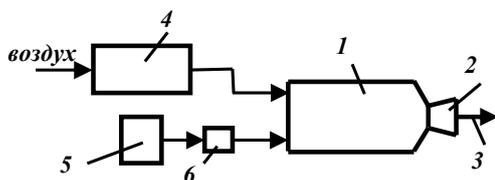


Рис. 1. Принципиальная схема установки с воздушно-огнеструйным термоминструментом

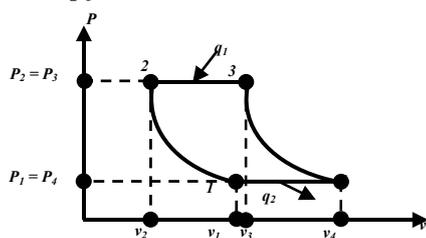


Рис. 2. Идеальный термодинамический цикл воздушно-огнеструйного термоминструмента

место поступает новая порция горючей смеси. Химический состав рабочего тела изменяется только в одном направлении, а именно в состав продуктов сгорания. Обратный процесс превращения продуктов сгорания в смесь топлива с воздухом не осуществляется.

Чтобы оценить эффективность работы воздушно-огнеструйного термоминструмента и факторы, влияющие на его работу, приходится условно рассматривать идеальный замкнутый цикл, в котором рабочее тело, то есть продукты сгорания, является идеальным газом с постоянной теплоёмкостью, поступление тепла в результате сгорания горючей смеси заменяется обратимым процессом подвода удельного тепла от внешнего горячего источника q_1 , а процесс отвода тепла, содержащегося в продуктах сгорания, заменяется обратимым отводом удельного тепла q_2 к холодному источнику. Такой подход характерен при рассмотрении циклов всех тепловых машин.

Принятые допущения приводят к изучению идеальных термодинамических циклов всех тепловых машин, что

позволяет сравнивать их эффективность и определять факторы, влияющие на их термический коэффициент полезного действия (КПД). Диаграмма, построенная с учётом вышеуказанных допущений, будет уже не индикаторной диаграммой двигателя, а Pv -диаграммой его цикла.

Цикл воздушно-огнеструйного термоминструмента в Pv -диаграмме представлен на рис. 2. Подаваемый в камеру сгорания 1 термоминструмента воздух сжимается по политропе 1—2 (все воздушные компрессоры производят сжатие воздуха по политропе с показателем политропы $n = 1,18 \dots 1,20$) от атмосферного давления P_1 до давления в камере сгорания P_2 . При этом температура воздуха повышается от начальной T_1 до конечной T_2 . В камере сгорания топливо сгорает при постоянном давлении (прямая 2—3) и рабочее тело (продукты сгорания) получают удельное тепло q_1 . При этом температура рабочего тела (продуктов сгорания) повышается от начальной T_2 до конечной T_3 . Образовавшиеся газообразные продукты сгорания при движении по соплу Лавалья расширяются по адиабате 3-4. При этом температура продуктов сгорания понижается от начальной T_3 (температура на выходе из камеры сгорания, то есть на входе в сопловой аппарат) до конечной T_4 (температура на срезе сопла Лавалья). При работе термоминструмента на так называемом расчётном режиме, который является оптимальным, давление продуктов сгорания на срезе сопла оказывается равным (в точке 4) атмосферному давлению. Поэтому отдача тепла окружающей среде (горная порода, атмосфера) происходит по изобаре при давлении $P_4 = P_1$. Изобару 4—1 в принципе считают условным изобарным процессом отвода тепла, в результате которого продукты сгорания охлаждаются до температуры окружающего воздуха T_1 за пределами камеры сгорания термоминструмента.

Учитывая, что минимальная и максимальная температуры в рассматриваемом цикле равны соответственно T_1 и T_3 , количества подведённого q_1 и отведённого q_2 тепла в этом цикле определим как:

$$\left. \begin{aligned} q_1 &= C_{P, \text{ыз}}(T_1 \dots T_3)(T_3 - T_2); \\ q_2 &= C_{P, \text{ыз}}(T_1 \dots T_3)(T_4 - T_1). \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $C_{P, \text{ыз}}(T_1 \dots T_3)$ — изобарная удельная теплоёмкость продуктов сгорания, усреднённая в диапазоне температур от T_1 до T_3 , Дж/(кг·К).

Следовательно, термический КПД цикла будет:

$$\begin{aligned} \eta_T &= 1 - \frac{|q_2|}{q_1} \approx 1 - \frac{C_{P, \text{ыз}}(T_1 \dots T_3)(T_4 - T_1)}{C_{P, \text{ыз}}(T_1 \dots T_3)(T_3 - T_2)} \approx \\ &\approx 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}. \end{aligned} \quad (2)$$

Температура атмосферного воздуха T_1 и его температура после сжатия в компрессоре T_2 малы по сравнению с температурами продуктов сгорания соответственно на выходе из сопла T_4 и на выходе из камеры сгорания T_3 . Следовательно, для идеального цикла выражение (2) с очень небольшой погрешностью можно представить в виде:

$$\eta_T \approx 1 - \frac{T_4}{T_3} = 1 - \frac{1}{T_3/T_4}. \quad (3)$$

Учитывая, что расширение продуктов сгорания в сопле Лавала осуществляется по адиабате 3-4, то произведя замену

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{P_3}{P_4}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}},$$

получим:

$$\eta_T \approx 1 - \frac{1}{\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}} \approx 1 - \frac{1}{\lambda_{\text{па}}^{\frac{k-1}{k}}}, \quad (4)$$

где $\lambda_{\text{па}} = \frac{P_2}{P_1}$ — степень повышения давления воздуха в компрессоре; $k = k(T_1 \dots T_2)$ — показатель адиабаты продуктов сгорания усредненный в диапазоне температур от T_1 до T_2 .

Из (4) следует, что термический КПД воздушно-огнеструйного термоинструмента напрямую зависит от степени повышения давления воздуха в компрессоре, состава продуктов сгорания, влияющий на их показатель адиабаты, и конструкции сопла Лавала. Если конструкция сопла будет не оптимальной, то режим истечения продуктов сгорания будет нерасчётным, при котором абсолютное давление на срезе сопла будет больше P_1 . Уменьшение знаменателя в вычитаемом приведёт к уменьшению η_T .

Таким образом, использование воздушных компрессоров с высокими степенями сжатия воздуха способствует повышению термического КПД воздушно-огнеструйных термоинструментов, что соответственно приведёт к увеличению эффективности термического разрушения породы. Данный вывод полностью подтверждает объективность результатов экспериментальных исследований выполненных в 60-е годы прошлого века по термическому бурению скважин на форсированных режимах работы воздушно-огнеструйных термоинструментов [1].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шнапир Я.И. Исследование влияния внутрикамерных параметров горелки на эффективность огневого бурения взрывных

скважин на карьерах: Автореферат кандидатской диссертации. — М.: МГИ, 1970. — 17 с. **ИДЭ**

КОРОТКО ОБ АВТОРЕ

Янченко Геннадий Алексеевич — доктор технических наук, профессор, Московский государственный горный университет, ud@msmu.ru.