

УДК 550.834

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КОМПРЕССИОННО-ВАКУУМНОЙ  
УДАРНОЙ МАШИНЫ ДВОЙНОГО ДЕЙСТВИЯ**

**В. В. Тимонин, А. К. Ткачук, В. Н. Карпов**

*Институт горного дела им. Н.А. Чинакала СО РАН, E-mail: timonin@misd.ru,  
Красный проспект, 54, 630091, г. Новосибирск, Россия*

Представлены принципиальная схема компрессионно-вакуумной ударной машины (КВУМ) нового поколения и система управления ее работой с использованием регулируемого магнитного фиксатора, которая позволяет варьировать энергетические показатели машины и обеспечивает расширение ее возможностей в горном деле, строительстве и в сейсморазведке. Приведены результаты экспериментального исследования рабочего цикла КВУМ. Установлены технические параметры машины и принципы взаимодействия магнитного фиксатора, ударника, ресивера и источника рабочей среды. Проведена оценка энергии единичного удара КВУМ при ее различных пространственных положениях. Выполнены натурные испытания, позволившие определить направление дальнейшего развития машин данного класса.

*Компрессионно-вакуумная ударная машина, ударник, корпус, скорость, давление, магнитный фиксатор, пульт управления, сейсморазведка, импульсный источник*

В настоящее время для выявления находящихся под землей залежей полезных ископаемых (руда, вода, углеводороды), пустот, археологических объектов и получения геологической информации для решения инженерных задач широко используются результаты сейсморазведочных исследований, основанных на возбуждении продольных упругих волн искусственным путем. Это позволяет получать данные строения породного массива и является неотъемлемым и сравнительно экономичным методом изучения техногенной среды. Для получения продольных упругих волн применяют сейсмоисточники различных типов [1–5], которые помимо очевидных достоинств обладают такими недостатками, как малая мобильность, невозможность работы в труднодоступных местах, большая масса, высокая стоимость и т. д. С целью их устранения в ИГД СО РАН начиная с 2009 г. разрабатываются и исследуются компрессионно-вакуумные ударные сейсмоисточники [6–10]. Новые компоненты и материалы при их создании (постоянные магниты, пластиковые корпуса, новейшие смазочные материалы, детали из полимерных материалов), а также принципиально иной подход к обеспечению рабочего цикла, заключающийся в использовании постоянных магнитов в качестве коммутационных накопителей энергии рабочей среды, позволяют называть их машинами нового поколения.

Инновационная привлекательность таких ударных машин заключается в надежности, мобильности, более высоком по сравнению с прототипами соотношении величины энергии единичного удара к общей массе установки, относительно небольшой стоимости и простоте исполнения.

Следует отметить, что испытания созданных ударных компрессионно-вакуумных машин показали их недостаточно полное соответствие требованиям проведения сейсморазведочных работ [6, 11, 12]. В первую очередь это относится к фиксированной энергии удара источников

продольных волн. Возможность варьировать энергетическими параметрами КВУМ расширяет диапазон исследуемых глубин и, как следствие, повышает универсальность и эффективность ударных устройств, увеличивая область их применения. Кроме того, опыт использования КВУМ в сейсморазведке (в шахтах, на рудниках и т. д.) позволяет говорить о необходимости создания машин, работающих в любых пространственных положениях.

Для повышения энергетических параметров, надежности и долговечности создана КВУМ-3 [7] с качественно новыми технико-экономическими и технологическими характеристиками, обеспечиваемыми благодаря принципиально новым техническим решениям, заложенным в их конструкцию. Основная задача экспериментальных исследований — определение влияния различных технических параметров КВУМ на энергетические показатели, ключевыми из которых являются энергия единичного удара, время рабочего цикла и длина рабочего хода.

### РАЗРАБОТКА И ЛАБОРАТОРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ КВУМ-3

Принципиальная схема КВУМ-3 представлена на рис. 1.

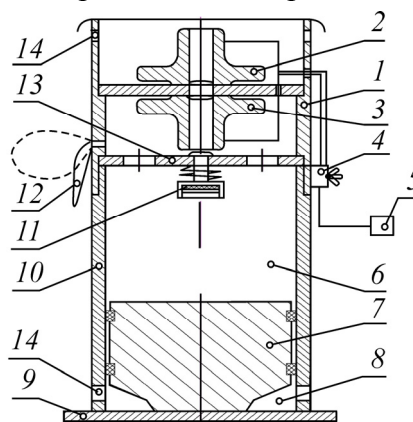


Рис. 1. Схема КВУМ-3: 1 — съемный силовой блок; 2, 3 — верхний и нижний компрессионно-вакуумный механизм; 4 — трехпозиционный переключатель; 5 — источник тока; 6 — камера рабочего хода; 7 — ударник; 8 — нижняя камера; 9 — рабочий инструмент; 10 — корпус; 11 — магнит; 12 — ресивер; 13 — диск; 14 — всасывающие и выхлопные отверстия

Принцип ее работы заключается в следующем. При подаче электроэнергии от источника тока 5 при помощи переключателя 4 и электрической связи включается верхний компрессионно-вакуумный механизм 2, который откачивает воздух из камеры рабочего хода 6 через отверстия 14 в атмосферу. В камере 6 и ресивере 12 создается разрежение воздуха. Поскольку нижняя камера 8 соединена с атмосферой через отверстия 14, ударник 7 начинает движение вверх. В верхнем положении он фиксируется с магнитом 11 и его движение прекращается. Верхний компрессионно-вакуумный механизм 2 выключается трехпозиционным переключателем 4 и включается нижний компрессионно-вакуумный механизм 3 (рабочее давление составляет 0.032 МПа), который увеличивает давление воздуха из атмосферы через отверстия 14 в камеру рабочего хода 6 и ресивер 12. Ударник 7 отрывается от магнита 11 под действием рабочего давления и устремляется вниз под действием силы тяжести и дополнительного воздействия от пневматического компрессионно-вакуумного механизма 3 и ресивера 12. В конце рабочего хода ударник 7 наносит удар по инструменту 9. Далее оператор переводит трехпозиционный переключатель 4 в нейтральное положение и при необходимости повторяет рабочий цикл.

Опытный образец компрессионно-вакуумной ударной машины двойного действия КВУМ-3 со съемным силовым агрегатом работает как от электросети, так и от автономного энергоисточника 12 В — аккумуляторной батареи (АКБ) с инвертором 12-220 В-3000 Вт. Комплектация машины в автономном исполнении представлена на рис. 2.

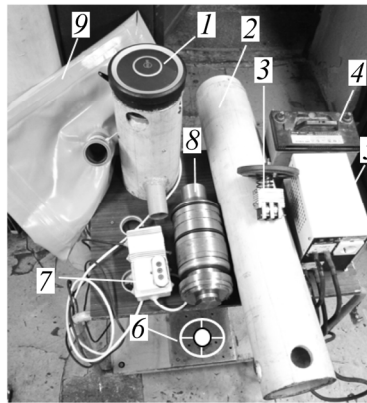


Рис. 2. Комплект КВУМ-3: 1 — съемный силовой блок; 2 — корпус; 3 — модульный магнитный фиксатор; 4 — АКБ 12В; 5 — инвертор 12-220 В-3000 Вт; 6 — подложка; 7 — блок управления с сенсорным переключением рабочего давления воздуха; 8 — составной ударник (12, 19, 23 кг); 9 — ресивер

В ходе лабораторных исследований установлен диапазон длины рабочего хода ударника в направляющей с внутренним диаметром 130 мм, изготовленной из полипропилена с эллипсностью до 1.3 мм, обеспечивающий максимальную предупредную скорость при минимальной длине корпуса машины. Как следует из рис. 3, на котором приведена зависимость изменения скорости ударника от длины рабочего хода, полученная по результатам пяти экспериментов, этот диапазон составляет 700–715 мм. Скорость ударника определялась методом фотосъемки согласно методике [8].

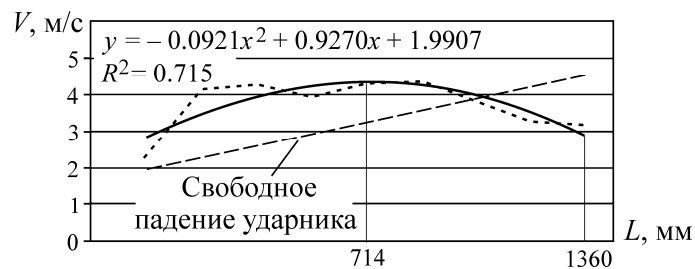


Рис. 3. Зависимость предупредной скорости ударника от длины рабочего хода

Магнитный фиксатор выполнен в виде отдельных магнитных модулей (рис. 4) для изменения усилия отрыва ударника при заданном давлении воздуха путем изменения магнитного поля. Каждый модуль состоит из магнита и магнитопровода. Стальные магнитопроводы создают необходимую контактную площадь сцепления с ударником и защищают магниты от разрушения, т. е. динамическая нагрузка при фиксации ударника приходится на магнитопроводы.

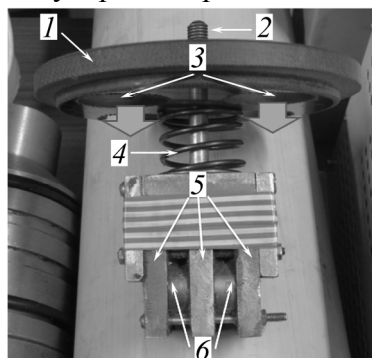


Рис. 4. Модульный магнитный фиксатор: 1 — крепежный диск; 2 — шток; 3 — отверстия для подачи воздуха в рабочую камеру; 4 — демпфер; 5 — магнитопроводы; 6 — магниты

Количество магнитных модулей устанавливается в зависимости от массы ударника, принятого рабочего давления воздуха и заданной предупредной скорости.

Для изменения режима работы КВУМ в ее конструкции применен сенсорный переключатель компрессионного агрегата, размещенный на блоке управления (см. рис. 2). Он обеспечивает три режима работы компрессионно-вакуумного механизма путем варьирования давления в камере рабочего хода ( $P_1 = 0.018$ ,  $P_2 = 0.027$ ,  $P_3 = 0.032$  МПа). Это позволяет задавать предупредную скорость ударника, создавая трехрежимный диапазон энергетического динамического воздействия на подложку, передающей породному массиву импульсные колебания.

Применение в работе КВУМ-3 блока управления совместно с модульным магнитным фиксатором дало возможность в ходе проведения экспериментов изменять предупредную скорость ударника при указанных трех значениях рабочего давления.

В лабораторных условиях (рис. 5) проведены исследования рабочего цикла КВУМ-3, направленные на поддержание постоянного давления воздуха в рабочей камере в течение всего разгона ударника при его прямом ходе. Это реализуется включением в ее конструкцию воздушных ресиверов, установленных в рабочую камеру для получения требуемого расхода энергоносителя. Важной задачей являлось экспериментальное определение оптимального объема ресивера.

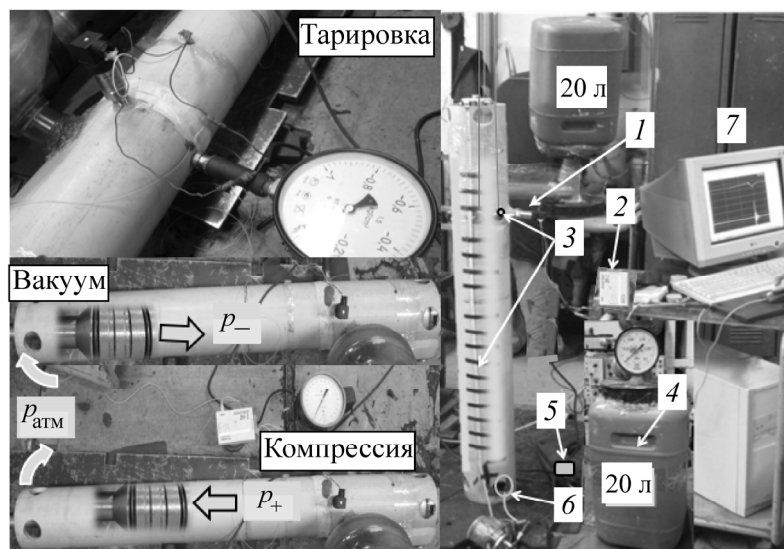


Рис. 5. Измерительный комплект оборудования КВУМ-3: 1 — датчик давления ( $-0.1 \dots +0.5$  МПа); 2 — АЦП; 3 — подвижная метка и шкала перемещения ударника (замеры с высокоскоростной фотокамеры); 4 — ресивер с манометром; 5 — акустический датчик; 6 — датчик перемещения; 7 — компьютер

В результате экспериментов установлено оптимальное отношение объема камеры рабочего хода с ресивером в верхнем положении ударника к начальному объему камеры холостого хода  $2.5 : 1$ . Это отношение позволяет создавать необходимый объем для обеспечения постоянного рабочего давления за счет компенсации перетечек воздуха в камеру холостого хода при использовании съемного ресивера объемом  $0.02 \text{ м}^3$  и массой  $0.3 \text{ кг}$ , что дает возможность без увеличения массы машины увеличить скорость ударника массой  $12 \text{ кг}$  на  $24 \%$  до  $5.8 \text{ м/с}$  при давлении рабочей среды  $0.032 \text{ МПа}$ . На рис. 6 показана зависимость скорости движения ударника от времени с ресивером и без него при давлении  $0.032 \text{ МПа}$ .

На рис. 7 приведена диаграмма рабочего цикла КВУМ-3 (из интерфейса программы Power Graph), где  $t_{x,x}$  — время холостого хода (подъем ударника и его фиксация к магнитному фиксатору);  $t_n$  — время наполнения камеры рабочего хода;  $t_{p,x}$  — время рабочего хода;  $T_{ц}$  — время удар-

ного цикла. Видно, что большую часть времени рабочего цикла машины занимает наполнение камеры рабочего хода  $t_H$  для создания избыточного давления рабочей среды для отрыва ударника от магнитного фиксатора. Это связано с переходом компрессионно-вакуумного механизма (поз. 2, рис. 1) в режим отключения (работа двигателя по инерции), включением компрессионно-вакуумного механизма (поз. 3, рис. 1) и его переходом от режима пуска в номинальный режим.

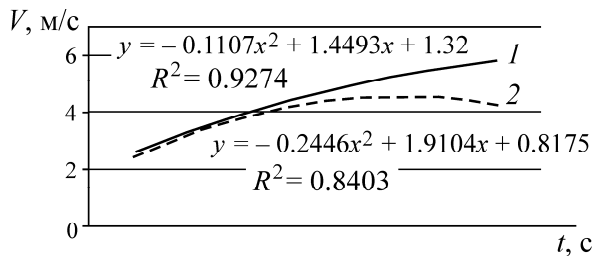


Рис. 6. Скорость движения ударника в корпусе машины: 1 — с ресивером; 2 — без ресивера

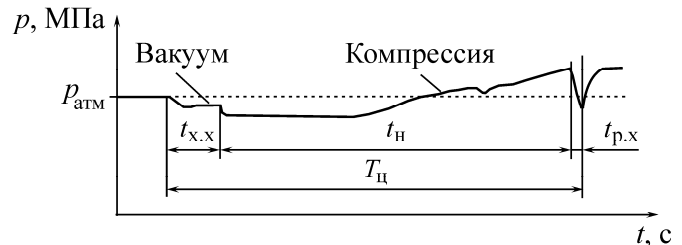


Рис. 7. Диаграмма рабочего цикла КВУМ-3

Поскольку в камере рабочего хода при подъеме ударника невозможно создать разрежение более 0.02 МПа, то при этих условиях время холостого хода машины с массой ударника 12 кг не превышало 1 с (рис. 8), а время между ударными воздействиями не превышало 5 с, что достаточно для приема и обработки сейсмических волн измерительными устройствами.

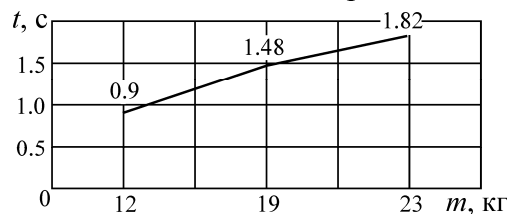


Рис. 8. Зависимость времени холостого хода от массы ударника

Особое внимание при исследовании машины отводилось определению предупредных скоростей ударника при работе в вертикальном и горизонтальном положениях. В ходе экспериментов установлены энергетические параметры машины при эксплуатации с ударником массой 12 кг при максимальном давлении воздуха в камере рабочего хода 0.032 МПа без ресивера в различных направлениях рабочего хода ударника: вертикально вверх 127 Дж; вертикально вниз 201 Дж; горизонтально 228 Дж. При других положениях позиционирования от 0 до 360° предупредные скорости не замерялись.

При рабочем ходе ударника в диапазоне 700–715 мм при использовании магнитного фиксатора, обеспечивающего отрыв ударника при избыточном давлении 0.032 МПа, и съемного ресивера объемом 0.02 м<sup>3</sup> максимальная энергия единичного удара в вертикальном положении при рабочем перемещении ударника вниз составляет 400 Дж.

По результатам лабораторных исследований КВУМ-3 для уменьшения влияния реактивных сил, вызывающих отрыв машины от поверхности породного массива, в нижней ее части был установлен перепускной клапан, обеспечивающий после нанесения удара перетечку рабочей среды в режиме компрессии из рабочей камеры в атмосферу. В режиме работы компрессионно-вакуумного механизма при подъеме ударника клапан герметично закрыт. В зависимости от длины ударника он может перемещаться по высоте корпуса.

Серия натурных испытаний на территории экспериментального участка ИГД СО РАН “Зеленая горка” показала, что КВУМ-3 в автономном исполнении позволяет проводить сейсморазведочные работы в стесненных условиях и на пересеченной местности, а энергии колеброванных единичных ударов без эффекта отскока достаточно для построения геологического разреза в

интервале глубин 50–250 м при использовании ударника массой 12 кг. Время эксплуатации машины с автономным комплектом 12 В (АКБ 75 А/ч) в штатном технологическом процессе при проведении сейсморазведки составляет 90 мин.

#### ВЫВОДЫ

Результаты лабораторных и натурных испытаний опытной КВУМ-3 показали, что:

— разрежение воздуха в камере рабочего хода для перемещения ударника в исходное положение и избыточное давление в ней от 0.018 до 0.032 МПа обеспечивает устойчивую работу машины при любом пространственном положении;

— рекомендуемый диапазон длины рабочего хода составляет 700–715 мм;

— регулируемый модульный магнитный фиксатор и трехрежимный компрессионно-вакуумный механизм дают возможность изменять скорость ударника в диапазоне 3–5.8 м/с;

— использование съемного ресивера объемом 0.02 м<sup>3</sup> увеличивает скорость ударника на 24 %.

Для развития и совершенствования машин нового поколения необходимо решение следующих задач:

— обеспечение работы машины в полуавтоматическом и автоматическом режимах работы;

— разработка регулятора магнитного поля в модульном магнитном фиксаторе, позволяющем регулировать усилие отрыва ударников различных масс при использовании широкого диапазона рабочих давлений;

— увеличение энергии единичного удара;

— предотвращение отскока ударника, “вредного” при проведении сейсморазведочных работ.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Детков В. А.** Возбуждение сейсмических волн импульсными невзрывными источниками // Журн. СФУ. Математика и физика. — 2009. — № 2 (3). — С. 298–304.
2. **Шнеерсон М. Б.** Теория и практика наземной невзрывной сейсморазведки. — М.: Недра, 1998. — 527 с.
3. **Hill I. A.** Field techniques and instrumentation in shallow seismic reflection, Quarterly Journal Engineering Geology, 1992, No. 25. — P. 183–190.
4. **Палагин В. В., Попов А. Я., Дик П. И.** Сейсморазведка малых глубин. — М.: Недра, 1989. — 208 с.
5. **Шериф Р., Гелдарт Л.** Сейсморазведка. — М.: Мир, 1987. — Т. 1. — 448 с.
6. **Репин А. А., Ткачук А. К., Карпов В. Н., Белобородов В. Н., Ярославцев А. Г., Жикин А. А.** Разработка и исследование автономного мобильного компрессионно-вакуумного ударного источника продольных волн для сейсморазведки // ФТПРПИ. — 2016. — № 1. — С. 144–151.
7. **Пат. 156306 РФ.** Компрессионно-вакуумная ударная машина двойного действия / А. А. Репин, В. В. Тимонин, В. Н. Белобородов, А. К. Ткачук, В. Н. Карпов, Г. Г. Васильев, Н. Н. Заболоцкая // Оpubл. в БИ. — 2015. — № 31.
8. **Пат. 127472 РФ.** Стенд для экспериментальных исследований параметров ударных машин / В. Н. Белобородов, А. К. Ткачук // Оpubл. в БИ. — 2013. — № 12.
9. **Пат. 163465 РФ.** Вакуумная машина ударного действия / А. К. Ткачук, Н. Н. Заболоцкая, В. Н. Карпов // Оpubл. в БИ. — 2016. — № 20.
10. **Белобородов В. Н., Репин А. А., Ткачук А. К., Карпов В. Н.** Разработка пневматического устройства с использованием эластичной оболочки // Фундам. и прикл. вопросы горных наук. — Новосибирск: ИГД СО РАН, 2014. — Т. 2. — № 1. — С. 51–53.
11. **Ткачук А. К., Карпов В. Н.** Особенности и перспективы развития компрессионно-вакуумных машин ударного действия // Интерэкспо Гео-Сибирь. — 2016. — Т. 2. — № 4. — С. 37–42.
12. **Репин А. А., Тимонин В. В., Ткачук А. К., Карпов В. Н., Степанов Д. В.** К вопросу создания универсальных компрессионно-вакуумных машин ударного действия // Машиноведение. — Бишкек: ИМаш НАН КР, 2016. — № 1. — Т. 3. — С. 89–94.

Поступила в редакцию 11/1 2016