

УДК 541.126:537.324

## ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ИМПУЛЬСНЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЭНЕРГИИ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКУЮ

Гулевич М.А., Пай В.В., Яковлев И.В.

*Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН, Новосибирск, Россия*

Работа выполнена при частичной поддержке программы Президиума РАН № 2.8  
и гранта Президента РФ №НШ-247.2012.1.

### АННОТАЦИЯ

В данной работе исследуется импульсный преобразователь энергии плазменной струи из ударно-волновой трубки в электрическую, предназначенный для создания детонаторов нового типа. В рамках разработки импульсного источника постоянной готовности были проведены эксперименты по определению механических и тепловых характеристик плазменной струи из ударно-волновой трубки с помощью магни-

динамического датчика. Были установлены оптимальные размеры микротермопарного источника при которых достигаются максимальные значения коэффициентов преобразования энергии струи в электрическую. Предлагаемый импульсный источник постоянной готовности, преобразующий энергию плазменной струи из ударно-волновой трубки в электрическую, мировых аналогов не имеет.

### ВВЕДЕНИЕ

При ведении горных работ важное значение имеет проведение массовых взрывов скважинных зарядов. Точная синхронизация моментов инициирования скважинных зарядов дает возможность экономить расход взрывчатых веществ. Традиционно применяемые в таких работах детонаторы с пиротехническим замедлением, как правило, не обладают необходимой точностью и в последние годы вытесняются детонаторами с электронным замедлением. Такие детонаторы, обладая на порядок более высокой точностью задержки инициирования, позволяют использовать рассредоточенные внутри-скважинные заряды, что снижает на 20% их вес в сравнении с компактными зарядами при сохранении эффективности воздействия [1, 2]. Невзирая на высокую стоимость детонаторов с

электронным замедлением (16-70 \$/шт.), общий экономический эффект при проведении массовых подрывов с их использованием значителен.

Поверхностная разводка сети к детонаторам с электронным замедлением проводится электрической цепью, а к детонаторам с пиротехническим замедлением ударно-волновой трубкой. Применение ударно-волновой трубки во многих случаях предпочтительней из-за большей надежности, помехозащищенности, безопасности, технической и организационной простоты монтажа, низкой цены.

Имея целью использовать преимущества детонаторов с электронным замедлением и разводки ударно-волновой трубкой, необходимо создать детонатор с электронным замедлением, но срабатывающим от ударно-волновой трубки.

### ПАРАМЕТРЫ СТРУИ ИЗ УДАРНО-ВОЛНОВОЙ ТРУБКИ

Ударно-волновая трубка, используемая при разводке взрывных сетей с детонаторами с пиротехническим замедлением, изготовленная из многослойного полимерного материа-

ла, содержит, нанесенный на внутреннюю поверхность мелкодисперсный ТЭН с линейной плотностью ~ 15-17 мг/м длины, средним размером частиц ~ 20 мкм. Самоподдерживаю-

щийся волновой процесс в трубке, изначально возбуждаемый электроискровым источником, в дальнейшем стационарно распространяется со скоростью  $\sim 1.8$  км/с.

Основные характеристики, выходящей из ударно-волновой трубки струи экспериментально определялись с помощью магнитодинамического датчика. Магнитодинамический датчик (рис.1) представляет собой проводящий тонкостенный цилиндр (корпус детонатора) - 1, внутри которого находится цилиндрический магнит - 2, разгоняемый струей горячих газов истекающей из ударно-волновой трубки - 3. В зазоре между стенками цилиндра и магнитом размещалась катушка - 4, ЭДС с которой регистрировалась осциллографом.

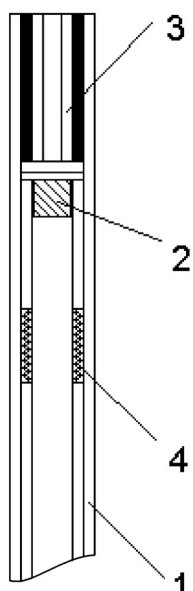


Рис.1 Схема магнитодинамического датчика.

При движении магнита в стенках корпуса детонатора, а также капсулы с инициирующим составом появляются вихревые токи, корректный учет вклада которых в ЭДС индукции, наводимой в катушке, потребовал решения уравнений электродинамики со сложными граничными условиями, учитывающими геометрию всех проводящих элементов конструкции. Для повышения эффективности и уменьшения габаритов датчика использовались неодимсодержащие магниты высокой намагниченности  $\sim 106$  А/м.

На рис.2 приведена осциллограмма зависимости напряжения на катушке, длиной 6 мм, имеющей 380 витков, от времени при движении

магнита диаметром 4 мм, длиной 6 мм. По этой осциллограмме была определена зависимость скорости магнита (рис.3а), а также разгоняющего магнит давления в струе от времени (рис.3б).

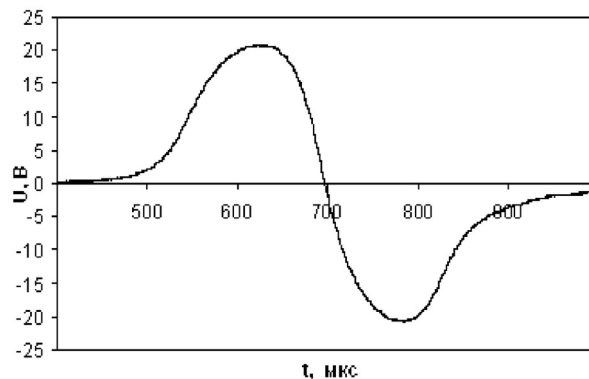


Рис.2 ЭДС индукции при движении магнита.

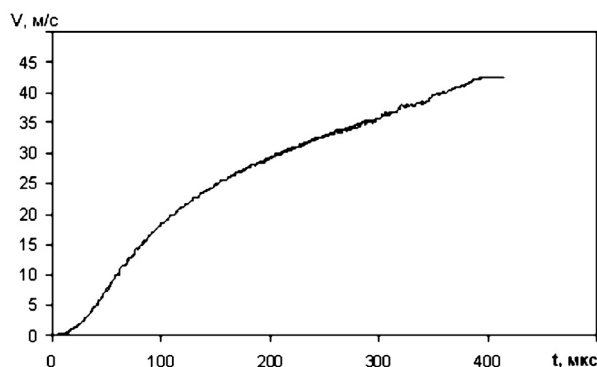


Рис.3а Динамика разгона магнита струей газов из ударно-волновой трубки.

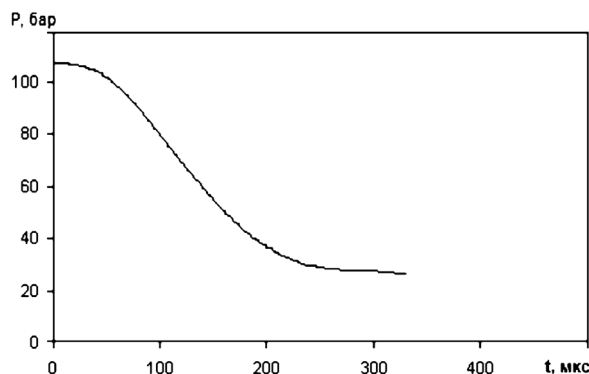


Рис.3б Зависимость давления в струе газов от времени.

Как показали наши эксперименты, истекающая в течение ~ 300-400 мксек струя горячих газов из ударно-волновой трубки создает максимальное давление внутри корпуса детонатора ~12 МПа, имеет энергию ~ 10-15 Дж, импульс ~  $10^{-2}$  кгм/с.

Для замены детонаторов с пиротехническим замедлением на детонаторы с электронным типом замедления необходимо преобразовать часть энергии плазменной струи, выходящей из трубки, в электрическую, чтобы обеспечить работу таймера задержки и последующее инициирование детонатора. Осложняющим обстоятельством

при разработке преобразователя энергии из механической и тепловой в электрическую является ограничение на габариты устройства. Стандартный детонатор имеет строго лимитированные размеры. Поэтому в пространстве, объемом не более двух кубических сантиметров должны быть размещены микроэлектроника таймера задержки инициирования и источник, обеспечивающий их работу энергией. Поэтому предлагается исследовать наиболее адекватный поставленной задаче тип преобразователя, основанный на использовании термоэлектрического эффекта Зеебека.

### ИМПУЛЬСНЫЙ ТЕРМОПАРНЫЙ ИСТОЧНИК

Термопарный источник [3, 4] (рис.4) представляет собой термобатарею из плоских медь-константановых микротермопар (1 - константан, 2 - медь), с характерными размерами ~ 350-500 мкм, размещенных на поверхностях тонких диэлектрических пластин, помещенных в корпус детонатора. Горячие спаи каждой из микротермопар открыты для теплообмена с высокоэнергетическим потоком газов, выходящих из ударно-волновой трубки, а холодные спаи заэкранированы теплоизолирующей полимерной пленкой - 3.

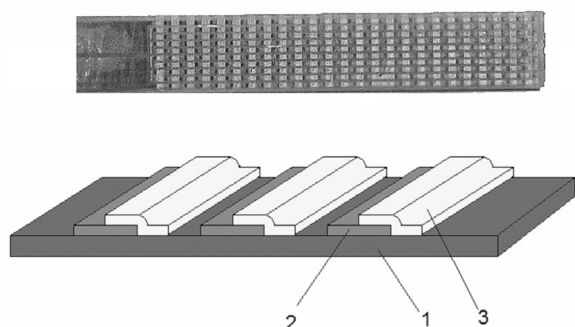


Рис.4 Батарея планарных термопар.

Такая, планарная, конструкция термобатареи обеспечивает как оптимальную экспозицию микротермопар в струе из ударно-волновой трубки, так и минимальное внутреннее сопротивление источника. Время выравнивания температур горячего и холодного спаев определяется геометрией микротермопары и выбирается равным характерному времени ~ 1 мс воздействия горячих газов струи на поверхность термобатареи. Выбор оптимальной геометрии микротермопар и термо-

батареи осуществляется путем совместного численного решения уравнений теплопроводности и электродинамики с учетом термоэлектрического эффекта Зеебека. Физические основы работы импульсных термопар подробно рассмотрены в [5]. Основой термопар служит биметалл медь-константан, полученный или сваркой взрывом с последующей прокаткой до требуемой толщины, или путем гальванического нанесения медного слоя на константановую фольгу. На рис.5 приведены осциллограммы напряжения на элементе термобатареи, содержащем 75 термопар, имеющем внутреннее сопротивление ~ 30 Ом. В корпусе детонатора удастся разместить 10 таких элементов, что при их последовательном соединении позволит обеспечить работу и таймера задержки, и последующий подрыв детонатора.

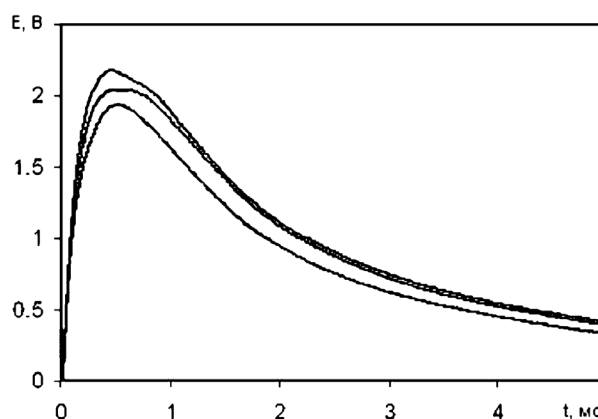


Рис.5 Зависимость термо-ЭДС от времени на термобатарее.

Термопарный источник энергии обладает низким внутренним сопротивлением ~ 300-330

Ом. Такие характеристики источника гарантируют высокую помехозащищенность и надежность детонаторов. Детонатор, запитываемый таким импульсным источником, будет обладать

высокой точностью задержки, безопасностью в применении, так как не будет реагировать на источники энергии с большими характерными временами нарастания мощности.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью магнитодинамического датчика определены механические и тепловые характеристики плазменной струи из ударно-волновой трубки. Проведены предварительные приближенные аналитические и численные расчеты термоэлектрического источника постоянной готовности, преобразующего энергию плазменной струи из ударно-волновой трубки в электрическую. На основе результатов этих расчетов изготовлен работающий макет источника. Были установлены оптимальные размеры микропарного источника при которых достигаются

максимальные значения коэффициентов преобразования энергии струи в электрическую. Анализ полученных на макете первичных экспериментальных данных показывает, что при оптимальных параметрах источника его энергии будет достаточно для запитывания детонатора с электронным замедлением. Термопарный источник энергии обладает низким внутренним сопротивлением ~300-330 Ом и напряжением ~40В. Такие характеристики источника гарантируют высокую помехозащищенность и надежность детонаторов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Горная энциклопедия. – М. : Сов. энцикл. - 1984. - т. 1. - 560 с.
2. Шевкун, Е. Б. Рассредоточение скважинных зарядов пенополистиролом / Е. Б. Шевкун, А. В. Лещинский // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал) - ГИАБ - 2006. - №5. - С. 116-123.
3. Гулевич, М. А. Исследование возможности применения импульсного термопарного преобразователя энергии для инициирования детонации взрывчатых веществ / М. А. Гулевич, В. В. Пай, Т. М. Федотенко, И. В. Яковлев (Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева), А. Г. Игнатенко, В. В. Саяпин (ФГУП «НМЗ Искра») // Тез. докл. Междунар. конф. по физической мезомеханике, компьютерно-
- му конструированию и разработке новых материалов. г. Томск, Россия - 5-9 сентября 2011 г. - С. 456.
4. Федотенко, Т. М. Исследование возможности применения импульсных термопарных источников энергии для инициирования детонации взрывчатых веществ / Федотенко Т. М., Гулевич М. А., Пай В. В., Яковлев И. В., Игнатенко А. Г., Саяпин В. В. // Тез. докл. Междунар. конф. «Лаврентьевские чтения по математике, механике и физике». Новосибирск. - 2010. - С. 235.
5. Кузьмин, Г. Е. . Экспериментально-аналитические методы в задачах динамического нагружения материалов / Кузьмин Г. Е., Пай В. В., Яковлев И. В. // Новосибирск: Изд-во СО РАН - 2002. - 312 с.