

УДК 622.235.431.34:623.454.254.2

Соболев В.В. д.т.н., проф., Ищенко Б.С. аспирант, Куливар В.В. аспирант, Романова А.С., аспирант.

*Государственное ВУЗ «Национальный горный университет», г. Днепр, Украина.*

## **ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОПТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ ИНИЦИИРОВАНИЯ ЗАРЯДОВ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ**

Применяемые в мировой практике взрывного разрушения системы инициирования зарядов взрывчатых веществ имеют ряд недостатков. Так, например, электрическая система инициирования подвержена действию токов утечки, токов, возникающих при розовых разрядах и воздействии электромагнитных излучений. Кроме этого, выпускаемые промышленностью электродетонаторы очень чувствительны к механическим воздействиям, имеют скрытые дефекты и др. Все эти недостатки требуют применения целого ряда мер по их устранению, например проведения дорогостоящих организационных мероприятий, связанных с отключением электрических сетей в период подготовки и проведения взрыва, использования различных технических средств, снижающих вероятность появления в сети опасных электрических потенциалов.

С учетом выше изложенного, используют взрывание детонирующим шнуром. Однако и эта система при известных ее достоинствах не лишена существенных недостатков: невозможность осуществления проверки коммутационной сети, низкая устойчивость к длительному пребыванию в обводненных скважинах, преждевременные взрывы ДШ в процессе монтажа взрывной сети, отказы, связанные с браком при изготовлении ДШ, и невозможность их оперативной проверки для выявления скрытых дефектов.

Шведской компанией «Нитро Нобель» разработана неэлектрическая система инициирования НОНЭЛЬ [1]. Основным элементом этой системы является полый пластиковый шнур, внутренняя поверхность которого покрыта тонким слоем ВВ. Шнур НОНЭЛЬ не возбуждает детонацию ни одного из применяемых на практике видов ВВ, и, как установлено многочисленными опытами, сам не взрывается ни от удара, ни от огня. Для возбуждения детонации в заряде ВВ шнур НОНЭЛЬ соединяется со специальным детонатором. При монтаже сети используются также специальные воспламенители для соединения взрывных сетей отдельных групп зарядов. Несмотря на очевидные преимущества по сравнению с электрической и системой инициирования с помощью ДШ, система НОНЭЛЬ не лишена недостатков: отсутствие контроля надежности монтажа, значительное время распространения ударной волны по шнуру, что увеличивает время взрывания отдельных групп зарядов, и др.

В связи с этим предлагается к разработке оптическая система инициирования (ОПСИН), основными элементами которой являются оптический квантовый генератор (ОКГ), лазер, световодная сеть и оптический детонатор (ОД). Срабатывание детонатора происходит от воздействия лазерного импульса, передаваемого по световодам от ОКГ к светочувствительному взрывчатому составу оптического детонатора.

Исполнительным элементом ОПСИН является оптический детонатор, в котором снаряжается высокочувствительный к лазерному импульсу взрывчатый состав (ВС). Этот состав может быть прикрыт тонкой стеклянной пластинкой, за которой следует пластиковая пробка с введенным в нее световодом. При такой конструкции ОД отсутствует механический контакт между световодом и ВС, что значительно повышает безопасность обращения с ОД по сравнению с ЭД или КД. Основной характеристикой ОД является чувствительность к лазерному импульсу, т.е. к минимально необходимому количеству энергии излучения, вызывающего подрыв светочувствительного ВВ.

В настоящее время исследован ряд ВВ к действию лазерного излучения. Как показали результаты экспериментов, наибольшей чувствительностью обладают азиды свинца и серебра, ТНРС, гремучая ртуть. Критическая плотность энергии зажигания этих веществ находится на уровне  $(1-5) \cdot 10^3 \text{ Дж/м}^2$ . Однако такой уровень чувствительности недостаточно высок, чтобы можно было ставить вопрос о создании промышленной ОПСИН. С этой целью были проведены исследования по разработке высокочувствительных к лазерному излучению взрывчатых составов. В качестве источника излучения использовался твердотельный лазер на стекле, активированном неодимом. Длина волны излучения  $\lambda = 1,06 \text{ мкм}$ , длительность импульса  $t_q = 30 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ . Высокочувствительные к действию излучения взрывчатые составы искали среди различных классов ВВ. В результате были выбраны вещества, которые явились основой разработанных авторами [2] взрывчатых составов, характеризующихся следующими значениями критической плотности энергии инициирования: ВС2-23, ВС7-50, ВС16-120, ВС17-400 Дж/м<sup>2</sup>.

Чувствительность таких ВС к механическим воздействиям не превышает чувствительность тэна. Кроме того, как показали исследования, при механических воздействиях и воздействии открытого огня состав ВС7 не детонирует, а горит. Указанный уровень чувствительности ВС2 и ВС7 к излучению можно считать аномально высоким, поскольку он превышает чувствительность всех известных ВВ на 1–2 порядка. В связи с этим был проведен анализ возможности создания промышленной ОПСИН на базе указанных выше ВВ.

Параметры ОПСИН оценивали, исходя из уровня чувствительности ОД к лазерному моноимпульсу. В работе [3] показано, что критическая плотность энергии лазерного импульса  $W$  (соответствующая 50% вероятности подрыва)

является функцией радиуса светового пучка  $r$ . При уменьшении  $r$  величина  $W$  снижается и при  $r \rightarrow 0$  стремится к некоторому конечному значению. Поэтому следует использовать в ОПСИН узкие лазерные пучки, диаметр которых определяется диаметром сердцевины световода. Однако тонкие световоды не обладают достаточной для ОПСИН прочностью. На практике наиболее целесообразно использовать световолокно с диаметром сердцевины порядка 100 мкм. Эта величина будет использована в оценках параметров ОПСИН. За величину критической плотности энергии инициирования ВС  $E_{кр}$  примем величину, соответствующую составу ВС7 и равную 50 Дж/м<sup>2</sup>. Используя связь  $W(r)$  и  $E_{кр}$ , приведенную в работе (2), получаем в качестве верхнего предела энергии инициирования ОД  $W < 10 \text{ мкДж}$ .

Для передачи излучения от лазера к ОД важнейшим элементом ОПСИН является световодная сеть, которая включает в себя световоды, смонтированные в сеть с помощью разветвителей и соединителей. Основная задача сети – обеспечение малых потерь лазерной энергии при передаче ее на расстояние от нескольких сот метров до нескольких километров.

В качестве материалов для световодов с малыми потерями светового сигнала (0,2–5 дБ/км) используется кварц, для световодов с уровнем потерь (3–10 дБ/км) более дешевый материал – многокомпонентные стекла. Производство полимерных волокон (уровень потерь 100–500 дБ/км) является самым простым и дешевым [4]. Что-бы обеспечить низкую себестоимость производства ОПСИН и приемлемый уровень потерь лазерной энергии, можно использовать многомодовые стеклянные световоды, выпускаемые с большим диаметром сердцевины – 80 – 400 мкм и имеющие повышенную числовую апертуру – 0,3 – 0,6, что обеспечивает эффективное сопряжение одного волокна с другим и с источником излучения.

Оценим, например, во сколько раз ослабляется входной сигнал при прохождении по волокну из стекла длиной 1 км.

Показатель ослабления определяется по формуле, дБ/км,

$$k = (10/l) \cdot \lg(W_{вх}/W_{вых}),$$

где  $W_{вх}, W_{вых}$  – энергия сигнала соответственно на входе и выходе световода;  $l$  – длина пути, км.

Отсюда коэффициент ослабления равен

$$k' = W_{вых}/W_{вх} = 10^{(k \cdot l/10)}.$$

Приняв  $k = 3–10$  дБ/км для световода из многокомпонентного стекла длиной 1 км, получим  $k' = 0,5 – 0,1$ . При длине волокна 0,5 км  $k' = 0,7–0,3$ .

Поскольку в разрабатываемой ОПСИН предполагается использовать твердотельный лазер на неодимовом стекле, работающий в режиме модуляции добротности резонатора (длительность излучения  $(20 – 50) \cdot 10^{-9}$  с), возникает естественный вопрос об оптической стойкости световодов к действию моноимпульса. Известны [5] результаты испытания жгутов световодов к

действию моноимпульса длительностью  $40 \cdot 10^{-9}$  с. Доказано, что их стойкость находится на уровне  $2 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>.

Плотность лазерной энергии на входе световода можно оценить из простого выражения

$$E_s = W/S = 1,3 \cdot 10 \text{ Дж/м}^2,$$

где  $S = 7,85 \cdot 10^{-9}$  м<sup>2</sup> – площадь сердцевины световода.

Учитывая, что световодная сеть имеет коэффициент ослабления порядка 10, на вход световода необходимо подать энергию, на порядок превышающую указанную выше, т. е.  $W \sim 100$  мкДж. Поэтому  $E_b \approx 1,3 \cdot 10^4$  Дж/м<sup>2</sup>

Что значительно ниже оптической прочности жгутовых световодов –  $2,0 \cdot 10^5$  Дж/м<sup>2</sup>.

Для соединения элементов световодных систем требуются простые и надежные соединители волоконных световодов друг с другом и с излучателями. Оптический соединитель представляет собой важный компонент для световодных систем, от уровня разработки которого, зависят предельные возможности и сроки эксплуатации системы.

Разработаны два типа разъемных соединителей. В соединителях первого типа в качестве базовой поверхности, по которой осуществляется центровка, используется поверхность волокна. Такие соединители не нашли широкого применения, так как не обеспечивают прочного соединения в системах, функционирующих длительное время, однако для наших целей также соединители могут быть вполне подходящими. В соединителях второго типа волокно окольцовано армирующим наконечником, обеспечивающим не только соединение световодов, но и надежное их скрепление. Уменьшен уровень потерь при соединении многомодовых световодов – ниже 0,7 дБ.

Необходимым элементом световодной сети являются волоконно-оптические разветвители, предназначенные для деления оптической мощности между двумя или несколькими каналами передачи. К ним также предъявляются требования стабильности параметров надежности и технологичности. Для изготовления ответвителей и разветвителей на основе волоконных световодов широко применяются сплавление, прецизионная механическая обработка и химическое травление с последующим восстановлением оболочки волоконных световодов. Вносимый уровень потерь равен 0,2 – 10 дБ. В данном случае в качестве разветвителя может использоваться световод, состоящий из нескольких жил, сплавленных с одной стороны.

В качестве источника излучения наиболее перспективным представляется использование твердотельного ОКГ на неодимовом стекле или иттриевоалюминиевом гранате, работающего в режиме модуляции добротности резонатора (режим моноимпульса), при котором длительность излучения составляет  $(20 - 50) \cdot 10^{-9}$  с). Выбор этого режима обусловлен тем, что чувствительность ВВ к действию таких коротких импульсов значительно выше, чем при воздействии миллисекундного импульса (режим свободной генерации).

Кроме того, в режиме моноимпульса задержка взрыва (время, отсчитываемое от момента воздействия излучения на ВС до момента начала взрывного превращения ВВ) находится в интервале  $10^{-6} - 10^{-5}$  с. Это говорит о том, что разброс времени подрыва отдельных зарядов не будет превышать  $10^{-5}$  с, т.е. точность времени срабатывания ОД на 2–3 порядка выше, чем при электрическом инициировании ВВ. Основные требования, предъявляемые к ОКГ, следующие: малые массогабаритные характеристики, надежность работы, простота в обращении, многоканальность. Лазер с несколькими каналами (несколько активных элементов) и электронной коммутацией между ними позволяет подрывать отдельные серии зарядов с заданной временной задержкой. В качестве примера приведем оценку энергоемкости ОКГ, способного обеспечить подрыв 500 скважинных зарядов, расположенных на 1 км от него. Энергию срабатывания примем такую же, как и в примере, рассмотренном выше, т.е.  $W = 10$  мкДж. Коэффициент ослабления световой энергии по сети выберем равным  $k' = 0,1$ . Полная энергия определяется выражением

$$W = \frac{W_n}{k'} = \frac{10^{-6} \text{ Дж} \cdot 500}{0,1} = 5 \cdot 10 \text{ Дж} = 50 \text{ мДж},$$

Где  $n$  – число скважин (зарядов).

Лазер с энергией в моноимпульсе  $\sim 50$  мДж, по оценкам авторов, весит не более 10 кг.

В заключение отметим основные достоинства ОПСИН по сравнению с существующими системами инициирования: безопасность при монтаже сети; абсолютная устойчивость к различного рода электромагнитным наводкам; возможность контроля перед взрывом целостности отдельных элементов и сети в целом (эта операция может быть проведена с помощью маломощного лазера непрерывного действия и основана на измерении уровня светового сигнала, отраженного от ВВ оптического детонатора); возможность осуществления одновременного подрыва группы зарядов с временным разбросом  $\sim 1 - 10$  мкс, между группами зарядов – с любым заданным интервалом времени; возможность осуществления подрыва в любом месте скважинного заряда.

Выводы. Приведен анализ возможности построения системы оптического инициирования (ОПСИН) скважинных зарядов В.В. Основными элементами системы являются оптический квантовый генератор, световодная сеть, оптический детонатор. С учетом чувствительности к лазерному моноимпульсу разработанных авторами взрывчатых составов, уровня достижений световолоконной оптики и лазерной техники показана принципиальная возможность создания промышленной ОПСИН.

Установлено, что при ведении взрывных работ на горнорудных предприятиях возможно применение ОПСИН, позволяющей не только повысить безопасность выполнения взрывов, но и эффективно управлять их действием на горную породу.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Густаффсон Р. Шведская техника взрывных работ.– М.: Недра, 1977.–264 с.
2. Чернай А. В., Соболев В. В. Воздействие высоких давлений на материалы.– Киев: ИПМ АНУ, 1993.–С. 165–170.
3. Александров Е. И., Ципилев В. П.// ФГВ.– 1981.–17, № 5. –С. 77–81.
4. Бутусов М. М., Галкин С. Л., Орбинский С. П., Пал Б. П. Волоконная оптика и машиностроение / Под общ. ред. М. М. Бутусова.–Л.: Машиностроение, 1987. .–328 с.
5. Бужинский И. М., Поздняков А. Е., Карманов С. М., Хомяков А. Н.// Оптико-механ. пром-сть.– 1979.–№ 12.– С. 28–30.