

В. В. Червов¹✉, И. Е. Иоанов¹, И. В. Тищенко¹, А. В. Червов¹, А. В. Червов¹

Обоснование параметров устройства ударного действия внутреннего сгорания для производства горных и строительных работ в условиях Сибири и Арктики

¹Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт горного дела им. Н. А. Чинакала Сибирского отделения Российской академии наук,
г. Новосибирск, Российская Федерация
e-mail: chervov@misd.ru

Аннотация. Реализация горно-строительных технологий на основе применения ударно-импульсных машин в условиях низких и отрицательных температур может быть выполнена с использованием устройств, преобразующих энергию сгоревших газов в кинетическую энергию ударника. Создание устройства ударного действия, работающего на принципе свободнопоршневого двигателя внутреннего сгорания, предполагает разработку пневматической системы запуска, совмещенную с автономно работающим устройством ударного действия, имеющим в качестве источника механической энергии камеру сгорания. Практический опыт создания многочисленных пневмоударных машин в Институте горного дела СО РАН им. Н. А. Чинакала в сочетании с современным мировым опытом в области двигателестроения дает основу для успешного претворения в жизнь идей по созданию машины ударного действия внутреннего сгорания.

Ключевые слова: двигатель внутреннего сгорания, устройство ударного действия, сжатый воздух, запуск, камера сгорания, безразмерные параметры, степень сжатия

V. V. Chervov¹✉, I. E. Ioanov¹, I. V. Tishchenko¹, A. V. Chervov¹, A. V. Chervov¹

Justification of the parameters of an internal combustion impact device for mining and construction work in Siberia and the Arctic

¹Federal State Budgetary Institution of Science N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation
e-mail: chervov@misd.ru

Annotation. Implementation of mining and construction technologies based on the use of impact-pulse machines in low and subzero temperatures can be accomplished using devices that convert the energy of combustion gases into the kinetic energy of the impactor. The creation of an impact device operating on the principle of a free-piston internal combustion engine requires the development of a pneumatic starting system combined with an autonomous impact device using a combustion chamber as a source of mechanical energy. Practical experience in creating numerous pneumatic impact machines at the N. A. Chinakal Institute of Mining, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, combined with modern global experience in engine engineering, provides the basis for the successful implementation of ideas for creating an internal combustion impact machine.

Keywords: internal combustion engine, impact device, compressed air, starting, combustion chamber, dimensionless parameters, compression ratio

Введение

В настоящее время при производстве горных и строительных работ для разрушения горных пород, уплотнения грунта, погружения стержневых элементов в грунт и т.д. применяются машины ударного действия. В качестве рабочего тела в них используется сжатый воздух, жидкость под высоким давлением или сгоревшие газы, передающие энергию ударнику. Главными условиями высокопроизводительной и эффективной работы являются большая удельная мощность, экономичность и надежная эксплуатация устройства ударного действия в условиях пониженных температур окружающей среды. Этому могут отвечать устройства с двигателем внутреннего сгорания или с камерой сгорания. Широко применяемые в настоящее время дизель-молоты удобны в эксплуатации, однако они работают только при вертикальном или наклонном погружении стержневых элементов и имеют трудный запуск на слабых грунтах. Пневмопробойники, применяемые в качестве ударных узлов, работают при любом положении корпуса, причем, положительные эксплуатационные качества сжатого воздуха, как энергоносителя, можно реализовать в простых и надежных конструкциях. Совмещение двигателя внутреннего сгорания и пневмоударного механизма в одной машине – один из путей создания автономного, мощного и экономичного устройства [1], обладающего повышенными эксплуатационными качествами. Поэтому, исследования, направленные на разработку устройства ударного действия внутреннего сгорания с пневматической системой запуска [2] являются весьма актуальными.

Данная работа выполнена по плану научных исследований, проводимых в Институте горного дела СО РАН СССР, по теме: "Разработка виброударных машин, систем управления ими с учетом свойств породного массива, для технологически эффективной и экологически безопасной добычи минерального и углеводородного сырья в сложных горно-геологических условиях, районах Сибири и Арктической зоны".

Объект и метод исследований

Цель работы. Создание научных основ проектирования опытно-конструкторского образца автономного устройства ударного действия для погружения стержневых элементов в грунт.

Идея работы. На основании выбранной принципиальной схемы определяются основные конструктивные параметры и соотношения между ними, а также условия запуска экспериментального устройства ударного действия с циклом двигателя внутреннего сгорания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- выбор принципиальной схемы и обоснование основных параметров устройства ударного действия с камерой сгорания для проведения аналитических и экспериментальных исследований;
- определение границ и условий работоспособности в режимах запуска

(сжатый воздух), перехода (сжатый воздух и бензино-воздушная смесь) и работы (бензино-воздушная смесь);

Научная работы новизна состоит в следующем:

- определены основные безразмерные параметры устройства ударного действия внутреннего сгорания с пневмозапуском;
- разработано экспериментальное устройство с широкими пределами регулирования основных параметров;
- определены границы работоспособности и влияние основных параметров на выходные показатели устройства;
- на примере погружения в грунт металлических труб доказана работоспособность устройства с задним расположением камеры сгорания и пневмозапуском для перехода в автономный режим работы.

Практическая ценность работы заключается в обосновании возможности создания и использования устройства ударного действия с задним расположением камеры сгорания и пневмозапуском; в разработке конструкции опытного образца устройства.

Обсуждение, анализ результатов

На первом этапе были рассмотрены известные устройства ударного действия с камерой внутреннего сгорания, а также механизмы для погружения стержневых элементов в грунт. Из ряда существующих способов погружения элементов в грунт, в большинстве случаев, самым эффективным является ударный способ. Из механизмов для ударного способа погружения наибольшее распространение получили дизель-молоты и пневмоударные машины (пневмопробойники). Дизель-молоты автономны в работе и эффективны при погружении вертикальных или слегка наклонных свай, труб и т.п. При эксплуатации дизель-молотов в условиях низких температур или на слабых грунтах могут возникнуть трудности запуска. Для погружения в горизонтальном направлении удобной и надежной в эксплуатации является пневмоударная машина, существенным недостатком которой является прежде всего зависимость от источника сжатого воздуха.

Создание автономного с достаточно высокими удельными энергетическими и экономическими показателями устройства ударного действия начато с анализа известных устройств с камерой сгорания.

В Институте горного дела им. А. А. Скочинского под руководством профессора, д.т.н. Ю. Д. Красникова разработан дизель-импульсный привод для угледобывающих струговых установок. Он может быть применен и для дробления негабаритов.

В Московском геологоразведочном институте им.Серго Орджоникидзе под руководством д.т.н. Е. Г. Фонберштейна и д.т.н. С. П. Экомасова создан бензино-воздушный молот для дробления негабаритов. Особенности принципиальной схемы - отделение рабочей камеры от камеры сгорания управляемым клапаном - позволяют получить высокие удельные энергетические показатели. Для работы данное устройство имеет клапанное газораспределение, электронное зажигание,

устройство для приготовления бензино-воздушной смеси, внешний источник сжатого воздуха и специальную систему управления.

Удачным техническим решением является универсальный ручной инструмент с двигателем внутреннего сгорания "Пионер", разработанный шведской фирмой "Attas Copco". Особенностью данной схемы устройства является кривошипно-шатунный механизм, упрощающий запуск устройства в работу. Использование дифференциального ударника расширяет область применения данной машины.

В Институте горного дела СО АН СССР первые работы по созданию дизель-пробойника для проходки скважин в грунте начаты в 1968, затем они были продолжены в 1979 году и ведутся в настоящее время. Большой теоретический и практический опыт, накопленный в институте при создании пневмоударных механизмов обусловил выбор пневматической системы для запуска устройства ударного действия внутреннего сгорания.

После изучения известных технических решений приступили к выбору и обоснованию принципиальной схемы устройства ударного действия внутреннего сгорания. Для анализа схемы сделана классификация известных устройств подобного типа по основным функциональным и конструктивным признакам.

Для надежного запуска и устойчивой работы устройства целесообразно заднее расположение камеры сгорания, работающей по циклу Отто с принудительным воспламенением горючей смеси электронной системой зажигания. Данный цикл позволяет использовать горючую смесь, приготовленную вне устройства ударного действия, т.е. изолировать смеситель от ударных нагрузок.

Принципиальная схема устройства ударного действия приведена на рис.1. Система пневматического запуска включает буферную камеру обратного хода и кольцевую камеру прямого хода.

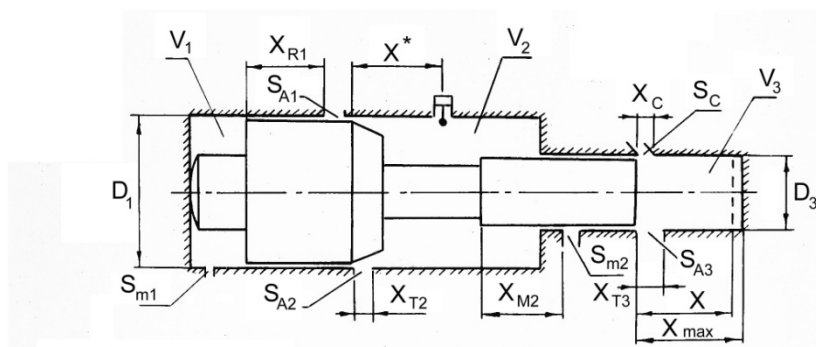


Рис. 1. Принципиальная схема устройства ударного действия с задним расположением камеры сгорания и пневматической системой запуска.

V_1 , V_2 , V_3 - объемы буферной, кольцевой и камеры сгорания при положении

ударника "на наковальне" ; $X_{\max}$, X , X_{R1} , X_{M2} - длина хода соответственно максимального, фактического, рабочего в буферной камере, до момента открытия впускного окна в кольцевую камеру; X_{T2} и X_{T3} - длины "теряемых" ходов по атмосферным отверстиям; X_C - длина продувочных окон; X^* - координата подачи искры; S_{MBK} , S_{MKK} - сечения впускных магистральных отверстий; S_{A1} , S_{A2} , S_{A3} - сечения атмосферных отверстий; S_C - сечение продувочных окон; D_1 - диаметр буферной камеры; D_3 - диаметр камеры сгорания.

После появления устойчивых вспышек в камере сгорания сжатый воздух от этих камер отключается, и устройство работает в режиме двухтактного двигателя внутреннего сгорания. При этом прямой ход ударник совершает под действием давления сгоревших газов, а обратный - под действием давления предварительно сжатого в буферной камере воздуха.

Для определения условий запуска и перехода к автономной работе был сделан выбор и обоснование основных безразмерных параметров. Определены соотношения между основными параметрами и ориентировочные границы работоспособности, при которых устройство может запускаться и устойчиво работать.

В качестве основных безразмерных параметров приняты: соотношение площадей φ , степени сжатия в камерах ε_{BK} , ε_{KK} и ε_{KC} при крайних положениях ударника и коэффициенты "теряемых" ходов Δ_{BK} , Δ_{KK} и Δ_{KC} на закрытие атмосферных отверстий.

Для анализа и определения условий запуска приняты следующие допущения:

- газодинамические процессы в камерах протекают по политропическому закону;
- перетечки из камер не учитываются;
- механические потери на трение отсутствуют;
- заполнение кольцевой управляемой камеры сжатым воздухом и выхлоп из нее происходят мгновенно.

Из условия баланса энергий для режима запуска соотношение между основными безразмерными параметрами имеет вид:

$$\varphi = (1 - \Delta_{KK}) \cdot K'_{KK} / (K'_{KK} \cdot (1 - \Delta_{KK}) - K_{BK}(1 - \Delta_{BK}))$$

где

$$K'_{KK} = \mu \cdot (K_{KK} + 1) - 1;$$

μ - степень повышения давления в кольцевой камере;

$$\mu = P_M / (P_A \cdot \varepsilon_{KK}^n);$$

P_M - абсолютное давление в магистрали;

P_A - атмосферное давление;

n - показатель политропы;

$$K_{KK} = \frac{\varepsilon_{KK}^n - \varepsilon_{KK}}{(\varepsilon_{KK} - 1) \cdot (n - 1)} - 1;$$

$$K_{БК} = \frac{\varepsilon_{БК}^n - \varepsilon_{БК}}{(\varepsilon_{БК} - 1) \cdot (n - 1)} - 1;$$

$\varepsilon_{КК}$ – степень сжатия в кольцевой камере;

$\varepsilon_{БК}$ – степень сжатия в буферной камере.

Для режима работы соотношение между основными безразмерными параметрами имеет вид:

$$\varphi = (K_{КС} \cdot (1 - \delta_{КС}) - K_{КС}(1 - K_{КК})) / (K_{БК} \cdot (1 - \delta_{БК}) - K_{КК} \cdot (1 - \delta_{КК})),$$

где

$$K_{КС} = \frac{\varepsilon_{КС}^n - \varepsilon_{КС}}{(\varepsilon_{КС} - 1) \cdot (n - 1)} - 1;$$

$\varepsilon_{КС}$ – степень сжатия в камере сгорания;

$$\delta_{БК} = X_{\deltaБК} / X_{max}; \quad \delta_{КК} = X_{\deltaКК} / X_{max}; \quad \delta_{КС} = X_{\deltaКС} / X_{max};$$

$X_{\deltaБК}$, $X_{\deltaКК}$, $X_{\deltaКС}$ – длины теряемых ходов;

$$X_{max} = V_{КС} / S_{КС},$$

$V_{КС}$ – полный объем камеры сгорания;

$S_{КС}$ – площадь сечения камеры сгорания.

Общая зависимость основных параметров представляет, прежде всего, соотношение между степенями сжатия при определенном соотношении площадей φ :

$$K_{БК} = \frac{1}{1 - \delta_{БК}} \cdot \frac{K_{КС} \cdot (1 - \delta_{КС}) \cdot K'_{КК} \cdot (1 - \delta_{КК})}{K'_{КК} \cdot (1 - \delta_{КК}) + K_{КС} \cdot (1 - \delta_{КС}) - K_{КК} \cdot (1 - \delta_{КК})}.$$

Если $\delta_{КС} = \delta_{КК} = \delta_{БК}$, то

$$K_{БК} = \frac{K_{КС} \cdot K'_{КК}}{K'_{КК} + K_{КС} - K_{КК}}.$$

Данное выражение представляет собой функциональную зависимость

$$F(\varepsilon_{БК}, \varepsilon_{КК}, \varepsilon_{КС}) = 0.$$

Предельное значение степени сжатия в буферной камере ограничивается температурой вспышки масла $T_{ВСП} = 473^0 \text{ К}$

$$\varepsilon_{БК}^{max} = \left(\frac{T_{ВСП}}{T_a} \right)^{1/(n-1)} = 6,79,$$

где $T_a = 293^0 \text{ K}$ – температура окружающего воздуха.

Максимальное значение степени сжатия в кольцевой камере определяется из условия достижения в ней необходимой степени повышения давления при запуске $\lambda = 2$.

$$\varepsilon_{\text{КК}}^{\text{max}} = \left(\frac{P_{\text{М}}}{P_a \cdot \lambda} \right)^{1/1,25} = \left(\frac{0,7}{0,1 \cdot 2} \right)^{1/1,25} = 2,72.$$

Минимально необходимое значение степени сжатия в камере сгорания для надежного и стабильного воспламенения горючей смеси из опыта создания д.в.с. должно быть не менее $\varepsilon_{\text{КС}} = 4,5$.

Для надежного заброса ударника в заднее положение и увеличения области изменения исследуемых основных параметров соотношение площадей в экспериментальном устройстве принять равным $\phi = 3,3$.

На основе принципиальной схемы (рис. 1) была спроектирована [3] машина-стенд для проведения экспериментальных исследований рабочего цикла (запуска, перехода, автономной работы). В результате исследования устройства в режиме запуска определены границы работоспособности (рис. 2) системы пневмозапуска при различных давлениях в магистрали $P_{\text{М}}$ (изб.).

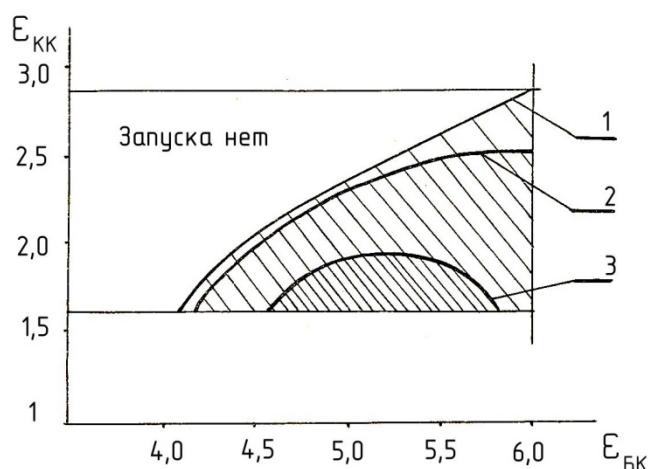


Рис. 2. Границы работоспособности системы пневмозапуска в координатах степени сжатия буферной и кольцевой камер при магистральных давлениях: 1 – $P_{\text{М}}$ (изб.) = 0,6 МПа; 2 – 0,5 МПа; 3 – 0,4 МПа.

Экспериментальные исследования [4] устройства ударного действия внутреннего сгорания на стенде были завершены полевыми испытаниями (рис. 3).



Рис. 3. Забивание стальной трубы в грунт при помощи экспериментального устройства ударного действия внутреннего сгорания с пневмозапуском.

Выводы

1. При общем рассмотрении режимов запуска и работы основными безразмерными параметрами, характеризующими устройство, являются: соотношение площадей со стороны камер обратного и прямого хода, степени сжатия в камерах при крайних положениях ударника и коэффициенты теряемых ходов по атмосферным отверстиям [5].

2. Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается успешным испытанием опытного образца устройства ударного действия внутреннего сгорания в полевых условиях.

3. Предложены новые перспективные принципиальные схемы устройства ударного действия внутреннего сгорания повышенной мощности [6, 7].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Техническая термодинамика/ Под ред.В. И. Крутова. – М.: Высшая школа, 1971.
2. Кошкин В. К., Левин Б. Р. Двигатели со свободно движущимися поршнями. – М.: Машгиз, 1954.
3. Червов В. В. Расчет устройства ударного действия внутреннего сгорания с пневматической системой запуска. Методические указания. – Новосибирск: Изд-во ИГД СО АН СССР, 1986. – 30 с.
4. Костылев А. Д., Червов В. В. Экспериментальное исследование устройства ударного действия внутреннего сгорания // ФТПРПИ. – 1987 - № 6. С. 47 – 51.
5. Червов В. В. Условия запуска устройства ударного действия с камерой сгорания. // ФТПРПИ. – 1986 - № 6. С. 76 – 81.
6. А. с. 1333748 (СССР). Костылев А. Д., Смоляницкий Б.Н., Червов В.В. и Трубицын В.В. Устройство ударного действия для проходки скважин в грунте. – Оpubл. в БИ, 1987, № 32.
7. А. с. 1333739 (СССР). Костылев А. Д., Богинский В. П., Данилов Б. Б., Смоляницкий Б.Н., Сырямин А. Т. и Червов В.В. Устройство ударного действия. – Оpubл. в БИ, 1987, № 32.

© В. В. Червов, И. Е. Иоанов, И. В. Тищенко, А. В. Червов, А. В. Червов, 2026