

На правах рукописи

Сластенко Владимир Константинович

**ПРИМЕНЕНИЕ ЩАДЯЩЕГО ВЗРЫВАНИЯ  
ПРИ УСТРОЙСТВЕ ОСНОВАНИЙ, ФУНДАМЕНТОВ ЗДАНИЙ  
И ВОЗВЕДЕНИИ СООРУЖЕНИЙ**

05.23.02 – Основания и фундаменты, подземные сооружения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Санкт-Петербург

2003

Работа выполнена в Санкт-Петербургском государственном  
политехническом университете

Научный руководитель: академик РАН, доктор технических наук,  
профессор Ю.С. Васильев

Научный консультант: доктор технических наук, профессор  
А.К.Бугров

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор А.Л.Гольдин

кандидат технических наук, профессор В.И.Телешев

Ведущая организация : ГУП «Ленгидроэнергоспецстрой»

Защита диссертации состоится “10” июня 2003 г. в 16 часов на заседании  
диссертационного совета Д 212. 229. 15 Санкт-Петербургского  
государственного политехнического университета по адресу: 195251, Санкт-  
Петербург, Политехническая ул., д. 29, ПГК, а.411.

Автореферат разослан “29” апреля 2003 г.

Учёный секретарь диссертационного совета  
доктор технических наук, профессор

А.Е. Андреев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность темы

В настоящее время положение в области промышленно-гражданского и гидротехнического строительства характеризуется значительным возрастанием объемов реконструкции зданий и инженерных сооружений и одновременно заметным ростом объемов нового строительства.

Наметившаяся тенденция изменения районов размещения объектов крупного гидротехнического и энергетического строительства, перемещение строительства этих объектов в регионы Севера и Сибири требуют внедрения нетрадиционных технологий, в частности новых эффективных и одновременно щадящих технологий разрушения прочных скальных и мерзлых грунтов. Чрезвычайно актуально применение технологий осторожного взрывания в условиях плотной городской застройки. Здесь наиболее сложные задачи приходится решать при реконструкции уже деформированных зданий и инженерных сооружений.

Обоснование новых технологий разработки котлованов, устройства оснований, разного рода траншей для прокладки коммуникаций в скальных и мерзлых породах, проходки подземных выработок при строительстве метро и коллекторных тоннелей, а также эффективных методов разрушения и ликвидации старых бетонных и железобетонных конструкций, в том числе фундаментов, является актуальной задачей. При этом необходимо более глубоко и детально исследовать процессы разрушения горных пород и грунтов, формирование и распространение волн напряжений при взрыве зарядов из существенно различных типов взрывчатых веществ (ВВ), включая пиротехнические газогенерирующие составы, обеспечивающих квазистатический характер нагружения полости зарядной камеры с образованием экологически чистых продуктов взрыва при реализации осторожного разрушения породы или конструкции. Изложенное определяет актуальность темы диссертации.

### Цель и задачи диссертации

Основной целью работы является совершенствование существующих и разработка новых технологий щадящего (осторожного) разрушения горных пород, грунтов и искусственных массивов для повышения эффективности и безопасности (в том числе экологической) производства взрывных работ в строительстве, в первую очередь при сооружении и реконструкции гидротехнических и энергетических объектов с большими объемами подготовки оснований, устройства котлованов, траншей, подземных выработок с обеспечением «гладких» поверхностей выработок, максимально близких к проектным контурам, а также при уплотнении и упрочнении оснований с использованием энергии взрыва.

Для достижения этой цели были поставлены следующие задачи:

- экспериментально исследовать напряженное состояние при взрыве и установить критериальные значения напряжений и скоростей, обеспечивающие безразлетное разрушение горных пород и искусственных массивов при минимизации сейсмозрывных и ударновоздушных волн (СВВ, УВВ);
- усовершенствовать методику расчета параметров волн напряжений для зарядов цилиндрической формы с водяными и воздушными радиальными зазорами;
- обосновать эффективную и экологически чистую технологию щадящего взрывания для разрушения горных пород, грунтов и искусственных массивов при подготовке оснований и устройстве фундаментов в промышленно-гражданском и гидротехническом строительстве.

При выполнении работы использовался комплексный метод исследования, включающий анализ и обобщение данных теории и практики безразлетного и осторожного взрывания, экспериментальное исследование разрушения твердых сред при взрыве, математическое моделирование амплитудно-временных параметров волн напряжений.

Научная новизна работы состоит:

1. В обосновании концепции осторожного разрушения горных пород, а также искусственных материалов (бетон, кирпич и др.) при минимизации энергозатрат на разрушение.
2. В экспериментальном исследовании режима изменения напряжений в породе при взрыве заряда ВВ – в результате впервые зарегистрировано формирование в породе полчкообразного импульса напряжения, отражающего квазистатический характер нагружения полости зарядной камеры взрывом заряда малоплотного ВВ.
3. В установлении критериальных инвариантных значений скоростей, при которых происходит процесс дезинтеграции горных пород, искусственных материалов без разлета их отдельных частей.
4. В разработке методики расчета параметров волн напряжений в однородных и слоистых средах (грунт, бетон и др.), имеющих трещины и границы раздела между слоями.
5. В разработке методики расчета параметров буровзрывных работ для щадящего взрывания горных пород и искусственных массивов при разработке выемок, котлованов и подземных выработок заданного профиля, при усилении оснований и устройстве фундаментов.

Практическая ценность и реализация работы

- Разработан новый эффективный и безопасный способ щадящего (осторожного) взрывания с использованием малоплотных ВВ и газогенерирующих пиропатронов, исключая формирование интенсивных УВВ и СВВ.

- Разработана инженерная методика расчета параметров буровзрывных работ при осторожном взрывании горных пород, мерзлых и скальных грунтов оснований, элементов старых фундаментов и кладок в процессе нового строительства и реконструкции гидротехнических, промышленных сооружений, жилых и общественных зданий в районах плотной застройки.
- Усовершенствованы способы предварительного раскола естественных и искусственных материалов фундаментов, бетонных и железобетонных плит, кирпичных и бутовых кладок на основе использования малоплотных ВВ и шнуровых осесимметричных зарядов специальных конструкций, благодаря чему обеспечивается направленный раскол и целостность охраняемой части реконструируемого объекта.

Полученные результаты используются в Санкт-Петербурге, Ленинградской области и в Северо-Западном регионе при строительстве и реконструкции гидротехнических объектов, при подготовке оснований и устройстве фундаментов различных зданий и инженерных сооружений, при сооружении стволов и тоннелей метро и коллекторных тоннелей города, а также при прокладке различных коммуникаций в зонах плотной застройки, реставрации мостов и архитектурных памятников. Кроме того, результаты исследований могут быть использованы при чтении курсов лекций по дисциплинам «Основания и фундаменты», «Подземные сооружения», при подготовке инженеров-строителей.

Достоверность и обоснованность научных положений, выводов и рекомендаций подтверждается адекватностью модели осторожного разрушения естественных и искусственных массивов реальным процессам, в них протекающим, удовлетворительной сходимостью численных расчетов параметров волн напряжений с измеренными в опытах, а также положительными результатами внедрения исследований в производство.

Защищаемые научные положения, сформулированные в работе:

- установлено, что управление газодинамическими процессами в полости зарядной камеры можно осуществлять путем изменения плотности взрывчатых веществ, режимов взрывчатого превращения и использованием конструкций зарядов с воздушными, водяными радиальными зазорами и полостями;
- установлено экспериментально, что при взрыве заряда малоплотного ВВ нагружение полости зарядной камеры носит квазистатический характер при формировании в породе полочкообразного импульса напряжения;
- показано, что осторожное взрывание при разрушении грунтов оснований, материала фундаментов зданий и инженерных сооружений обеспечивается при значении массовой скорости на границе раздела (в пределах длины Л.Н.С.), равной 2 м/с;

- предложен метод расчета параметров волн напряжений в горной породе и искусственном материале при взрыве и параметров БВР, позволяющий прогнозировать разрушение при минимальных энергозатратах.

#### Апробация работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на Международном горно-геологическом форуме «Минерально-сырьевые ресурсы стран СНГ» (г. Санкт-Петербург, 1999 г.), на 4-ой (23-27 июня 1999 г.) и 6-ой (11-16 июня 2001 г.) Международных конференциях «Экология и развитие Северо-Запада России», Международной конференции «Взрывное дело» 2002 г. (г. Москва) и др. Работа докладывалась в СПбГПУ на расширенном заседании кафедры ПСОиФ.

#### Публикации

Основное содержание диссертации опубликовано в 5 печатных работах.

#### Структура и объем диссертационной работы

Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных выводов, изложенных на 130 страницах, содержит 30 рисунков, 5 таблиц и список литературы из 111 наименований.

Во введении приводится общая характеристика работы, обосновывается ее актуальность, излагаются цель работы и задачи исследования, научная новизна и защищаемые научные положения, практическая ценность и реализация результатов исследования.

В главе 1 дан обзор и анализ технологий буровзрывных работ при строительстве и реконструкции промышленно-гражданских и гидротехнических сооружений.

Приводится современное состояние вопроса о действии взрыва в сплошной среде и принципы расчета зарядов, а также пути снижения вредного действия взрыва при осторожном взрывании и направленном расколе породы, бетона и пр.

В главе 2 приведены методика и результаты физического моделирования волн напряжений и действия взрыва в грунтах, горных породах и искусственных массивах.

Глава 3 посвящена разработке методики расчета массы зарядов при щадящем взрывании. Дан краткий обзор методов расчета массы зарядов дробления и выброса. Сформулированы основные положения методики расчета массы зарядов ВВ и параметров БВР при осторожном взрывании.

В главе 4 дан анализ современного состояния технологии осторожного взрывания на объектах промышленно-гражданского и гидротехнического строительства. Приводятся методика и результаты экспериментального исследования эффекта газогенерации и его применения для осторожного дробления пород, грунтов и отдельных конструкций. Предложены пути совершенствования технологии осторожного взрывания

при применении гидровзрывного способа разрушения горных пород и фундаментов.

В главе 5 предложена методика расчета параметров БВР при щадящем взрывании на основе использования малоплотных зарядов и различных пиротехнических составов применительно к подготовке и устройству оснований и фундаментов в промышленно-гражданском и гидротехническом строительстве. Приводятся результаты промышленной апробации технологии щадящего взрывания, дана оценка эффективности и экологической безопасности ее применения.

Завершается диссертация основными выводами по работе.

## РАЗВЕРНУТОЕ СОДЕРЖАНИЕ ГЛАВ ДИССЕРТАЦИИ

В настоящее время при строительстве и реконструкции промышленно-гражданских и гидротехнических сооружений буровзрывные работы получили широкое применение. С использованием БВР осуществляется разработка открытых котлованов, карьеров, траншей, устройство подземных сооружений (гидротехнические туннели, подземные ГЭС, ГАЭС), подготовка и устройство оснований, включая их уплотнение с применением взрывов, создание камуфлетных полостей буровых свай, разрушение старых конструкций фундаментов при реконструкционных работах и др.

При наличии в основании толщи обводненных песчаных, супесчаных или глинистых грунтов вместо традиционного устройства свайных или глубокозаложенных фундаментов весьма эффективным является способ уплотнения этих грунтов энергией взрывов ВВ с последующим устройством фундаментов мелкого заложения.

Разработка методов и технологий взрывания при разрушении естественных и искусственных массивов базируется в основном на трудах отечественных ученых, внесших большой вклад в исследование режимов взрывчатого превращения ВВ и пиротехнических составов, а также сопутствующих им явлений, происходящих при разрушении горных пород и грунтов. Указанные вопросы освещены в работах академиков М.А.Садовского, Е.И.Шемякина, Г.И.Покровского, Ф.А.Баума, С.С.Григоряна, В.М.Гоголева, В.Н.Родионова, члена-корреспондента РАН В.В.Адушкина, профессоров В.С.Никифоровского, А.А.Вовка, Э.И.Ефремова, В.М.Комира, М.Ф.Друкованного, В.Н.Мосница, Б.Н.Кутузова, Г.П.Демидюка, В.А.Падукова, В.А.Боровикова, А.Л.Исакова и многих других.

В области применения взрывов для уплотнения несвязных и малосвязных водонасыщенных грунтов фундаментальные разработки были выполнены (1950-1985 гг.) в ЛПИ (СПбГПУ) на кафедре «Подземные

сооружения, основания и фундаменты» (В.А.Флорин, П.Л.Иванов, А.П.Крутов, Г.Т.Трунков, В.А.Поспелов, Л.Ш.Горелик и др.). Наиболее крупномасштабное применение метода взрывов было осуществлено на комплексе защитных сооружений (КЗС) Петербурга от наводнений. Здесь в 1987-1988 гг. было уплотнено  $\sim 5$  млн.м<sup>3</sup> грунта (П.Л.Иванов, А.П.Крутов, О.П.Минаев и др.).

Для эффективного уплотнения и усиления связных водонасыщенных грунтов был рекомендован (Е.Дембицкий) способ взрывания удлиненных зарядов для создания свай-дрен из песчаного грунта. Для определения параметров способа предложены эмпирические зависимости и дана оценка эффективности усиления слабого основания сваями-дренами (П.Л.Иванов, А.К.Бугров, Р.Имиолек).

При строительстве и реконструкции зданий, инженерных сооружений, прокладке различных коммуникаций в условиях плотной застройки весьма актуальны вопросы эффективности и безопасности взрывных работ и, в определенном смысле, они находятся в противоречии между собой. Повышение эффективности разрушения за счет мощности взрыва, как правило, сопровождается ростом дальности разлета осколков и интенсивности УВВ и СВВ. Для снижения вредного действия взрыва предложены и продолжают разрабатываться технологии щадящего взрывания.

Начало исследований методов осторожного взрывания относится к концу пятидесятых годов, когда по инициативе А.Н.Ханукаева, при участии ряда специалистов Санкт-Петербургского государственного горного института, представителей Санкт-Петербургского государственного университета К.И. Огурцова и Д.Н.Климовой, и ряда специалистов из в/ч – Е.И.Шемякина, В.М.Гоголева, В.Г.Мыркина и других, был создан творческий коллектив, внесший большой вклад в установление закономерностей формирования и распространения сейсмозрывных волн при химических и ядерных взрывах в горных породах. Наибольший вклад в решение этой проблемы в теоретическом плане внесли академик Е.И.Шемякин и проф. В.М.Гоголев, а применительно к прикладным задачам горного дела проф. А.Н.Ханукаев и В.А.Боровиков. Параллельно накоплению экспериментальных данных о параметрах волн напряжений в ближней, средней и дальней зонах взрыва шла поэтапная разработка численного метода расчета для цилиндрических зарядов с осевой симметрией, широко используемых в производственной практике.

Наряду с использованием способа осторожного взрывания в диссертации для сравнения приведены результаты применения ранее известных альтернативных способов, таких, как гидровзрывной - безразлетный способ взрывания, способ направленного раскола зарядами, использующими принцип дефлаграционного превращения аммиачной



селитры, вызванного маломощным импульсом от детонирующего шнура. Также анализируются способы щадящего взрывания конструкциями зарядов с воздушными зазорами, полостями и промежутками.

В современном ассортименте промышленных ВВ, используемых в горном деле и строительстве, значительное место занимают порошкообразные и гранулированные ВВ типа аммонитов и гранулитов с насыпной плотностью близкой к  $0,9 \text{ г/см}^3$ . Наряду с ними в перечне ВВ широко представлены высокоплотные ВВ типа гранулола и алюмотола, горячельющихся и водоэмульсионных ВВ, плотность которых составляет  $1,2-1,5 \text{ г/см}^3$ . Кроме того, в этот список входят низкоплотные (от  $0,1$  до  $0,5 \text{ г/см}^3$ ) взрывчатые составы типа ФПА-1 и ФП. Характерной особенностью низкоплотных ВВ является невысокая объемная концентрация энергии в зарядной камере и низкая скорость детонации, около  $2000 \text{ м/с}$ . Благодаря этому малоплотные ВВ применяются для щадящего взрывания, специфика которого заключается в наиболее эффективном использовании потенциальной энергии заряда на полезные формы работы: направленный раскол и заданную интенсивность разрушения при минимизации диссипативных потерь и вредного действия взрыва, проявляющегося в виде СВВ, УВВ, а также в виде разлета осколков и нерациональных подвижек отбитой части массива.

Известно, что дробление и направленный раскол в значительной мере обусловлены волновыми процессами, протекающими во взрываемом массиве. Поэтому исследованию закономерностей формирования и распространения волн напряжений в последние годы уделяется большое внимание. При этом следует заметить, что для традиционно применяемых в мировой практике промышленных ВВ такие сведения практически отсутствуют.

В связи с этим были проведены экспериментальные исследования и ниже приводятся результаты, полученные в полигонных условиях при взрывании малоплотного ( $0,5 \text{ г/см}^3$ ) гранулита ПЖ. В качестве модельной среды использовался бетон марки 300, плотность которого составляла  $2,2 - 2,3 \text{ г/см}^3$  при средней скорости распространения звука  $3500 \text{ м/с}$ . Крупномасштабные модели готовились путем заливки раствора в опалубку прямоугольной формы с размерами граней  $1 \times 1 \times 1 \text{ м}$ . В центре модели формировалось цилиндрическое отверстие-шпур диаметром  $0,04 \text{ м}$  и глубиной  $0,7 \text{ м}$ . Длина заряда в шпуре составляла  $0,5 \text{ м}$  при массе заряда  $200 \text{ г}$ . Инициирование взрыва гранулита ПЖ осуществлялось стандартным электродетонатором с промежуточным зарядом из пластифицированного вторичного иницирующего ВВ, сформированного в виде шайбы, перекрывающей поперечное сечение шпура. Остальная часть шпура заполнялась забойкой. Во всех опытах применялось прямое инициирование взрыва.

В первой серии экспериментов использовались блоки объемом  $1 \text{ м}^3$  с замурованными в них датчиками давления, расположенными на строго фиксированных расстояниях от эпицентра взрыва. На рис. 1 показана схема разреза модели, а также направление детонационной волны и пути пробега волны напряжений до датчиков. На рис. 2 приведена схема измерительного комплекса, состоящего из предусилителя типа ЗПУ-5П с большим входным сопротивлением и коэффициентом усиления  $K_{ус} = 5$ , пьезоэлектрических преобразователей-датчиков давления (ПД) и кабельной линии.

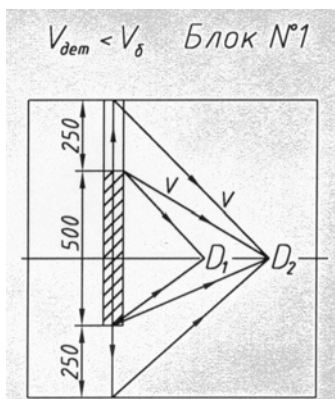


Рис. 1. Схема разреза модели и пробега волны напряжений от заряда до датчиков (Д1 и Д2)

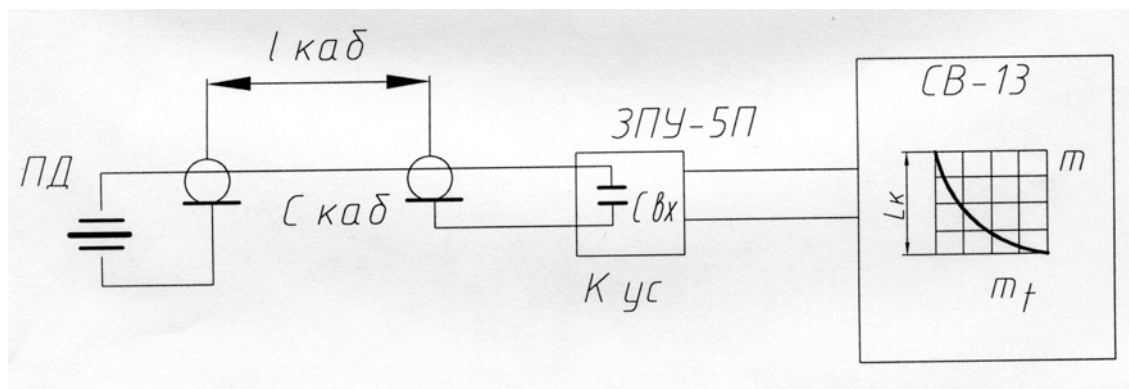


Рис. 2. Схема измерительного комплекса  
ПД – пьезоэлектрический датчик, ЗПУ – предусилитель, СВ - осциллограф

Сигнал поступал на запоминающий осциллограф СВ-13 и фотографировался (рис. 3). Строгая калибровка обеспечивала высокую степень точности регистрации и определение амплитудно-временных параметров волновых импульсов.

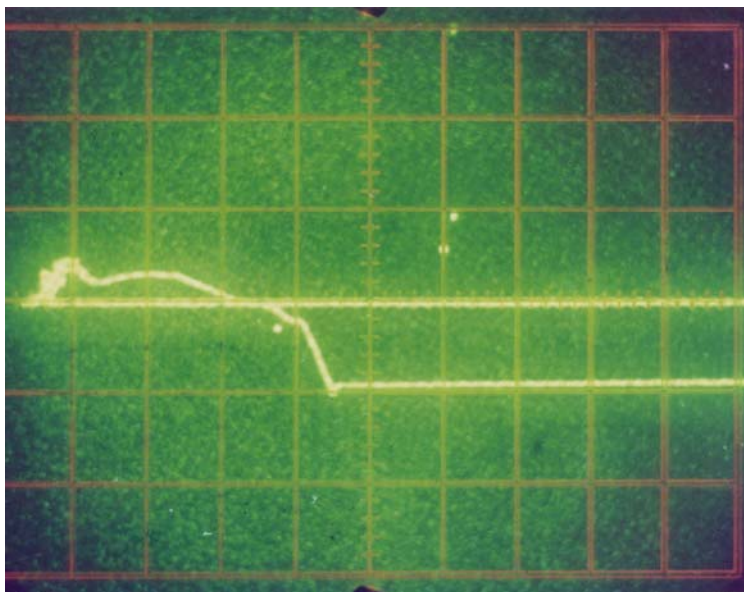


Рис. 3. Типичная осциллограмма время - напряжение при взрыве гранулита ПЖ

В случае взрыва блока  $V = 1 \text{ м}^3$  значение радиальной компоненты напряжения, замеренное на расстоянии 20 см от заряда, составило  $\sigma_{r1} = 116 \text{ МПа}$ , а на расстоянии 40 см -  $\sigma_{r2} = 53 \text{ МПа}$ . При взрывании второго бетонного блока  $V = 1 \text{ м}^3$  с аналогичными параметрами расположения заряда и пьезодатчиков были получены близкие результаты  $\sigma_{r1} = 123 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_{r2} = 44 \text{ МПа}$ .

Зарегистрированные длительности положительных фаз волн напряжений достигают 200 мкс и в диапазоне расстояния 20-40 см от заряда отличаются незначительно.

Результаты обработки осциллограмм и анализ записей изменения напряжения во времени позволили четко выделить на эюре амплитуду и характер действия промежуточного детонатора и основного заряда малоплотного ВВ. При этом во всех случаях прослеживалось формирование в породе полочкообразного импульса, отражающего квазистатический режим нагружения полости зарядной камеры (см. рис. 3). Такой характер нагружения твердых сред взрывом экспериментально зарегистрирован впервые. Достоверность этого факта была подтверждена дополнительной серией опытов.

В диссертационной работе приведены методика численного расчета параметров волны напряжений для цилиндрических зарядов, разработанная к.т.н. Т.В.Стойковой. Расчеты параметров волн напряжений по указанной методике удовлетворительно согласуются с результатами приведенных выше экспериментов.

Сопоставление параметров волн напряжений с расчетными для традиционных ВВ позволило констатировать факт снижения амплитудно-временных характеристик при использовании малоплотных ВВ. Анализ полученных результатов показал, что при применении малоплотных ВВ ( $\rho_{ВВ} = 0,5 \text{ г/см}^3$ ) амплитуда волны напряжения уменьшается в два и более раза, и сохраняется на этом уровне значительное время. Реализующийся в данном случае характер взрывного нагружения приближается к квазистатическому, а эпюра напряжение-время имеет форму полочки с последующим более низким градиентом затухания, в отличие от экспоненциального спада, характерного для взрыва бризантных ВВ. Очевидно, что именно такой характер нагружения целесообразно осуществлять при щадящем взрывании, так как пропорционально амплитудам волн напряжений снижаются и интенсивность СВВ. Кроме того, использование малоплотных ВВ уменьшает на порядок давление в полости зарядной камеры, что позволяет существенно снизить интенсивность УВВ и разлет осколков.

Установленные эффекты имеют большое практическое значение, особенно, при щадящем взрывании в условиях кессонных камер, искусственно замороженных грунтов или вблизи особо важных объектов, динамическое действие взрыва на которые недопустимо.

Проведенные на карьерах Ленинградской области промышленные испытания малоплотных ВВ для осторожного дробления негабарита и выколки камнеблоков заданных габаритов подтвердили принципиальную возможность их использования в этих целях. При этом после распиловки блоков получались плиты высокого качества, не имеющие волосных трещин. При дроблении негабарита разрушение происходило на несколько отдельностей при низкой интенсивности СВВ и разлете небольшого числа мелких осколков на расстояние не более 12-15 м.

Анализ проведенных расчетов и предварительных экспериментальных данных позволил сделать вывод: при условии реализации массовой скорости менее 2 м/с на границе раздела ЛНС порядка  $60 R_{03}$  ( $R_{03}$  – радиус заряда) разрушенная горная масса фактически остается на месте.

Наличие в массивах горных пород, в основаниях слоев сред с различной акустической жесткостью, трещин и протяженных щелей существенно влияет на параметры волн напряжений, протяженность зон разрушения и дробления. По изложенной выше для однородной сплошной среды методике выполнена серия экспериментов на слоистых моделях. Установлено, что при преломлении волны напряжений из горной породы в рыхлый грунт имеет место скачкообразное снижение скорости смещения. При этом в слоистых породах с заполнением трещин водой закономерность изменения скорости смещения близка к закономерности для монолитных горных пород.

Эффективность применения взрывов при разрушении грунтов, горных пород и различных материалов и конструкций определяется достоверной оценкой необходимой массы заряда ВВ. Современный метод расчета величины заряда ВВ, основывается на волновой гипотезе разрушения горных пород, предложенной проф. А.Н.Ханукаевым.

Выполненный в диссертации анализ методов расчета массы заряда ВВ позволил сделать заключение, что для технологии щадящего взрывания целесообразно использовать принцип расчета зарядов рыхления, минимизирующего затраты энергии взрыва на выброс и перемещение породы, и схему расчета проф. А.Н.Ханукаева

При рыхлении горных пород и фундаментов из различных материалов шпуровыми и скважинными зарядами главными параметрами являются ЛНС, размеры сетки шпуров и скважин “а” и “в”, характеризующейся коэффициентом сближения зарядов  $m = a/v$ .

Принцип расчета ЛНС и сетки расположения зарядов сводится к формированию зоны разрушения в объеме воронки взрыва, благодаря слиянию зоны трещинообразования и зоны откола, вызванной действием волны разряжения (рис.4).

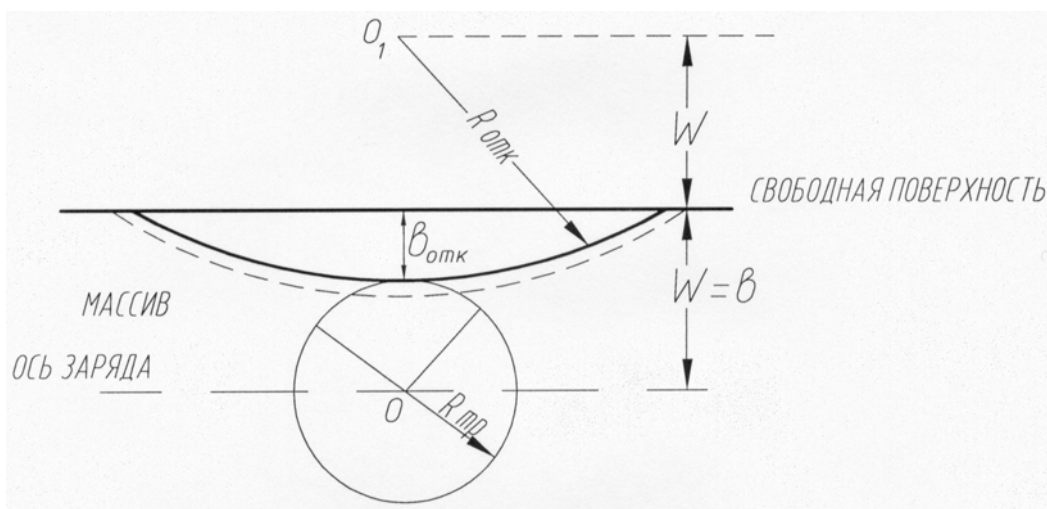


Рис.4. Схема формирования воронки взрыва

Условие формирования воронки взрыва в объеме ЛНС –  $W$  с достаточной для практики точностью, может быть записано в виде:

$$W = \frac{1}{2}(R_{тр} + R_{отк}), \quad (1)$$

где  $R_{тр}$ ,  $R_{отк}$  – размеры (радиусы) зон трещинообразования и откола.

Учитывая результаты экспериментов, принимается, что трещинообразование происходит за счет действия тангенциальной составляющей волны напряжений  $\sigma_\varphi$ , а откол происходит под действием радиальной компоненты волны напряжений  $\sigma_r$ , отраженной от свободной

поверхности. При аппроксимации максимальных значений радиальной и тангенциальной компонент зависимостями

$$\sigma_{r\_max} = 545 \cdot \rho_n \cdot c_n / r^{1,1} ; \sigma_{\varphi\_max} = (c_1 + c_2 \cdot r) \sigma_{r\_max} , \quad (2)$$

в которых:  $\rho_n, c_n$  - плотность породы и скорость звука в ней,  $c_1$  и  $c_2$  - параметры, назначаемые по результатам натуральных измерений и экспериментов, при их отсутствии для определения  $c_1, c_2$  используются теоретические решения (например, теория упругости).

Получено уравнение для определения значения  $W$  (ЛНС) в виде

$$W = \frac{1}{2} \left[ R_{mp} + \left( \frac{545 \rho_n c_n}{[\sigma_{omp}^{din}]} \right)^{1,1} \right] \quad (3)$$

где  $[\sigma_{omp}^{din}]$  – значение динамической прочности породы на отрыв,  $R_{тр}$  – определяется из нелинейного уравнения, содержащего параметры породы, в том числе прочностные, и величину тангенциального напряжения; уравнение при определении  $R_{тр}$  решается методом последовательных приближений.

Зависимость (3) справедлива для монолитных массивов, для трещиноватых массивов снижение величины  $[\sigma_{omp}^{din}]$  учитывается коэффициентом ослабления  $K_{осл}$ , назначаемым в зависимости от степени трещиноватости.

Рассчитанная по зависимости (3) величина ЛНС проверяется на соответствие значению массовой скорости смещения  $\leq 2$  м/с, при которой обеспечивается дезинтеграция подлежащей разрушению породы при минимизации перемещения разрушенной массы и разлета осколков.

Величина заряда для определенных значений ЛНС рассчитывается по вместимости «р» 1 пог.м скважины или шпура при известном диаметре заряда

$$p = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot 10\Delta , \text{ кг} \quad (4)$$

где  $d$  – диаметр заряда, дм;

$\Delta$  – плотность ВВ в зарядной камере.

После этого определяется масса ВВ скважинного заряда малоплотного ВВ по зависимости

$$C_{m\_cov} = pl_3 \quad (5)$$

где  $l_3$  - длина заряда.

Дальнейшее совершенствование технологии осторожного взрывания было направлено на применение вместо ВВ новых газогенерирующих составов и средств их инициирования. В настоящее время по нашим, совместно с проф. В.А.Боровиковым, рекомендациям сотрудниками ГИПХа

(О.Н.Кирсанов и др.) разработан и запатентован новый газогенерирующий состав на твердой основе с перхлоратным окислителем, который более технологичен с позиции безопасного производства работ.

Контрольные испытания данного способа осторожного разрушения были произведены при разрушении валунов при прокладке коммуникаций в условиях г. Выборга и Санкт-Петербурга, а также при выколке блочного камня на гранитных карьерах Ленинградской области и Карелии. Опыты показали, что переход на низкоскоростной режим химического превращения газогенерирующего состава – дефлаграцию, позволяет полностью исключить бризантное действие в зоне контакта пиропатрона со стенками зарядной камеры.

Для направленного раскола горных пород и бетонных массивов предложены новые композиции, претерпевающие химическое превращение в режиме дефлаграции со скоростью порядка 10 м/с, развивая квазистатическое давление порядка 60-80 МПа. Достоинством этих способов направленного раскола является полное исключение сейсмического эффекта, действия ударных воздушных волн и разлета осколков. Испытания композиции были проведены в полигонных условиях при отбойке и пассивировке гранитных блоков и при разрушении железобетонных конструкций.

Для отбойки гранитного блока от массива на уступе высотой 2,7 м, подсеченного снизу естественной трещиной, было пробурено 9 шпуров диаметром 28 мм на глубину 1,5 м. Расстояние между шпурами принималось в пределах 300-400 мм. Линия откола от свободной поверхности уступа находилась на расстоянии 2,5 м. Газогенераторы устанавливались на дно семи шпуров, при этом два крайних шпура не заряжались. Забойка в виде песка или отсева заполняла свободную часть шпура и утрамбовывалась. В результате взрывания произошло смещение оторванного блока объемом 12,5 м<sup>3</sup> на расстояние около 1,6 м. Видимых трещин в блоке и тыльной стороне массива не обнаружено, разлета мелких осколков не наблюдалось.

Следующий эксперимент имел целью определение принципиальной возможности использования газогенерирующих составов для разделки камнеблоков на заготовки меньших размеров. Для этого была осуществлена пассивировка гранитогнейсового блока размером 2,5 м х 2,5 м х 1,5 м на две части. При этом было пробурено шесть шпуров на глубину 2 м при расстоянии между смежными шпурами 400 мм. Выполненные эксперименты подтвердили возможность применения нового способа направленного раскола с помощью газогенерирующих средств для получения высококачественной продукции при обеспечении экологичности и безопасности производства работ при отбойке камнеблоков.

Новые возможности повышения эффективности осторожного взрывания открывает использование гидровзрывного способа разрушения пород и материалов, предусматривающего использование заполненных водой кольцевых зазоров между зарядом и породой.

С целью установления зависимостей изменения параметров волн напряжений от величины водяного зазора были выполнены модельные эксперименты для зарядов осевой симметрии. В опытах изменение относительной величины зазора  $d_{скв} / d_{зар}$  осуществлялось варьированием зарядной полости (скважины) при постоянном диаметре  $d_{зар}$  и массе заряда. Кроме того, величина ЛНС в опытах оставалась постоянной, чтобы исключить влияние на характер затухания величины относительного расстояния.

В результате экспериментов:

- установлена оптимальная величина водяного кольцевого зазора для зарядов осевой симметрии, полученная в диапазоне относительных расстояний  $d_{скв} / d_{зар} = 2...3$ ; при этом оптимальная величина зазора растет со снижением акустической жесткости породы;
- показано, что при использовании конструкций зарядов с кольцевым водяным зазором имеет место уменьшение среднего размера куски породы на ~30% и полное исключение их разлета.

На основе выполненных исследований в диссертации разработана методика расчета параметров БВР для технологии шадящего (осторожного) взрывания. Расчет начинается с определения ЛНС- $W$  по зависимости (3). После определения ЛНС вычисляются и все остальные параметры БВР. По заданной высоте уступа  $H$  и величине  $W$  определяют объем  $V = H \cdot W$  отбиваемой породы и общую необходимую массу зарядов  $G = q \cdot V$ , где  $q$  – удельный расход ВВ. Величина  $q$  для случая осторожного взрывания с применением малоплотных ВВ и пиротехнических составов назначается на основе обобщения полученных экспериментальных данных и составляет 30-50 г/м<sup>3</sup>. По величине вместимости 1 м заряжаемой части шпура или скважины «р» определяются масса заряда в шпуре, необходимое число шпуров и расстояние между ними.

Применение предложенной технологии осторожного взрывания было осуществлено на целом ряде объектов.

Способ осторожного раскола и разрушения прошел апробацию при проходке коммуникационных траншей в стесненных условиях при реконструкции наружных сетей водопровода в микрорайоне «Б» г.Выборга. По этой технологии было разработано 1297 м<sup>3</sup> породы. Во всех случаях разлета мелких осколков не отмечено. Не наблюдалось никаких видимых нарушений целостности зданий, находящихся даже на расстоянии 0,3 м от



ближайшей границы траншеи, что свидетельствует о низком уровне СВВ и УВВ.

Гидровзрывной способ нашел широкое применение при осторожном взрывании гранитных валунов во время сооружения стволов и уклонов в искусственно замороженных горных породах при строительстве метро в Санкт-Петербурге, а также при проходке коллекторных тоннелей кессонным способом в зоне пльвунов. Гидровзрывной способ дробления бетона, железобетона был успешно применен в стесненных условиях при реконструкции фундаментов под эскалаторными лебедками метрополитена, проходке вентиляционных шурфов в бомбоубежище, разрушении фундамента на многих объектах С-Петербурга. Во всех случаях удельный расход ВВ колебался от 25 до 50 г/м<sup>3</sup> ВВ в зависимости от подлежащего разрушению материала, наличия обнаженных поверхностей и условий зажима.

Экономический эффект от внедрения технологии осторожного взрывания в условиях плотной городской застройки при реконструкции достигается за счет резкого увеличения темпов строительства и сокращения в 4-5 раз затрат на разделку каждого кубометра разрушаемой негабаритной конструкции по сравнению с механическими способами разделки.

Квазистатический характер действия взрыва заряда малоплотного ВВ предложено использовать для устройства цилиндрических свай-дрен необходимого размера в водонасыщенных связных грунтах для последующего их уплотнения или усиления основания армированием этими сваями-дренами. Особенностью устройства свай-дрен является применение удлиненных зарядов (линейно распределенных малых сосредоточенных зарядов) из малоплотного ВВ, взрыв которого оказывает равномерное действие на всю толщу грунта. При действии таких зарядов образуется весьма точная цилиндрическая скважина, время существования которой вследствие квазистатического характера взрыва оказывается достаточным для равномерного заполнения ее разжиженным песком и формирования свай-дрены. Первый успешный опыт устройства свай-дрен с использованием микровзрывов зарядов ВВ осуществлен при уплотнении илистого основания на строительстве участка автострады в районе г. Гданьска в Польше.

Необходимость уплотнения песчаного водонасыщенного грунта возникает при устройстве стационарных нефтегазодобывающих платформ на шельфе, выполненных в виде цилиндрической металлической или железобетонной оболочки, заполняемой песком, обычно методом намыва. Применение для уплотнения взрывов малых зарядов малоплотного ВВ позволит обеспечить допустимые динамические воздействия на несущие конструкции платформы и их сохранность.

Заряды малоплотного ВВ могут быть успешно использованы при устройстве камуфлетных уширений буронабивных свай, квазистатическое действие такого заряда обеспечивает получение полости необходимого объема с временем существования, достаточным для заполнения бетонной смесью.

## ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Выполнены систематические экспериментальные исследования действия взрыва заряда малоплотного ВВ и в результате:
  - впервые экспериментально зафиксирована эпюра волны напряжений, определяющая квазистатический характер нагружения массива породы, проявляющийся в более длительном поддержании амплитуды волны на достигнутом уровне с последующим менее резким градиентом спада;
  - установлена закономерность затухания волн напряжений в грунтах в функции относительного расстояния от центра взрыва;
  - показано, что закономерность изменения массовой скорости в слоистых породах с заполнением трещин водой близка к аналогичной закономерности, установленной для монолитных горных пород.
2. С учетом установленных закономерностей действия взрыва заряда малоплотного ВВ сформулированы основные положения технологии, разработана методика расчета массы заряда и параметров его расположения при осторожном взрывании, при этом:
  - установлена связь между удельным расходом ВВ, перемещением разрушенной массы и разлетом кусков;
  - определена предельная величина зарядов рыхления;
  - определено критериальное значение массовой скорости, при которой разрушение породы происходит без ее перемещения.
3. На основе выявленных в экспериментах закономерностей разработан инженерный метод расчета параметров буровзрывных работ и основные положения технологии щадящего (осторожного) взрывания при применении как малоплотных ВВ, газогенерирующих пиротехнических составах, так и при использовании специальных конструкций зарядов с водяными зазорами.
4. Сформулированы рекомендации по проведению БВР с учетом специфики разработки котлованов и других профилированных выемок, проходки туннелей, по применению БВР для уплотнения и упрочнения водонасыщенных несвязных и связных грунтов оснований, устройству и реконструкции фундаментов в промышленно-гражданском строительстве.

5. Технология осторожного (щадящего) взрывания реализована на ряде объектов ПГС и ГТС и выявлена эффективность ее применения. Разработаны рекомендации по применению технологии осторожного взрывания применительно к строящимся объектам С-Петербурга.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. В.А.Боровиков, А.А.Рыскунов, В.К.Сластенко. Параметры волны напряжений при взрыве малоплотных ВВ. Взрывное дело. Сборник № 92/49, 1999с. 42-46.
2. В.А.Боровиков, Т.В.Стойнова, В.К.Сластенко, А.А.Рыскунов. Концепция поэтапного построения численного расчета параметров волн напряжений. Взрывное дело. Сборник № 92/49, 1999. с. 57-63.
3. В.А.Боровиков, О.Н.Кирсанов, В.К.Сластенко. Использование эффекта газогенерации для отбойки и разделки камнеблоков. Научные доклады IV международной конференции «Экология и развитие Северо-Запада России», 23-27 июня 1999. с. 52-61.
4. В.А.Боровиков, О.Н.Кирсанов, В.К.Сластенко, Л.А.Гуськов. Альтернативная щадящему взрывания технология направленного раскола и разрушения горных пород и искусственных материалов. Сборник научных докладов VI международной конференции «Экология и развитие Северо-Запада России», 11-16 июля 2001. с. 71-73.
5. В.К.Сластенко. Техника и технология осторожного взрывания и пути ее совершенствования. Научно-технические ведомости СПбГПУ, №2, 2003 г. с. 65-68.
6. А.К.Бугров, В.К.Сластенко. Применение щадящего взрывания при подготовке и устройстве оснований и фундаментов. – Труды Международной конференции «Реконструкция исторических городов и геотехническое строительство», СПб, 17-19.09.2003 г. (в печати).