

Е. П. Афиногенов, В. С. Комельков, А. П. Кузнецов, П. П. Малюшевский

### НАПРАВЛЕННЫЕ УДАРНЫЕ ВОЛНЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ВЗРЫВОВ. Часть II (ТРИШОКЕР – ГЕНЕРАТОР СХОДЯЩИХСЯ УДАРНЫХ ВОЛН)

*ЭНИН им. Кржижановского, г. Москва,  
Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины,  
просп. Октябрьский, 43-А, г. Николаев, 54018, Украина*

Продолжает оставаться высоким интерес к исследованию принципиально новых способов получения сверхвысоких давлений. Развивается новое направление в науке – физика высоких плотностей энергии, предметом которой является использование ударных волн для создания вещества высокой плотности и способов увеличения параметров ударных волн. Один из таких способов – организация взаимодействия сходящихся ударных волн.

Ранее нами показано [1–3], что коаксиально-цилиндрические и коаксиально-конические плазменные ускорители, снабженные волноводами, генерируют и формируют интенсивные плоские ударные волны, весьма удобные для создания двух- и трех- ударно-волновых сходящихся фронтов.

Были созданы технологические установки, использующие такие ИПУ для интенсификации основного технологического процесса. К таким установкам относится МЭГД-1, предназначенная для диспергирования буровых и высокостойких тиксотропных тампонажных растворов. Высокое качество растворов, приготавливаемых ею, обеспечивается использованием во второй ступени обработки ИПУ, создающих при каждом разряде двухударные системы сходящихся ударных волн. Разрядная камера этой ступени представляет собой два ИПУ коаксиально-конической геометрии, внешний электрод-труба которых образует корпус разрядного отсека. ИПУ установлены так, что между их продольными осями образуется угол  $110^\circ$ , а за торцевыми срезами создается V-образная полость генератора сходящихся ударных волн [4]. Пульпа после первой ступени электроразрядной обработки попадает в камеры второй ступени через кольцевые коллекторы каждого ИПУ и, проходя через каналы разрядных отсеков, генератор сходящихся ударных волн и жесткую решетку-гидродинамический излучатель ультразвуковых колебаний, ее твердая составляющая подвергается сверхтонкому измельчению, и растворы приобретают высокие заданные технологические характеристики.

Однако еще более интересные (и даже уникальные) возможности открываются при использовании трехударных волновых конфигураций.

Известно, что теоретически в момент схлопывания сходящихся ударноволновых фронтов давления, скорость и температура на фронте стремятся к бесконечности. Однако на практике это недостижимо, так как ряд явлений сильно изменяет основные характеристики движения жидкости и играет важную роль вблизи области кумуляции, ограничивая ее. Одним из таких ограничений кумуляции является отклонение от симметрии, то есть неустойчивость сходящейся ударной волны. В этом случае нарушается одновременность прихода волн к центру, что и приводит к разрушению кумуляции.

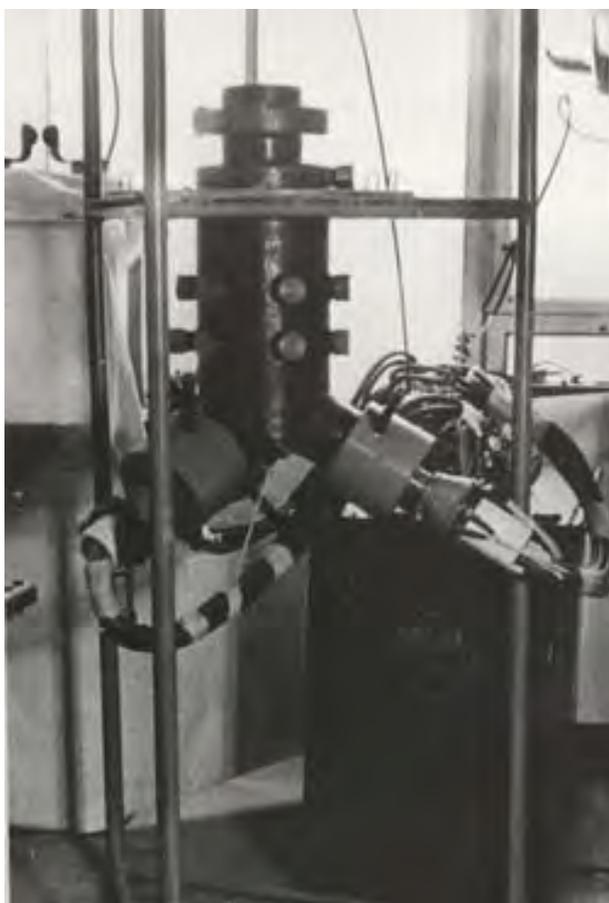
Направленные плоские ударные волны, полученные с помощью ИПУ в жидкости в трехволновой конфигурации, оказались устойчивыми и сравнительно просто синхронизируемыми. Эти особенности были положены в основу созданных тришокеров – электроразрядных генераторов сходящихся ударных волн, два варианта конструкций которых показаны на рис. 1.

Первый вариант (см. рис.1,а) представляет строенный блок плазменных ускорителей типа “рельсотрон”, установленных в диэлектрическом общем корпусе под углом  $120^\circ$  друг к другу и выходящих в акустические каналы длиной 40 мм при длине ускорительной зоны рельсотрона 60 мм. Акус-

стические каналы замыкаются на зону взаимодействия сходящихся ударных волн призматической формы, незамкнутой ударными волнами с торцев. С этих торцев в зону взаимодействия удобно вводить датчики для измерения параметров ударных волн или объекты обработки сходящимися ударными волнами.



*a*



*б*

*Рис. 1. Лабораторные тришокеры: на основе рельсотронов (а), и коаксиально-цилиндрических плазменных ускорителей (б)*

Тришокер на основе рельсотрона позволил получить ранее не наблюдавшееся явление – результат взаимодействия сходящихся ударных волн в воде, выражающееся в аномальных характеристиках излучаемого из зоны взаимодействия акустического импульса и в его расщеплении [5]. Характерная особенность акустического импульса тришокера – высокая амплитуда давления и отсутствие вторичной волны давления, сопровождающей обычные электрические взрывы, и исключительно малая длительность. Такой моноимпульс тришокера является сплошным широкополосным, что позво-

ляет предложить использование системы тришокеров для управления частотной характеристикой генерируемых электровзрывных акустических сигналов. Кроме того, появляется возможность осуществлять эффективную фокусировку ударных волн: в случае периодических ударных волн во всех точках пространства за пределами фокального пятна элементарные волны, приходящие в данную точку от разных частей первичного волнового фронта, гасят друг друга; в случае же однополярной импульсной волны гашения элементарных волн не происходит.

При определенных условиях генерируемый тришоками акустический импульс расщепляется на два: "быстрый" и "медленный", следующие друг за другом с интервалом порядка 100 мкс. При этом амплитуда "быстрого" импульса убывает с расстоянием едва заметно, тогда как амплитуда "медленного" импульса взаимодействия быстро уменьшается (в 3,5 раза на расстоянии 2 м по сравнению с расстоянием 1 м от центра взаимодействия тришоков). Возможно, что природа этого явления – во взаимном отражении ударных волн (на оси тришока), приводящем в узкой области к фазовому переходу или быстрому кавитационному разрыву, генерирующему дополнительную ("медленную") ударную волну. Дополнительная волна несколько размыта в соответствии с конечностью скорости генезиса фазового перехода и, естественно, затухает быстрее.

Второй вариант (см. рис. 1,б) представляет встроенный блок плазменных ускорителей коаксиального типа, установленных в прочном стальном корпусе под углом  $120^{\circ}$  в плане друг к другу и под углом  $110^{\circ}$  к вертикальной продольной оси жесткого акустического канала, продолжающего зону взаимодействия сходящихся ударных волн. Датчики измерения параметров ударных волн помещаются в зону взаимодействия через торец акустического канала, который в свою очередь снабжен рядом радиальных датчиков, установленных по длине прочного корпуса в акустическом канале. Объекты обработки в зону взаимодействия также могут помещаться через торец акустического канала.

Это уникальная установка, вероятно, является первой установкой, которая позволяет получать регулируемые устойчивые плоские сходящиеся ударные волны и сходящиеся высокоскоростные струи жидкости.

На рис. 2 представлены керны различных горных пород, разрушенные в тришокере на характерные мерные куски достаточно строго периодичными поперечными раскольными трещинами в образцах из различных по прочности и структуре природных материалов. Очевидно, в волноводе, продолжающем зону взаимодействия трех ударных волн, устанавливалось сильное импульсное поле давлений-разрежений, что и приводит к разрушениям образцов регулярного вида.



*Рис. 2. Керны из различных горных пород, разрушенные в тришокере*

Предложенные простые конфигурации тришокеров – электроразрядных генераторов сходящихся ударных волн выполняют функции электровзрывных средств преобразования энергии, позволяющих в 6–9 раз увеличить интенсивность ударных волн по сравнению с уровнем давления первичных, получить уникальное средство возбуждения экстремальных параметров среды, существенно расширить технологические возможности электрического взрыва как инструмента воздействия на вещество.

Факт кумуляции для подобных сходящихся ударных волн доказан Л.Д. Ландау и К.П. Станюкович [6]. Сходящаяся в точку волна не обязательно должна быть сферической, а фокусировка может быть и более сложной [7].

В нашем случае – волновая конфигурация в форме трехгранника, в вершинах и ребрах которого могут возникать волны Маха (тришоки) с большим давлением. Разрастаясь, они смыкаются между собой и образуют уже шестигранник, который порождает новые тришоки и так далее, давление на фронте которых непрерывно нарастает при схождении к продольной оси. Теоретически перед фокусировкой интенсивность волн неограниченно растет, хотя различного рода неустойчивости, наличие вязкости и теплопроводности практически ограничивают этот рост так же, как и отклонение от симметрии.

Генерация мощных ударных волн в зоне взаимодействия сходящихся ударных волн позволит развить исследования нелинейных свойств вещества (и особенно мгновенных нелинейностей), физику изменения свойств среды (структуры и фазы, упрочнения-разрушения и т.д.), нелинейную акустику. Изменение характеристик распространяющегося импульса сходящейся ударной волны может позволить получать эффективные показатели адиабаты жидкостей, инициировать новые химические реакции. Через зону взаимодействия ударных волн в тришокерах обрабатываемые материалы могут проходить непрерывно, что позволяет предложить тришокеры в качестве весьма удобного ударно-волнового технологического реактора.

Из изложенного ясно, что создание электровзрывных генераторов сходящихся ударных волн – тришокеров нельзя рассматривать как простую инженерную задачу, связанную с созданием устройств на основе известных принципов. Проблема тришокеров требует исследования большого числа принципиальных проблемных вопросов электро-, плазмо-, гидродинамики и воплощения найденных закономерностей в адекватных конструкциях. Есть основания считать, что создание тришокеров окажет значительное влияние на дальнейшее развитие физики и техники электрического взрыва, а также разрядно-импульсной технологии в целом.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Немировский А.З., Малюшевский П.П., Голубенко Ю.Г.* К выбору эффективного режима плазменного ускорителя в конденсированных средах // Журнал технической физики. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1871–1876.
2. *Малюшевский П.П., Пастухов В.Н., Стрельцов В.А.* Плазменный ускоритель в конденсированной среде // Известия СО АН СССР. Серия технических наук. 1982. № 8. Вып. 2. С. 63–70.
3. *Афиногенов Е.П., Комельков В.С., Малюшевский П.П.* Генерация направленных ударных волн сильноточными импульсными разрядами в жидкости // Электричество. 1992. 12. С. 40–45.
4. *Гаверилов Г.Н., Горovenko Г.Г., Малюшевский П.П., Рябинин А.Г.* Разрядно-импульсная технология обработки минеральных сред. Киев, 1979.
5. *Малюшевский П.П., Петюр Л.Г., Катаев Н.М.* Некоторые аномальные характеристики акустического импульса, излучаемого из области взаимодействия трех сходящихся ударных волн // Электронная обработка материалов. 1996. № 2–3. С. 40–42.
6. *Ландау Л.Д., Станюкович К.П.* Об изучении детонации конденсированных ВВ // ДАН СССР. 1945. Т. 46. № 9. С. 399–402.
7. *Забабахин Е.И., Забабахин И.Е.* Явления неограниченной кумуляции. М., 1988.

*Поступила 11.11.02*

## Summary

The new electroexplosive means of transformation (conversion) of energy operating a principle of interplay of two and three shockwaves ("trishocker") in a condensed medium are described. Some experimental data about parameters of power pulse devices constructed on a principle of interplay of three concurrent shockwaves in a liquid are resulted.