



КОЛЬСКИЙ  
НАУЧНЫЙ  
ЦЕНТР



**С. А. Козырев, Е. А. Власова**



**ИССЛЕДОВАНИЕ  
ВЗРЫВЧАТЫХ ХАРАКТЕРИСТИК  
ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ  
МЕСТНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КОЛЬСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК»

ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ

**С. А. Козырев, Е. А. Власова**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЗРЫВЧАТЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРОМЫШЛЕННЫХ ВВ  
МЕСТНОГО ИЗГОТОВЛЕНИЯ**

Апатиты

Издательство Кольского научного центра

2024

УДК 622.235  
ББК 35.63(2Рос-4Мур)  
К59

Утверждено к печати ученым советом Горного института КНЦ РАН  
Печатается по решению Редакционного совета по книжным изданиям ФИЦ КНЦ РАН

Рецензенты:

доктор технических наук *С. А. Горинов*;  
доктор технических наук *В. В. Рыбин*

**Козырев, Сергей Александрович.**

К59 Исследование взрывчатых характеристик промышленных ВВ местного изготовления : монография / С. А. Козырев, Е. А. Власова. — Апатиты : Изд-во Кольского научного центра, 2023. — 145 с. : ил.  
ISBN 978-5-91137-509-6

В монографии рассмотрены промышленные взрывчатые вещества (ВВ), применяемые в России, а также изготавливаемые на местах ведения взрывных работ по добыче апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений. Последовательно рассмотрены особенности приготовления, использования и взрывчатые характеристики гранулированных тротилсодержащих ВВ. Показана необходимость их замены бестротилловыми ВВ. Изучены детонационные и энергетические характеристики смесевых бестротилловых ВВ типа АС-ДТ на основе гранулированной аммиачной селитры, которые применяются в условиях ведения подземных горных работ, смеси АС-ДТ на пористых сортах гранулированных аммиачных селитр. Произведено определение физико-химических характеристик отечественной и зарубежной пористых аммиачных селитр. Выполнена сравнительная оценка взрывной эффективности смесей АС-ДТ после пневмозаряжения, изготовленных на основе пористых мелко-гранулированных аммиачных селитр разных производителей: отечественной марки МП по производства ОАО «Акрон» и селитры производства компании Yara AB.

Рассмотрены особенности взрывной эффективности алюмосодержащих гранулитов на различных типах порошков алюминия и силикоалюминия. Определены основные характеристики порошков, которые оказывают влияние на взрывчатые свойства гранулитов, это содержание активного алюминия, однородность и размер гранул.

В монографии особое внимание уделено исследованию эксплуатационных и взрывчатых характеристик эмульсионного ВВ, применяемого на подземных горных работах. Произведена оценка качества приготовления эмульсионного ВВ «Сабтэк». Выполнен анализ образцов гранулированной аммиачной селитры различных заводов изготовителей для приготовления эмульсионной матрицы и показана необходимость использования типов селитр без примесей. Проведено исследование влияния температурных режимов на процесс газификации эмульсионной матрицы до конечной плотности заряжения. Даны рекомендации по заряжению восходящих скважин эмульсионными ВВ.

На созданном совместно с ОАО «Апатит» подземном испытательном полигоне с использованием современной измерительной аппаратуры и комплексного метода, включающего измерение скорости детонации в стальных трубах оптоволоконным измерителем скорости детонации, определение количества токсичных газов с помощью современных газоанализаторов, выделяющихся при взрыве ВВ и оценку бризантного действия взрыва по степени расширения стального кольца относительно эталона аммонит БЖВ произведена оценка взрывчатых характеристик всех производимых составов смесевых ВВ местного изготовления в том числе эмульсионных. По экспериментальным данным для рассмотренных составов определены оптимальные параметры буровзрывных работ (БВР) для условий подземных рудников хибинских месторождений.

Книга предназначена для научных и инженерно-технических работников научно-исследовательских, проектных институтов и изготовителей взрывчатых веществ.

УДК 622.235  
ББК 35.63(2Рос-4Мур)

Научное издание  
Редактор Ю. Н. Еремеева  
Технический редактор В. Ю. Жиганов  
Подписано в печать 14.07.2024. Формат бумаги 70×108 1/16.  
Усл. печ. л. 12,7. Заказ № 30. Тираж 500 экз.

Федеральный исследовательский центр «Кольский научный центр РАН».  
184209, Апатиты, Мурманская область, ул. Ферсмана, 14.

ISBN 978-5-91137-509-6  
doi:10.37614/978-5-91137-509-6

© С. А. Козырев, Е. А. Власова, 2024  
© ГоИ КНЦ РАН, 2024  
© ФИЦ КНЦ РАН, 2024

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ.....	6
1.1. Ассортимент промышленных взрывчатых веществ, применяемых в России... ..	16
2. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ РОССИИ.....	20
2.1. Гранулиты типа АС-ДТ на основе гранулированной аммиачной селитры.....	25
2.2. Гранулиты типа АС-ДТ на основе пористой гранулированной аммиачной селитры.....	28
2.2.1. Сравнительное определение физико-химических характеристик отечественной и зарубежной пористых аммиачных селитр.....	32
2.2.2. Экспериментальная оценка взрывной эффективности гранулитов АС-ДТ	36
2.2.3. Исследование особенностей детонации гранулитов АС-ДТ.....	41
2.3. Особенности гранулитов, содержащих металлическое горючее.....	48
2.3.1. Алюмосодержащие гранулиты.....	52
2.3.2. Гранулиты, содержащие ферросплавы.....	54
2.4. Гранулиты местного изготовления в условиях ОАО «Апатит».....	56
2.5. Совершенствование алюмосодержащих гранулитов с целью обеспечения их безопасности при пневмозаряжании.....	63
2.6. Сравнительная оценка уровня эффективности алюмосодержащих гранулитов в полигонных и природных условиях.....	69
3. ЭМУЛЬСИОННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА.....	75
3.1. Опыт применения эмульсионных взрывчатых веществ на горных работах в подземных условиях.....	75
3.2. Экспериментальное исследование характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк».....	83
3.2.1. Исследование температурных режимов газификации эмульсионной матрицы «Сабтэк».....	84
3.2.2. Контроль плотности получаемого заряда эмульсионного взрывчатого вещества.....	91
3.2.3. Оценка взрывчатых характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк» в условиях испытательного полигона.....	94
3.2.4. Определение детонационных и энергетических характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк».....	98
3.2.5. Определение оптимальных параметров детонации эмульсионных взрывчатых веществ в шпуровых и скважинных зарядах для обеспечения максимального эффекта воздействия на разрушаемую среду.....	99
3.3. Оценка качества приготовления эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк»	101
3.3.1. Анализ образцов гранулированной аммиачной селитры различных заводов-изготовителей.....	105
3.3.2. Анализ образцов газогенерирующей добавки и ее компонентов.....	112
3.3.3. Анализ образцов эмульсионной матрицы.....	115
3.4. Влияние динамических нагрузок на взрывчатые характеристики газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ.....	116
3.5. Исследование и оптимизация процесса заряжания вертикальных скважин эмульсионным взрывчатым веществом «Сабтэк».....	124
3.6. Экспериментальное определение оптимальных параметров буровзрывных работ для различных разновидностей руд Хибинского массива.....	125
3.7. Обоснование оптимального интервала замедления между скважинами при их одновременном взрывании в ряду.....	129
3.8. Экспериментальная оценка оптимального интервала замедления при одновременном взрывании скважин в веере.....	131
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	135
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....	136

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ВВ — взрывчатое вещество  
ПВВ — промышленное взрывчатое вещество  
ЭВВ — эмульсионное взрывчатое вещество  
ЭМ — эмульсионная матрица  
ГГД — газогенерирующая добавка  
АС — аммиачная селитра  
ПАС — пористая аммиачная селитра  
ДТ — дизельное топливо  
АС-ДТ — смесь аммиачной селитры и дизельного топлива  
Гранулит — смесь гранулированной аммиачной селитры и невзрывчатого горючего (типа АС-ДТ)  
ANFO — ammonium nitrate fuel oil  
Тринитротолуол, TNT — тротил  
Гранулотол — гранулированный тротил  
Al — алюминий  
Граммонит — смесь тротила и гранулированной аммиачной селитры  
Граммотол — смесь гранулированного тротила, гранулированной аммиачной селитры и жидкого нефтепродукта  
СЗМ — смесительно-зарядная машина  
БВР — буровзрывные работы  
ПГР — подземные горные работы  
ПД — промежуточный детонатор, боевик  
ЛНС — линия наименьшего сопротивления  
ПДК — предельно-допустимая концентрация  
ТУ — технические условия  
NO — оксид азота (II)  
NO<sub>x</sub> — окислы азота  
CO — окись углерода (II)  
ПАВ — поверхностно-активные вещества  
КНЦ РАН — Кольский научный центр Российской академии наук

## ВВЕДЕНИЕ

В монографии рассмотрены промышленные взрывчатые вещества, изготавливаемые на местах ведения взрывных работ по добыче апатит-нефелиновых руд хибинских месторождений. Практически на глазах авторов в течение последних 30 лет происходил переход от взрывчатых веществ заводского изготовления, в основном содержащих тринитротолуол и мелкодисперсную алюминиевую пудру, к взрывчатым веществам, изготавливаемым на местах применения, из практически невзрывчатых компонентов. На рубеже веков предприятие на собственном стационарном пункте подготовки начало изготовление гранулитов с добавками, позже появились эмульсионные ВВ. Общее в этих составах — все они аммиачно-селитренные, поэтому изучению свойств и особенностей различных аммиачных селитр было уделено особое внимание.

Применение эмульсионных ВВ вызывает широкий интерес и привлекает внимание специалистов, занимающихся промышленными ВВ и взрывными работами в условиях подземных горных работ. Особенности месторождения, технология ведения работ определяют специфику применения ВВ, определяемую только опытным путем. Наличие рядом с горнодобывающим предприятием исследовательского потенциала в лице Горного института КНЦ РАН дало возможность проведения исследований в большом объеме и для решения большого круга практических задач.

В монографии собраны результаты исследований, технические решения и обобщен практический опыт применения ВВ в подземных условиях за прошедшие годы. В хронологическом порядке рассмотрены этапы разработки именно промышленных ВВ.

Эта книга предназначена для широкого круга читателей: специалистам горного профиля — инженерам, проектировщикам, всем, кто тем или иным образом связан с ведением взрывных работ на горнодобывающих предприятиях. Она будет интересна научным сотрудникам и студентам, заинтересованным в области развития взрывного дела. Авторы монографии имеют большой опыт научно-исследовательской и практической работы. На страницах этой книги нашли свое отражение их научные достижения, практический опыт и взгляды на большой круг вопросов в области взрывного дела.

Авторы выражают благодарность научным сотрудникам Горного института А. В. Соколову и Е. А. Усачеву, а также специалистам КФ АО «Апатит», ЗАО «Орика СиАйЭс» за проделанную совместную работу, обсуждение широкого круга вопросов, практические советы и замечания.

## 1. ИСТОРИЯ СОЗДАНИЯ ПРОМЫШЛЕННЫХ ВЗРЫВЧАТЫХ ВЕЩЕСТВ

Исторически первым взрывчатым веществом (вернее — составом), изобретенным людьми, был дымный порох — смесь серы, древесного угля и калийной селитры. Начало применения пороха в горном деле по разным источникам относят к XVI–XVII в. Известно упоминание о «невоенном» применении дымного пороха в Российской империи в 1548 г. Тогда его применили для взрывания скал и камней, мешавших судоходству по р. Неман. На территории Европы известно о применении пороха в 1627 г. на шахте в Банска-Штьявице (Словакия). К концу XVII в. взрывные работы с помощью пороха стали широко распространенными в горной промышленности многих стран, и до середины XIX в. дымный порох оставался практически единственным применяемым в промышленности взрывчатым веществом [1].

Выдающийся русский ученый М. В. Ломоносов в 1749 г. выполнил работу под названием «Диссертация о рождении и природе селитры», в ней он изложил основы физики взрыва [2]. В работе «Слово о пользе химии» М. В. Ломоносов определил общее направление создания взрывчатых веществ [2]. На основе этой работы было создано много новых взрывчатых веществ: мелинит (1771 г.), нитробензол (1834 г.), нитронафталин (1836 г.), пироксилин (1838 г.), нитроглицерин (1846 г.), тринитротолуол (1863 г.) и др.

Так, в 1846 г. А. А. Фадеев впервые в России получил большое количество пироксилина [3]. Еще до открытия пироксилина А. А. Фадеев нашел замечательный способ безопасного хранения дымного пороха на складах. Он показал, что если перемешать дымный порох с углем и графитом, то при зажигании на воздухе порох не взрывается, а лишь медленно горит. Описание предложенного А. А. Фадеевым способа хранения пороха было издано Французской академией наук, т. к. этот способ превосходил все существовавшие заграничные способы.

Несмотря на то, что пироксилин был получен в 1838 г., долго не могли выработать технологию получения безопасного в обращении пороха. В 1884 г. французский инженер Поль Вьель (Paul Vieille) разработал технологию приготовления нового вида пороха — пироксилинового [4]. По мощности он намного превосходил дымный, а при горении не давал дыма, поэтому его назвали бездымным.

С 1846 г. исследовал нитроглицерин и искал безопасные способы его применения русский химик Николай Николаевич Зимин. Вместе с ним работал Василий Федорович Петрушевский, который впоследствии изготовил 160 пудов различных сортов динамита. Их учеником был молодой Альфред Нобель. В период 1863–1868 гг. были успешно проведены опыты взрывания скальных пород, брони, рельсов динамитом Петрушевского. В 1867 г. партия его динамита была применена для взрывания скальных пород и мерзлых грунтов на золотых приисках Восточной Сибири, а руководил взрывными работами капитан Черниловский-Сокол. Эти взрывы были первым в России случаем использования в горном деле взрывчатых веществ, отличных от пороха [2].

В 1864 г. А. Нобель получает патент на изготовление нитроглицерина, назвав его «взрывчатое масло Нобеля» и в 1867 г. патент на безопасное, поддающееся патронированию ВВ, которое он назвал динамитом. В том же 1867 г. А. Нобель изобрел капсюль-детонатор [5].

Динамиты стали более мощными ВВ, чем порох, и имели более высокую скорость детонации, поэтому они начали быстро вытеснять его в большинстве видов взрывных работ. Динамиты обладали более высокой водоустойчивостью и пластичностью, были менее опасными в обращении, были более эффективными для шпурового метода ведения взрывных работ и ручного заряжания патронами. В то же время динамиты весьма чувствительны к механическим воздействиям и поэтому опасны в обращении. Несмотря на эти проблемы во многих странах мира они оставались основным типом ПВВ вплоть до середины прошлого века.

Параллельно с развитием динамитов шел поиск менее опасных и более удобных в применении промышленных ВВ. Появился ряд патентов в Англии и Швеции.

Соотечественники А. Нобеля инженеры И. Олссон и И. Норбин предложили готовить взрывчатые смеси на основе аммиачной селитры и различных горючих добавок [6]. В результате этих работ в 1867 г. был предложен «аммиачный порох» на основе смеси аммиачной селитры с горючими добавками и оформлен патент, который признается как первый официальный документ по составам аммиачно-селитренных ВВ [7]. Однако их применение было законсервировано предприимчивостью А. Нобеля. Он купил патент на изготовление аммиачно-селитренных ВВ и не разрешил его использовать в течение 20 лет, что позволило ему распространить динамиты во многие страны, в том числе и в Россию.

Во Франции в 1884 г. усилиями П. Фавье был разработан и запущен в производство первый предохранительный смесевой состав на основе аммиачной селитры и тринитронафталина. Тогда же во Франции, а позже и в России, было организовано производство гризутинов, состоящих из аммиачной селитры и нитроглицерина [6].

В 1889 г. появился еще более мощный бездымный порох — нитроглицериновый. Для усовершенствования бездымного пороха много работ выполнил великий русский химик Дмитрий Иванович Менделеев, который стал научным консультантом созданной в 1891 г. Морским министерством специальной Морской научно-технической лаборатории для изучения взрывчатых веществ. В лаборатории был разработан бездымный порох, превосходящий по характеристикам иностранные образцы [8]. Однако он так и не был принят на вооружение в русском флоте. Вскоре подобный порох стали производить в Америке. Во время Первой мировой войны России пришлось закупать в США, в сущности, разработанный Менделеевым порох [6].

Директором Морской научно-технической лаборатории был уже известный в то время специалист по взрывчатым веществам профессор Иван Михайлович Чельцов. Он написал труд «Взрывчатые вещества», который высоко оценил Д. И. Менделеев. Лаборатория изучала смесь селитры и пикрата аммония и в 1886 г. разработала состав «громобой». Это был первый образец аммонита в России [9, 10].

Период 1890–1919 гг. характеризуется рядом открытий новых ВВ таких, как: азид свинца, тетранит, гексоген и др. С момента получения тринитротолуола в 1863 г. и до 1890-х гг. его использовали только в качестве желтого красителя для текстиля. В 1891 г. немецкий химик Карл Хойссерманн (Karl Häussermann) установил возможность взрыва тринитротолуола. Относительная простота получения, отсутствие дорогостоящих компонентов, безопасность хранения и транспортировки позволили наладить промышленный выпуск тринитротолуола уже в 1902 г. И с тех пор это самое массовое взрывчатое вещество в мире [5].

В это же время дальнейшее развитие получили аммониты — группа аммиачно-селитренных ВВ на основе аммиачной селитры с другими

взрывчатыми или горючими веществами. В качестве добавок из взрывчатых веществ применяли нитроглицерин и другие нитроэфиры, тротил (тринитротолуол), гексоген, тен (тетранитропентаэритрит). Из горючих веществ использовали органические (древесная мука, торф, жмыхи, нефтяные масла) и неорганические (порошкообразный алюминий, ферросилиций) вещества.

Взрывчатые вещества на основе аммиачной селитры произвели переворот в промышленном взрывном деле. Широкое использование аммонитов связано с доступностью и низкой себестоимостью аммиачной селитры, а также безопасностью получаемых составов в хранении и применении. Составы на основе аммиачной селитры отличаются большим объемом выделяющихся газов при низкой температуре взрыва, что делает их незаменимыми в горнодобывающей промышленности.

Производство и применение аммонитов росло во всем мире. Так, к 1920 г. аммониты составляли около 7 % от всего количества выпускаемых промышленных ВВ в Германии. Во всех угледобывающих странах они стали основным предохранительным ВВ вплоть до 1960-х гг.

Накопленные к тому времени знания и понимание важности научно обоснованного подхода к производству и применению промышленных ВВ были собраны в первом в нашей стране справочном руководстве для инженеров, техников и студентов по мирному применению взрыва. Справочник «Взрывчатые вещества и взрывные работы» под редакцией профессора М. Сухаревского был выпущен Государственным техническим издательством Советской России в 1923 г. Годом ранее, в июне 1922 г., вышел научно-популярный журнал «Взрывное дело». Позже группой инженеров и специалистов взрывного дела (В. А. Асонов, А. Д. Яхонтов, И. И. Киселев, Л. И. Извеков) было принято решение об издании специализированного технического бюллетеня, который с 1932 г. по настоящее время выпускается под тем же названием — научно-технический сборник «Взрывное дело».

На открытых горных работах и в условиях подземных работ, не опасных по взрыву газа или пыли, аммониты начали применять с 1924 г. Это были аммониты № 2 и № 3 одинакового состава, но различной технологической обработки. Начиная с 1936 г., для угольных шахт стали выпускать предохранительные аммониты. Макеевским научно-исследовательским институтом (МакНИИ) для работы в шахтах опасных по газу и пыли в 1940-х гг. был разработан аммонит № 8 и № 8 ПВ (промышленный водоустойчивый), а также аммониты АП-1, АП-2, АП-2ПВ.

Чуть позже под руководством Б. Д. Росси был освоен выпуск динамонов, содержащих в качестве горючего муку сосновой коры, торф, жмых и т. п. Динамоны сыграли огромную роль в народном хозяйстве, особенно в годы Великой Отечественной войны, когда все ресурсы по выпуску тротила и нитроглицерина расходовались на нужды фронта. В военные годы выпускались аммониты Ш/1, № 8, АП-1, № 6, № 7. Как предохранительные, так и не предохранительные составы.

Возможность промышленного выпуска больших объемов аммонитов появилась благодаря исследованиям МакНИИ, МХТИ им. Менделеева и других организаций под руководством ученых К. К. Андреева, А. И. Гольбиндера, А. И. Селезнева и др.

Большая работа по внедрению аммонитов в горнодобывающую промышленность была проведена крупными специалистами взрывного дела В. А. Асоновым и Г. П. Демидюком. В 1939 г. объем производства аммонитов составил 80 % от общего количества промышленных ВВ. В других странах это

произошло после Второй мировой войны, главным образом за счет смесей гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом.

Послевоенное развитие ассортимента ВВ для применения в горнодобывающей промышленности связано с приданием порошкообразным составам водоустойчивости. Промышленный выпуск водоустойчивой селитры позволил создать широкий ассортимент водоустойчивых аммонитов и других ВВ, включая непреходящие аммониты № 6 ЖВ и № 7 ЖВ; водоустойчивые аммоналы; мощные скальные аммониты и аммоналы, содержащие гексоген; нитроэфирсодержащие детониты; предохранительные аммониты; углениты; динамоны. Некоторые из них применяются до сих пор.

Широкое применение ВВ на основе аммиачной селитры ограничивалось в основном ее гигроскопичностью и, как следствие, ее слеживаемостью [11, 12]. Для обеспечения механизированного заряжания, транспортирования и хранения промышленных ВВ требовались иные качества: уменьшить пыление, повысить сыпучесть, снизить чувствительность к механическим воздействиям. Существенные изменения в ассортименте ВВ, применяемых в горной промышленности страны, произошли после освоения азотной промышленностью производства аммиачной селитры в гранулированном виде. Тогда на смену аммонитам были разработаны гранулированные и водосодержащие ВВ, пригодные к механизированному заряжанию.

В других странах коренной поворот в сторону безопасных и экономичных ВВ произошел в связи с развитием ВВ простейшего состава в виде смесей гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом, для которых распространены обозначения АН-ФО. В России ВВ этого класса принято обозначать АС-ДТ. Б. Н. Кутузов [13] обращал внимание, что успешное внедрение дешевых гранулированных ВВ типа АС-ДТ на карьерах США и Канады потребовало увеличения диаметра скважин до 269–320 мм для надежной детонации этих низкочувствительных ВВ.

В СССР гранулированные ВВ простейшего состава разрабатывались и исследовались под руководством академика Н. В. Мельникова и профессора Г. П. Демидюка в Институте горного дела Академии наук СССР им. А. А. Скочинского (ИГД АН СССР). На основании большого цикла испытаний в промышленных условиях на открытых и подземных работах был создан взрывчатый состав «Игданит», названный так с использованием названия института ИГД АН СССР [14, 15]. Первые его промышленные испытания проведены в 1958 г. Это взрывчатое вещество допущено к применению в 1959 г. и получило широкое распространение благодаря одновременному созданию средств механизированного изготовления и заряжания в условиях горных предприятий.

Позже был организован промышленный выпуск бестротилового гранулированного ВВ заводского изготовления, разработанных под руководством З. Г. Позднякова [16]. Их назвали гранулитам. Простейший из них — гранулит М, аналог игданита, изготавливался на основе пористой аммиачной селитры и содержал более вязкое соляровое масло. Гранулиты более сложного состава, помимо жидкого горючего, содержат твердые дисперсные горючие добавки (алюминиевая пудра, древесная мука). Для придания гранулитам водоустойчивости составы вместо жидкого горючего содержали легкоплавкие гидрофобные воски и парафины. Одно из достоинств гранулитов — их способность уплотняться в шпурах и скважинах при пневмозаряжании, благодаря чему по объемной концентрации энергии

взрыва в зарядной камере гранулиты приближались к мощным аммоналам (детонитам) и показывали высокую эффективность.

Параллельно с гранулитами совершенствовались составы тротилсодержащих аммиачно-селитренных ВВ: они были более стойкими в воде, чем простейшие.

Первыми высокоустойчивыми к воде гранулированными ВВ стали гранулотол (гранулированный тротил) и алюмотол (гранулированная смесь тротила с алюминиевым порошком). Их производство началось в 1950-х гг. Позже появились, и с тех пор стали широко применяться, механические смеси гранулированной аммиачной селитры с гранулированным или чешуирированным тротилом. Первоначально их называли зерногранулиты, а затем переименовали в граммониты.

Начиная с 1960-х гг. граммониты стали одним из основных видов промышленных ВВ для ведения взрывных работ в карьерах, а граммонит 79/21, имеющий нулевой кислородный баланс, и для зарядании скважин в подземных условиях.

Основным недостатком имеющихся на то время промышленных ВВ было и остается в настоящее время легкая растворимость зарядов в обводненных скважинах. О том, что в небольших количествах вода в заряде полезна было известно давно [17, 18]. Детальное исследование свойств и параметров этих ВВ показало, что при взрыве в воде они выделяют на 15–18 % больше тепла, чем при взрыве в воздухе. Еще больший тепловой эффект, чем при взрывании в воде, проявился при наполнении их раствором аммиачной селитры. Заполнение пространства между гранулами насыщенным раствором селитры придает смеси текучесть и увеличивает плотность заряжения до 1,4–1,5 г/см<sup>3</sup>. Происходит увеличение объемной концентрации энергии, что повышает параметры детонации.

Практически применить это на практике удалось американцам М. Л. Куку и Г. Фарнаму. В 1960 г. они оформили патент на создание первого водосодержащего взрывчатого вещества местного приготовления, в состав которого входил взрывчатый сенсibilизатор — тротил [19]. Для придания водостойкости в смесь был добавлен гидрофильный коллоид — гуаргам, который повышал вязкость и создавал защитный слой на заряде ВВ, препятствующий проникновению в него воды. Такие композиции были названы «сларри». Фирма «Канадиен Индатрис Лимитед» первой стала выпускать промышленные смеси такого типа — гидромексы.

В СССР водосодержащие взрывчатые вещества появились в 1960-х гг. в ходе выполнения работ по совершенствованию смесей гранулированной аммиачной селитры с тротилом [20, 21]. В Институте физики Земли разработчики «Игданита» (смеси гранулированной аммиачной селитры с дизельным топливом), с целью увеличения объемной концентрации энергии, наполняли смесь водными растворами аммиачной селитры, насыщенными при температуре 20, 40, 60 и 80 °С. Водонаполненные составы были названы «ифзанитами».

Сотрудниками НИИКМА им. Л. Д. Шевякова и сектора физико-механических горных проблем ИФЗ АН СССР на рудниках Михайловского горно-обогатительного комбината были проведены работы по испытанию ифзанитов [22]. Предварительно проведенные лабораторно-полигонные испытания с целью отработки технологии приготовления ифзанитов показали, что для проведения опытно-промышленных испытаний необходимо создать технические средства для механизации процесса их приготовления и зарядания. Внедрение ифзанитов на карьерах горнорудных предприятий сдерживалось отсутствием специальных зарядных машин. Кроме того, необходимо было решить и технологические задачи — сохранить раствор

аммиачной селитры в текучем состоянии в течение времени транспортирования его от пункта приготовления до заряжаемых скважин.

В ходе проведенных работ было установлено, что 85 %-ный раствор аммиачной селитры при соприкосновении с гранулированной аммиачной селитрой быстро кристаллизуется, теряет текучесть, не позволяет получить удовлетворительную структуру смеси. Использование 60- или 77 %-ного раствора аммиачной селитры с сухими компонентами в режиме одновременной подачи их в поток обеспечивало высокоплотную структуру смеси с содержанием воды в количестве 7,5–12 %. Нагревание раствора 60–75 %-ной концентрации от температуры насыщения до 100 °С при совмещении с сухими компонентами позволило получить хорошую текучесть и высокую плотность растворонаполненной смеси и значительно ускорить процесс отвердевания заряда водосодержащего ВВ.

На опытном стационарном пункте Михайловского ГОКа в 1974 г. было приготовлено 260 т ифзанитов. Для доставки раствора на блоки использовали большегрузную цистерну и зарядные машины СУЗН-5М. При зарядании использовали раствор аммиачной селитры с температурой на 30–40 °С выше температуры насыщения раствора. Совмещение фаз производили в устье скважины одновременным введением компонентов по отдельным шлангам, твердая фаза вводилась в насыщенный раствор аммиачной селитры на дне скважины. Используемая технология предусматривала зарядание одновременно по двум зарядным шлангам, что делало ее очень трудоемкой. Способ обеспечения физической стабильности ифзанитов путем оптимизации реологических параметров жидкой фазы в этом случае неприменим, т. к. жидкая фаза ифзанитов представляла собой раствор аммиачной селитры, насыщенный при температуре окружающей среды, и кристаллизация в этом случае невозможна.

Водосодержащие взрывчатые вещества типа ифзаниты имели недостаточную текучесть из-за высокого (до 60 %) содержания твердой фазы, в скважины их заряжали самотеком от устья скважины и использовали, как правило, только для зарядания сухих скважин [23].

С целью повышения физической стабильности и водоустойчивости в ифзаниты стали вводить специальные добавки — загустители. Для загущения использовали набухающие в воде высокомолекулярные соединения. Наибольшее распространение в качестве загустителей водосодержащих ВВ получили высокомолекулярные соединения: природный полимер — гуаргам, натриевая соль карбоксиметилцеллюлозы (КМЦ) и полиакриламид (ПАА) [24].

Институтом Горного дела Минчермета СССР была разработана технология получения водоустойчивых ВВ стабильного состава, основанная на смешивании загущенного с помощью натриевой соли КМЦ или полиакриламида раствора окислителя (раствор аммиачной селитры) с горючими добавками и нерастворенной частью аммиачной селитры с последующим структурированием смеси путем введения в нее в процессе подачи в скважину сшивающих агентов [25]. В процессе структурирования происходило «сшивание» макромолекул загустителя поперечными химическими связями в пространственную трехмерную сетку, в результате вязкотекучая смесь на выходе из зарядного шланга превращалась в эластичную гелеобразную систему. Трехмерная сетка, обладающая определенной механической прочностью, препятствовала расслоению разнородных компонентов.

Технология приготовления водоустойчивых гелеобразных ВВ прошла опытно-промышленную проверку на карьерах Соколовско-Сарбайского ГПО и Качканарского ГОКа. Основной составной частью водосодержащего ВВ является раствор окислителя, который готовился с определенными параметрами

по температуре, концентрации и загущенности. Раствор окислителя делали на пунктах приготовления или специальных комплексах. Приготовление горячего раствора аммиачной селитры производили в нагревательно-смесительных установках типа НСУ-2, работающих по принципу аэродинамического нагрева движущимся с большой скоростью по трубам в замкнутом пространстве воздухом и в аппаратах растворения с системой боковых и донных змеевиков или с гладкой приварной рубашкой, в которые подавался пар. Нагревательно-смесительная установка типа НСУ-2 была разработана институтом НИПИГОРМАШ и изготавливалась его опытным заводом.

Институтом Горного дела Минчермета СССР была разработана техническая документация и созданы опытно-промышленные образцы смесительно-зарядных машин МЗ-3Б-В, МЗ-4В. Подача компонентов в смеситель, их перемешивание и выдача готового водосодержащего ВВ в скважину осуществлялись одновременно и непрерывно. Эта схема реализовала преимущества технологии приготовления взрывчатых веществ в условиях горных предприятий, т. к. позволяла получать ВВ, отвечающие конкретным условиям взрывания. Путем регулирования дозировки компонентов и плотности ВВ можно было изменять энергию заряда не только в отдельных скважинах блока, но и в любой конкретной скважине по высоте колонки заряда пропорционально сопротивлению разрушаемой среды [26].

Водосодержащие ВВ после завершения процесса структурирования, происходящего в смесителе, имели низкую текучесть, это затрудняло их перекачивание насосами в обводненные скважины под столб воды. Зарядание сверху, от устья скважины, несмотря на большое содержание загустителя, приводило к уменьшению энергии заряда как за счет дополнительного растворения аммиачной селитры при прохождении заряда через воду, так и за счет заземления воды в заряде.

С целью экономии дорогостоящих желатинизирующих компонентов и снижения затрат на нагревание компонентов взрывчатой смеси НИИОГР разработал и опробовал ифзанит Т-20-ОП, содержащий раствор аммиачной селитры, насыщенный при 20 °С, наполненный высококонцентрированным раствором поверхностно-активных веществ [27, 28]. Ифзанит Т-20-ОП готовился смешиванием раствора аммиачной селитры, горючего и наполнителя при температуре окружающей среды. В качестве горючего использовали гранулол или алюминий. Заряд ифзанита содержал «газовую фазу», большое количество пузырьков воздуха, они увеличивали подвижность и снижали содержание воды в смеси, кроме того, «газовые поры» состава улучшали детонационные характеристики, выполняя роль «горячих точек». В то же время получаемый ифзанит был не способен эффективно удерживать горючее по колонке заряда. Происходило «оседание» горючих компонентов в нижнюю часть скважины, что в итоге приводило к ухудшению детонационных характеристик заряда, а в некоторых случаях и к полному отказу детонации, т. к. в верхней части заряда оказывался только низкоконцентрированный раствор аммиачной селитры.

В Ленинградском горном институте под руководством А. Н. Ханукаева [29–31] разработана технология приготовления «акватолов», водосодержащих ВВ, изготавливаемых на местах потребления из отдельных компонентов — на основе горячего водного раствора аммиачной селитры и сенсibilизатора, так называемые горячельющиеся водосодержащие взрывчатые вещества (ГЛВВ). Первоначально их состав был аналогичен составу заводского изготовления акватол 65/35. Исследования [32–34] показали, что максимальная удельная энергия и объемная концентрация энергии достигаются при уменьшении содержания тротила до 20 %.

Компоненты ГЛВВ готовились на стационарных пунктах, оснащенных специальным технологическим оборудованием, включающем бункеры-накопители

аммиачной селитры, баки-растворения аммиачной селитры и другое вспомогательное оборудование в зависимости от вида применяемого загустителя и особенностей технологического процесса. Технология приготовления ГЛВВ заключается в приготовлении горячего 90 %-ного водного раствора аммиачной селитры с температурой 80–100 °С и перемешивании его с сенсибилизатором в баке-смесителе зарядной машины, например, «Акватол-3» или «Акватол-1У». Готовое водосодержащее ВВ с помощью центробежного насоса закачивается в скважину под столб воды. По мере охлаждения ВВ в скважине происходит отвердевание заряда. Наличие в составе загущающих добавок придает составу водоустойчивость, но не избавляет состав от проблем расслоения заряда. Повышение вязкости, достигаемое введением загущающих добавок, не предотвращало полностью, а лишь уменьшало скорость осаждения твердой фазы. Даже при высоком содержании загустителей расслоение происходило до тех пор, пока раствор не закристаллизуется. Для уменьшения расслоения компонентов промежуток времени от попадания смеси в скважину до кристаллизации должен быть наименьшим. Это достигалось жестким соблюдением параметров раствора, но технологически в промышленных условиях было трудно осуществимо. Простым увеличением количества загущающих добавок эту проблему было не решить. Во-первых, резко повышалась вязкость ВВ, что затрудняло перекачивание его насосами, во-вторых, цена ВВ тоже повышалась. Проблема расслоения заряда была решена введением структурирующих добавок, которые превращали золи загустителей в гели, обладающие жесткой структурой. Введение в состав ГЛВВ сернокислого хрома позволило получить при минимальном содержании загустителя требуемые технологией параметры стабильности и текучести. Кроме того, акватолы приобрели водоустойчивость, т. к. структурированная сетка геля затрудняла диффузию растворимых компонентов. Раствор структурирующего агента вводился в зарядный шланг у места его присоединения к баку-смесителю СЗМ с помощью специальной форсунки [35].

С целью уменьшения цены и повышения безопасности использования ГЛВВ А. Н. Ханукаевым [36] было предложено в качестве горючего использовать природный горючий компонент — продукт переработки горючих сланцев ленинградского сланцевого бассейна. Такие составы были названы акванитами. Для загущения акванитов, наряду с известными загустителями, использовали бентонит с небольшими добавками различных солей, улучшающих его природные загущающие свойства. Большого распространения акваниты не получили, т. к. они содержат малораспространенные продукты переработки горючих сланцев, приходилось усложнять технологические цепочки процесса приготовления ВВ, кроме того, при их применении увеличивался удельный расход ВВ.

На карьерах Лебединского и Стойленского ГОКов при отбойке горной массы использовали водосодержащее ВВ местного изготовления — акватол Т-20ГМ. К 2000 г. объем использования акватола Т-20ГМ составил 20 тыс. т/год (85 % от общего расхода ВВ) [37]. В составе акватола Т20ГМ применялся дорогостоящий импортный загуститель KF-800, что тем не менее не избавило полностью от проблемы расслоения заряда в момент его заряжания и формирования [38, 39]. В результате расслоения заряда ухудшались результаты дробления верхней части уступа, приходилось увеличивать расчетный удельный расход ВВ на 20–30 % и сближать сетку скважин по сравнению с расчетной.

С целью решения проблемы расслоения было проведено исследование процессов формирования заряда акватола ГЛТ-20 (загуститель ПАА). Исследование

проводили сотрудники предприятия «КМВВзрывпром» и Днепропетровского научно-исследовательского химико-технологического института на разборной модели скважины в натуральную величину заряжаемой части, установленной в карьере Лебединского ГОКа [40]. Изучение процессов формирования заряда показали, что плотность сплошной жидкой фазы по колонке заряда меньше, чем удельный вес твердых частиц — аммиачной селитры и тротила, поэтому тротил опускается в нижнюю часть заряда. Вязкости недостаточно, чтобы препятствовать расслоению заряда. Это приводит к снижению в 1,5–2 раза энергетических характеристик, вследствие чего разрушается только нижняя часть взрываемого уступа, что отрицательно сказывается на качестве отбойки. Количество выделяющихся токсичных газов при этом увеличивается в 30–50 раз.

Использование в составах акваторов специальных структурирующих добавок приводит к усложнению технологического процесса приготовления и заряжания ВВ. Во-первых, необходим еще один добавочный компонент, который надо хранить, растворять и вводить в ВВ в процессе заряжания. Во-вторых, используемые в качестве структуризаторов химические соединения ядовиты, по степени воздействия на организм человека относятся к вредным веществам 1-го класса, что тоже усложняет их применение. Процесс структуризации заряда происходит с минимальной задержкой по времени, за это время ВВ надо успеть перемешать и перекачать в скважину, иначе произойдет структурирование заряда непосредственно в заряжаемом шланге. Кроме того, было установлено, что соединения хрома, входящие в состав акватора в качестве структуризаторов, катализируют экзотермическое разложение аммиачной селитры. Скорость разложения аммиачной селитры при повышенных температурах в их присутствии вырастает во много раз [41].

Анализируя опыт применения и перспективы совершенствования водосодержащих взрывчатых веществ, нельзя не затронуть проблемы безопасности их использования на карьерах. В 1988 г. в Сарбайском карьере Соколовско-Сарбайского ГПО в процессе заряжания произошло самопроизвольное разложение зарядов акватора, сопровождавшееся выбросом газообразных продуктов, изливанием из скважины части заряда и воспламенением [42]. Основной причиной разложения зарядов акватора Т-20, по мнению авторов, явилось химическое взаимодействие горячего раствора аммиачной селитры с сульфидными включениями пород заряжаемого блока. Начальный импульс к разложению аммиачной селитры дало взаимодействие сульфидов с содержащейся в горячем растворе аммиачной селитры «свободной азотной кислотой», образующейся в результате разложения аммиачной селитры в растворе окислителя при его нагревании до 110–120 °С и длительном хранении. Высокая температура приготовления раствора вызвана необходимостью избегать образование «тротильных пробок» в зарядных рукавах. Что, по мнению авторов работы [40], устраняется предварительным прогревом зарядных шлангов горячей водой. На основании результатов исследований взрывные работы с использованием акватора Т-20 на блоках северного борта запретили. Остальные блоки рекомендовали заряжать без забойки, с введением в скважину боевика не ранее чем через 3 ч после зарядки и в отсутствие реакции разложения. При рекомендованной технологии заряжания в процессе массовых взрывов были получены скважинные отказы при сдетонировавших боевиках. Анализ происшедшего показал, что причина все в том же — расслоение заряда. Органический загуститель при нагревании до высокой температуры и выдержке в течение нескольких суток подвергается термической деструкции, и его загущающая

способность падает. В нижней части заряда оседает тротил, в верхней части остается раствор аммиачной селитры. Что и подтверждено отказами детонации зарядов при верхнем расположении боевика.

Расслоение аквагола Т-20Г стало возможной причиной преждевременного взрыва ряда скважинных зарядов и взрывной сети и на Лебединском ГОКе [41, 43]. В обоих случаях, с целью предотвращения взаимодействия компонентов аквагола с сульфидными включениями руд и пород, было рекомендовано применение в составе окислителя горячельющихся ВВ 3 % карбамида вместо соответствующего количества аммиачной селитры.

Недостатки использования органических высокомолекулярных загустителей были преодолены при использовании неорганического компонента — кремниевого золя, который был предложен в качестве загустителя сотрудниками ИХТРЭМС и Горного института КНЦ РАН [44–46]. Неорганический загуститель не подвергается деструкции и не окисляется в горячем растворе окислителя. На основе кремнегелевого загустителя было разработано водосодержащее взрывчатое вещество аквагол Т-20ГК. На ОАО «Апатит» для загущения раствора окислителя было предложено использовать золь кремниевый, получаемый кислотным разложением нефелинового концентрата. На ОАО «Олкон» использовали кремниевый золь, получаемый кислотной обработкой раствора жидкого стекла.

Дальнейшее совершенствование составов водосодержащих ВВ пошло по пути замены части гранулированного тротила на более дешевые горючие компоненты [6, 47, 48]. Замена части гранулированного тротила в составах водосодержащих ВВ на минеральные масла позволила не только регулировать параметры детонационного процесса, но и повысить их экономическую эффективность и безопасность применения.

В период совершенствования акваголов в странах с развитой горнодобывающей промышленностью появился новый класс промышленных ВВ под общим названием «эмульсионные взрывчатые вещества». Разработка эмульсионных ВВ проводилась на принципиально новой как по компоновке рецептур, так и технологии получения. Идея разработки ЭВВ состоит в том, что переведенный в раствор окислитель является внутренней (дисперсной) фазой эмульсии, а другую фазу образует жидкое или расплавленное гидрофобное горючее, что позволяет получить тесный контакт окислителя с горючим и их гомогенное распределение по объему взрывчатого состава. Такой контакт придает составам ряд уникальных свойств, которых невозможно достичь обычными механическими методами смешения компонентов. С помощью ЭВВ стало возможным получение безопасных в обращении рецептур промышленных ВВ одновременно с высокой чувствительностью к детонационному импульсу, то есть при низкой чувствительности к механическим воздействиям они могут детонировать в зарядах малого диаметра при инициировании от капсуля-детонатора. Получаемая при смешении эмульсионная структура состава с микроскопической пленкой горючего на мельчайших частицах окислителя обеспечивает новому классу промышленных ВВ высокую водоустойчивость и дает возможность использования их по технологии заряжания вслед за бурением. Особого внимания заслуживает экологическая чистота ЭВВ, которая обеспечивается как при взрывчатом превращении, так и при контакте их до взрыва с породами и грунтовыми водами за счет сбалансированного кислородного баланса рецептур и малой поверхности контакта с водой. В состав ЭВВ могут вводиться различные добавки простым смешением как в раствор окислителей, так и в готовую эмульсию. Первые опыты применения ЭВВ показали их преимущества перед другими классами промышленных ВВ: высокая безопасность к механическим и тепловым

воздействиям; возможность регулирования взрывчатых характеристик с широким интервалом рабочих плотностей; хорошая водоустойчивость. В результате, взрывчатые характеристики сохраняются как в проточной воде, так и на большой глубине. Составы обладают чувствительностью при инициировании от обычного стандартного капсюля. Отсутствует пыление, электризация и контакт с токсичными продуктами. Полная механизация процесса зарядания шпуров и скважин. Близкий к нулевому кислородный баланс за счет сбалансированного содержания окислителя и горючего, что обеспечивает при взрыве газовыделение с низкой токсичностью. Универсальная технология изготовления для выпуска различных типов ЭВВ, включая невзрывчатые компоненты. Доступная и относительно не дорогая сырьевая база дает возможность получить одно из самых недорогих промышленных ВВ с высокой технико-экономической эффективностью применения. Различные области использования ЭВВ на открытых и подземных работах, в том числе в шахтах, опасных по пыли и газу; контурное взрывание; промежуточные детонаторы; специальные взрывные работы. При получении ЭВВ и ведении взрывных работ с их применением возможны полная механизация и автоматизация производственных процессов изготовления, транспортирования и зарядания взрывных полостей.

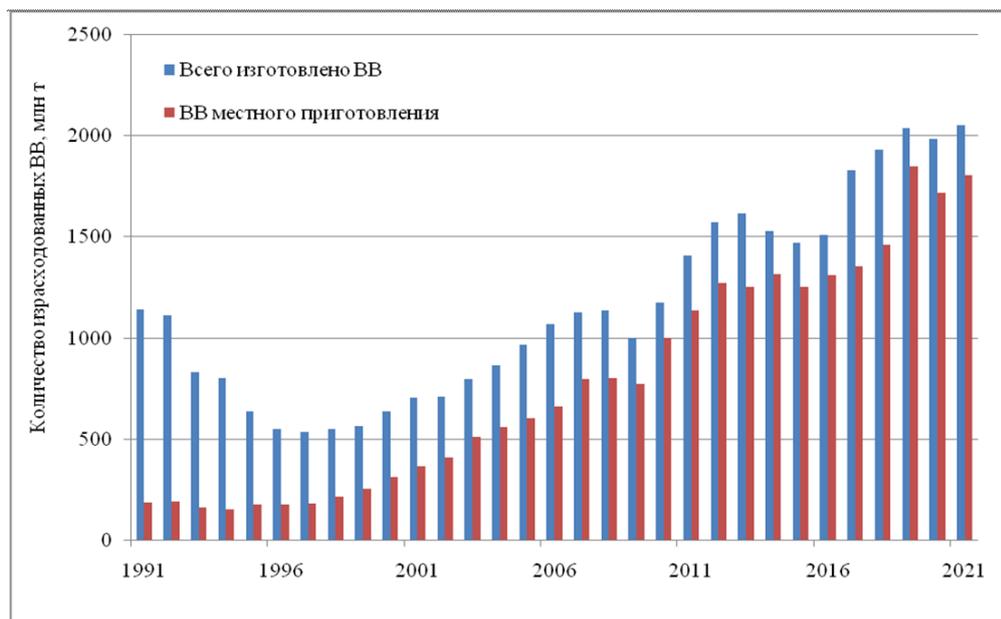
Со времени своего основания в 1953 г. ГосНИИ «Кристалл» проводил исследования и осуществлял разработку новых взрывчатых веществ и технологических процессов их производства. Институт первым еще в СССР возглавил и развернул исследования по разработке отечественных ЭВВ типа порэммитов, которые пришли на замену гранулолиту и другим тротилсодержащим материалам. Институт в 1983–1986 гг. на основе анализа мирового опыта провел комплекс исследований, в результате которых в конце 1987 г. было запущено первое промышленное производство отечественных эмульсионных ВВ под торговой маркой «порэммит» [49]. До 1990 г. были введены четыре отечественные промышленные установки производства порэммита по технологии ГосНИИ «Кристалл», в том числе два заводских производства (ОАО «Знамя», г. Киселевск; ЗАО «Кузбассэмульсия», г. Кемерово), и два прикарьерных стационарных пункта (ОАО «Апатит», ОАО «Ураласбест»). В настоящее время в России по технологии ГосНИИ «Кристалл» эксплуатируется 14 промышленных производств ЭВВ, в том числе запущено производство ЭВВ в Украине, Таджикистане, Казахстане [50]. По основным физико-химическим и взрывчатым показателям зарубежные и российские эмульсионные составы находятся на одном уровне.

### **1.1. Ассортимент промышленных взрывчатых веществ, применяемых в России**

На многих горных предприятиях России в начале 1990-х гг. в связи с резко изменившимися экономическими условиями в стране, постоянным ростом цен на взрывчатые материалы и тарифов на их перевозку необходимым стало снижение затрат на ВВ при условии получения высококачественной подготовки горной массы. Возникла насущная необходимость изготовления ВВ на местах их применения. В первую очередь, простейших, несмотря на то, что применение их ограничено в связи с их недостатками. Это отсутствие водоустойчивости, снижение взрывчатых характеристик при увеличении влажности, относительно низкая мощность, трудности при их применении для взрывания обводненных, трудно и исключительно трудно взрывающихся пород.

В период с 1991 по 1995 гг. в России произошло существенное снижение объемов применения ВВ, связанное с падением объемов производства взрывных работ [51]. Ситуация стабилизировалась в 1996 г., и с 1997 г. началось

увеличение потребления ВВ (рис. 1). В 2007 г. количество использованных взрывчатых веществ впервые превысило максимальный объем их потребления на территории РСФСР до распада СССР (около 1100 тыс. т).



**Рис. 1.** Количество промышленных взрывчатых веществ, израсходованных организациями, ведущими взрывные работы на территории Российской Федерации [51]

Общее количество промышленных ВВ, израсходованных организациями, ведущими взрывные работы, по сравнению с 1991 г. увеличилось почти в два раза. За последние 30 лет более чем в десять раз произошел прирост производства ВВ на местах ведения взрывных работ. В основном, начиная с 2017 г, рост объемов потребления взрывчатых материалов происходит за счет увеличения добычи угля открытым способом.

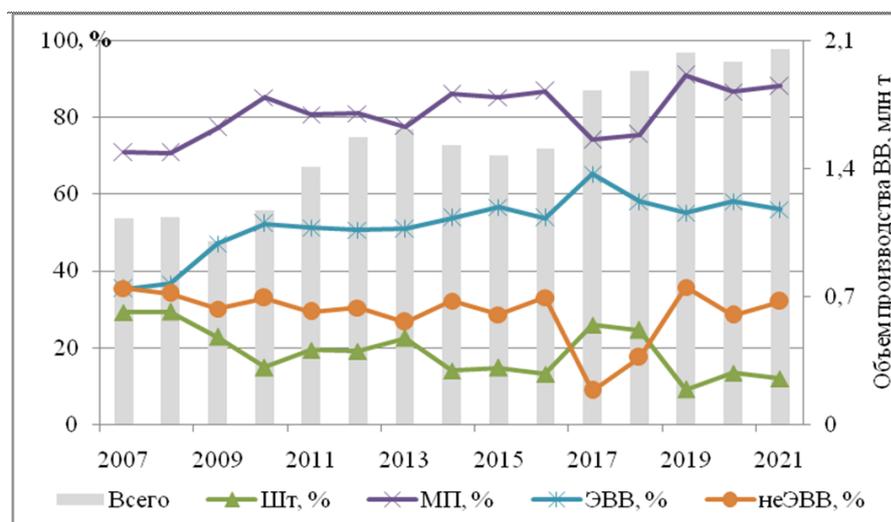
Ассортимент применяемых в России ВВ, предназначенных для взрывания на земной поверхности и в забоях подземных выработок шахт, не опасных по газу или пыли, установлен Приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 сентября 2011 г. № 537 в «Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации» [52]. В перечне значится 144 наименования. Из них вблизи мест применения изготавливается 57 составов 1 класса и 12 составов 2 класса. Это гранулированные, водосодержащие и эмульсионные составы (табл. 1).

В последние годы на большинстве крупных горнорудных предприятий и угольных разрезов были построены пункты по производству гранулированных ВВ или приготовления эмульсий для эмульсионных ВВ. При этом для производства эмульсий практически везде используется отечественная аммиачная селитра. За счет увеличения доли применения ВВ, изготовленных из невзрывчатых компонентов вблизи мест их потребления, были существенно сокращены объемы перевозок ВВ по территории Российской Федерации. Промышленные ВВ, которые в своем составе содержат индивидуальные ВВ, выпускают в основном на заводах.

## Ассортимент промышленных взрывчатых веществ по условиям применения [52]

Условия применения ВВ	Изготовитель	Тип взрывчатого вещества		
ВВ, предназначенные для взрывания только на земной поверхности (I класс)	Поставляются производителями ВВ (43 наименования)	<b>Гранулированные и порошкообразные:</b> типа алюмотол, аммонал скальный № 3, гранулотол, 9 разновидностей граммонитов, 3 гранипора, граммопор, дибазит и нитропор; гранулиты 6 марок, граномон, диаммон, дитолан, тротил-У и порох дымный; 5 составов без ТНТ	<b>Водосодержащие:</b> граммонит РЗ-30, гранипор ВГ и селипор в патронах 90 и 120 мм	<b>Эмульсионные (10 типов):</b> 4 типа порэмитов, эмигран П и эмуласт; АС-30ФП в патронах, эмульсен И-90, эмульсолиты, заряды эмульсионно-пороховые ЗЭП-90
	Изготавливаются вблизи мест применения (57 наименований)	<b>Гранулированные:</b> гранулиты 13 типов	<b>Водосодержащие:</b> 14 наименований (акванал, акванит, акватолы, ифзанит, карбатолы)	<b>Эмульсионные:</b> 30 наименований (амфорэм-АП, грамфорэмы, гранэмиты, нитрониты, порэмиты, сибириты, сларрит, тованы, фортис, эмуланы, эмулиты)
ВВ, предназначенные для взрывания на земной поверхности и в забоях подземных выработок шахт, не опасных по газу или пыли (II класс)	Поставляются производителями ВВ (32 состава)	<b>Гранулированные:</b> граммониты, граммотолы и гранулиты; <b>порошкообразные:</b> аммоналы, аммониты, детонит М, ЗКВК	–	<b>Эмульсионные:</b> (3 состава)
	Изготавливаются вблизи мест применения (12 составов)	<b>Гранулированные:</b> гранулиты и игданиты	–	<b>Эмульсионные:</b> колымиты и сабтэк

В России все крупные горнодобывающие предприятия (АО «Апатит», АО «Лебединский ГОК», АО «Кольская ГМК», АО «Ковдорский ГОК», АО «Качканарский ГОК “Ванадий”», АО «Карельский окатыш», АО «Михайловский ГОК», угольные разрезы «Нерюнгринский», «Междуреченский», «Бачатский» и др.) в настоящее время обеспечивают свои потребности во взрывчатых веществах за счет их производства на стационарных пунктах, мини-заводах и в передвижных установках. При этом часто производителями ПВВ являются не горнодобывающие комбинаты, а частные компании. Соотношение по типам применяемых ВВ с 2007 по 2021 гг. показано на рис. 2 [51].



**Рис. 2.** Динамика объемов производства и потребления ВВ за 2007–2021 гг.

Количество примененных эмульсионных ВВ вот уже 10 лет практически не меняется (более половины от общего объема ВВ). Почти в два раза снизилась доля заводских ПВВ — до 12 %. Тротилсодержащие составы имеют в объеме потребления только 6 %.

Анализ объемов потребления ВВ, их ассортимента и распределения по типам показывает, что в настоящее время в Российской Федерации основная часть ВВ представлена смесевыми аммиачно-селитренными составами, которые изготавливаются в непосредственной близости от мест потребления на стационарных пунктах горных предприятий: это эмульсионные и гранулированные бестротиловые составы.

На земной поверхности используют гранулированные аммиачно-селитренные ВВ с тротилом в составе, так и бестротиловые, а также в большом количестве эмульсионные смесевые составы. В условиях подземных горных работ применяют гранулированные тротилсодержащие и бестротиловые смеси, и в небольшом объеме эмульсионные составы. Водосодержащие ВВ практически не используются.

На карьерах и рудниках Мурманской области ситуация была схожей с общим положением при ведении взрывных работ в стране. Тем не менее имелись некоторые отличия.

О работах, проведенных совместно со специалистами горных предприятий региона пойдет речь дальше.

## 2. ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА ДЛЯ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД В УСЛОВИЯХ ПОДЗЕМНЫХ РУДНИКОВ РОССИИ

Выпускаемый в России ассортимент ПВВ достаточно широк и разнообразен и включает в себя более 200 составов для горнодобывающей отрасли промышленности, из которых более 60 изготавливается на местах применения [53]. Для механизированного заряжания на подземных горных работах допущено 23 гранулированных взрывчатых состава. Граммониты: М марок 5, 10, 15 и 21, ТМ и ТММ. Грамотолы марок 10, 15 и 20 и Т-18. Седитол марок 10 и 10П. Гранулиты: АС-4, АС-4В, АС-8, АС-8В, АС-М, АФ марок АФ-7 и АФ-12, М, МГ-10, АЗ, А6, Д-5, игданит, игданит П, МП марок 3МП, 5МП и 5МП-Г, ПС марок ПС-1 и ПС-2, ПМ и РП (РП-1 и РП-2) [52].

Длительное время на всех подземных рудниках Хибин для отбойки горной массы применялся граммонит 79/21, сенсibilизированный чешуиrowанным тротилом, который по своей эффективности при отработанных для каждого горно-геологических условий параметрах буровзрывных работ полностью удовлетворял производство по условиям дробления. В связи с тем, что тротил является токсичным и канцерогенным веществом, а также не безопасным при зарядании скважин и невозможности его совмещения при зарядке скважин комбинированными зарядами, особенно с алюмосодержащими, Госгортехнадзор России запретил его использовать на подземных горных работах. Взамен граммонита 79/21 на подземных рудниках ОАО «Апатит» при производстве массовых взрывов стали применять гранулит АС-8, который после трагического случая на Расвумчоррском руднике также был запрещен к применению в подземных условиях.

В связи с запретом граммонита 79/21 были разработаны рецептуры гранулированных ВВ, названных грамотолами. В грамотолах чешуиrowанный тротил был заменен на гранулированный, а часть тротила — на жидкие нефтепродукты. Грамотолы, содержащие 10, 15 и 20 % тротила, стали изготавливаться на заводах.

Использование дизельного топлива в смесях аммиачной селитры с гранулолом недостаточно обосновано с позиций взаимодействия системы «ТНТ-ДТ», а незначительный опыт использования составов этого типа не позволил в полной мере оценить их взрывчатые характеристики. В научно-технической литературе отсутствуют данные по детонационным особенностям смесей ТНТ-АС-ДТ. Однако существует ряд работ, в которых детально изучены детонационные свойства тротила; смесей тротила и аммиачной селитры; аммиачной селитры и дизельного топлива.

В исследовании взрывной эффективности грамотолов, выполненных в Горном институте КНЦ РАН, установлена их склонность к затуханию детонационного процесса по длине заряда в связи с флегматизирующим действием дизельного топлива на гранулы тротила [54]. Известно, что детонация гранулированных ВВ, каковыми являются и тротил и смесь АС-ДТ, протекает в форме взрывного горения. Детонационный процесс начинается на поверхности частиц в результате их адиабатического сжатия ударной волной и далее распространяется в форме горения вглубь частиц (зерен). Этот механизм нашел подтверждение в ряде научных исследований [55]. В пользу механизма взрывного горения указывает тот факт, что взрывчатые характеристики

смесей ТНТ-АС зависят от крупности компонентов. В работе [54] были сформулированы следующие положения:

- механическую смесь ТНТ-АС-ДТ можно представить в виде системы состоящей из двух ВВ: индивидуального взрывчатого вещества — тротила с отрицательным кислородным балансом и взрывчатой смеси АС-ДТ с положительным кислородным балансом. Детонация смеси ТНТ-АС-ДТ осуществляется постадийно: разложение тротила, разложение аммиачной селитры и далее взаимодействие дизельного топлива и продуктов разложения тротила и селитры между собой;

- детонационная способность смесей ТНТ-АС-ДТ будет зависеть от крупности компонентов, причем большое влияние на взрывчатые характеристики будет оказывать крупность тротила как наиболее реакционноспособного компонента;

- энергетические характеристики стехиометрических смесей ТНТ-АС-ДТ будут снижаться при изменении количественного соотношения между аммиачной селитрой и дизельным топливом (вследствие налипания части дизельного топлива на поверхность тротила), т. к. взрывчатые характеристики смеси АС-ДТ наиболее сильно зависят от содержания горючего в диапазоне от 0,3 до 4 %;

- детонационную способность смеси ТНТ-АС-ДТ при прочих равных условиях можно повысить за счет увеличения площади контакта между гранулами аммиачной селитры и дизельным топливом.

Таким образом, для приготовления смесей ТНТ-АС-ДТ необходимо использовать пористую аммиачную селитру, стремиться к снижению крупности тротила и селитры, а также обеспечить условия, при которых дизельное топливо, входящее в состав смеси АС-ДТ, распределялось бы преимущественно по поверхности гранул аммиачной селитры [54].

При переходе на новые взрывчатые вещества грамотолы при отбойке руды глубокими скважинами был выявлен ряд недостатков их применения — в ряде случаев не достигнуто требуемое качество дробления руды при скважинной отбойке; ухудшились показатели выпуска; увеличились потери и разубоживание; в процессе заряжания были зафиксированы случаи превышения ПДК по концентрации паров нефтепродуктов.

В целом использование смесей ТНТ-АС-ДТ в определенной степени улучшает санитарно-гигиенические условия труда в подземных выработках по наиболее токсичному компоненту — тротилу, несколько снижает, но не исключает вероятности электризации взрывчаты ВВ. Вместе с тем взрывные характеристики грамотолов существенно ниже, чем, например, граммонита 79/21 [54].

Известно, что в смесевых составах соотношение размеров частиц зависит от соотношения массовых долей компонентов. Если горючего в смеси содержится меньше, чем окислителя, то и размер его частиц должен быть меньше. Уменьшение диаметра гранул окислителя при наличии крупных частиц горючего не повышает детонационную способность ВВ.

Так, для граммонита 79/21, изготовленного с использованием чешуек тротила, размеры которых после пневмозаряжания значительно меньше гранул селитры, имеет место более равномерное его распределение по заряду ВВ по сравнению с гранулированным тротилом, используемым в смесях ТНТ-АС-ДТ, что облегчает процессы диффузионного перемешивания продуктов разложения и приводит к более полному выделению энергии в зоне реакции детонационной волны и, соответственно, повышению скорости

детонации. Поэтому граммонит 79/21 обладает высокой бризантностью и хорошо зарекомендовал себя при отбойке горных пород в подземных условиях.

В граммотолах (Т-18, Т-20) размер гранул тротила по техническим условиям должен составлять не более 5 мм. Но в поставляемых партиях этих ВВ, размеры гранул тротила значительно отличаются от заявленных в технических условиях и во многих случаях составляли от 3 до 10 мм, что противоречит основному принципу составлению рецептур смесевых ВВ. Как отмечено в работе [56], причиной снижения взрывной эффективности смесей АС-ДТ с гранулированным тротилом является потеря однородности сформированного в скважине заряда ВВ, т. к. при пневмозаряжении в большей степени измельчаются гранулы АС, а гранулы тротила, прочность которых приближается к литому тротилу, измельчаются незначительно. При этом из-за различных плотностей и крупности АС и ТНТ при пневмозаряжении формируется колонка заряда не только неоднородная по грансоставу, но и с неравномерным распределением компонентов по сечению и длине колонки заряда. В определенных условиях, при недостаточном давлении на фронте волны, гранулы тротила будут сгорать, как обычное органическое вещество, не участвуя в детонационном процессе взрывчатого превращения смеси [56].

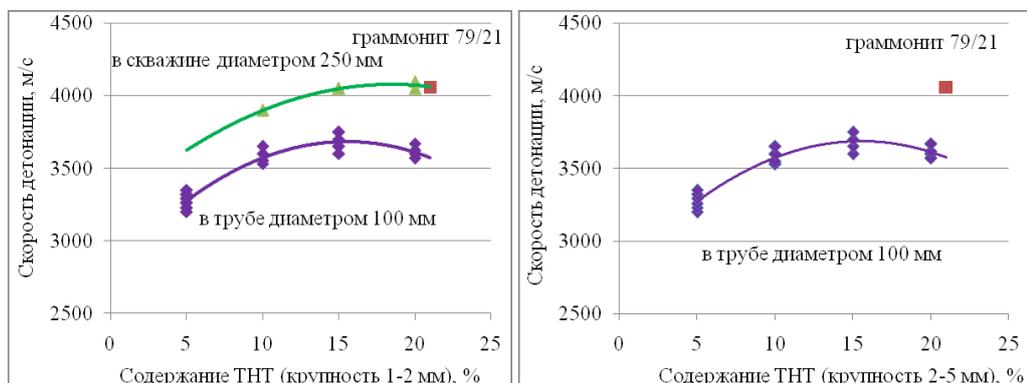
Повысить взрывчатые характеристики таких составов возможно лишь за счет уменьшения размеров гранул тротила. Подтверждением данного положения являются проведенные эксперименты в полигонных и натуральных условиях.

В первой серии экспериментов были выбраны составы с содержанием гранулированного тротила от 5 до 20 % крупностью 2–5 мм, а во второй — с крупностью гранул тротила 1–2 мм при том же процентном соотношении. Это процентное соотношение гранулированного тротила было выбрано исходя из того, что для подземных условий допущены граммотолы именно с таким содержанием тротила — Т-5, Т-10, Т-15 и Т-20. В качестве окислителя использовалась пористая аммиачная селитра ОАО «Акрон» со средним размером гранул 1,78 мм. Скорость детонации измерялась с использованием оптоволоконной регистрации на двух базах, расположенных на удалении не менее 109 диаметров заряда от плоскости инициирования. В экспериментах для формирования зарядов использовались стальные трубы внутренним диаметром 100 мм и длиной 1 м. Данные о скорости детонации смесей в зависимости от содержания тротила представлены на рис. 3. Видно, что при уменьшении содержания тротила с 15 до 5 % в обоих случаях наблюдается снижение скорости детонации ВВ, причем скорости детонации значительно меньше расчетных. Из экспериментальных данных также следует, что тротил является основным компонентом, определяющим скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ. Наиболее высокая скорость детонации характерна для граммонита 79/21, изготовленного с использованием чешуек тротила. При уменьшении крупности тротила до 1–2 мм происходит заметное повышение скорости детонации. Особенно это характерно для смесей, содержащих 15–20 % тротила.

Так как наибольшей детонационной способностью обладают смеси ТНТ-АС-ДТ, содержащие 15 и 20 % тротила, эти составы были выбраны для натуральных экспериментов.

Скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ в натуральных условиях измерялась в скважинах диаметром 250 мм. Заряды готовились с количеством дизельного топлива, при котором кислородный баланс ВВ был равен нулю. В результате замеров скорости детонации смесей ТНТ-АС-ДТ в зарядах диаметром 250 мм установлено,

что скорости детонации смесей, содержащих 15 и 20 % тротила крупностью 2–5 мм, практически одинаковы и равны 4085 и 4090 м/с соответственно.



**Рис. 3.** Скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ

Согласно данным К. К. Шведова, скорость детонации граммонита 79/21 на чешуйчатом тротиле в зарядах 250 мм равна 4150 м/с. Отсюда следует, что даже в зарядах большого диаметра скорость детонации смесей ТНТ-АС-ДТ, при диаметре гранул тротила больше диаметра гранул окислителя, меньше, чем для граммонита 79/21 на чешуйчатом тротиле. Использование в смесях тротила крупностью 1–2 мм приводит к повышению скорости детонации, что позволяет по взрывной эффективности довести их до уровня граммонита 79/21.

Специалисты ФКП «Бийский олеумный завод» в качестве альтернативы гранулолола предложили использовать гранулолол М, продукт, содержащий частицы тротила определенной дисперсности, который выпускается по техническим условиям ТУ 7276-045-07511608-2000 [57]. Предполагалось, что высокая прочность гранул на раздавливание существенно снизит интенсивность образования тонкодисперсной фракции при пневмотранспортировании, а, следовательно, и пылевыведение и электризуемость аэрозвеси взрывчатой смеси. На основе гранулолола М разработано взрывчатое вещество II класса граммонит М21, состоящий из 21 % гранулолола М и 79 % гранулированной аммиачной селитры [58], в составе которого отсутствует жидкий нефтепродукт, провоцирующий забивание шлангов при пневмозарядании.

Впервые испытания граммонита М21 провели на Казском руднике (Кемеровская область), разрабатывающем железорудный массив крепостью 14–16 по шкале профессора М. М. Протоdjяконова. Применяемые системы разработки — этажное принудительное обрушение и этажно-камерная добыча руды. Отбойку блоков производили пучками скважинных зарядов диаметром 105 мм. Зарядание осуществляли с помощью машины МЗКС-160. Дальность транспортирования составляла 300 м с подъемом на вышележащий горизонт на высоту до 70 м. Транспортирование и зарядание граммонита М21 происходило стабильно, без налипания мелких частиц на внутренние поверхности зарядного шланга. Отбойку массива производили в полном объеме [59–61].

Граммонит М21 в шпурах диаметром 40–45 мм впервые был испытан в ОАО «Гайский ГОК». Пневмозарядание осуществляли зарядным устройством ЗП-2

по шлангу длиной 7 м с внутренним диаметром 20 мм. Заряжание граммонита М21 проведено без налипания взрывчатой смеси в шланге [59–61].

При пневмозаряжении скважин в ОАО «Абазинское рудоуправление» была экспериментально определена критическая плотность заряжания граммонита М21, равная 1,5 г/см<sup>3</sup>. Рекомендуемая плотность заряжания граммонита М21 — от 0,85 до 1,25 г/см<sup>3</sup>. Ее регулирование осуществляется путем изменения начального давления в транспортном трубопроводе, которое зависит от диаметра и длины шланга, вида и числа местных сопротивлений, высоты подъема транспортируемого материала [59–61].

В условиях подземных рудников ОАО «Апатит» граммонит М21 применялся в веерах восстающих скважин диаметром 102 мм, куда заряжался зарядной установкой Paus. Длина скважин варьировалась от 11 до 35 м, длина зарядного трубопровода — от 50 до 300 м. При заряжении скважин налипания взрывчатой смеси на стенки зарядных шлангов отмечено не было [62]. Проведенные замеры скорости детонации в скважинах диаметром 105 мм показали, что наибольшая скорость детонации составляет 4000 м/с при плотности заряжания 1050 кг/м<sup>3</sup>, что значительно выше, чем для грамммотолов Т20 (3800 м/с), но ниже, чем для граммонита 79/21 на чешуйчатом тротиле (4100 м/с).

Не смотря на указанный выше положительный опыт применения граммонита М21, при замене чешуированного тротила на более прочный гранулированный тротил, зарегистрировано снижение взрывных характеристик смеси. Это снижение прогнозируемо, т. к., достигнув безопасности за счет предотвращения измельчения тротила, получается заряд с разобщенными по массе порошкообразной селитры целыми частицами гранулолота.

При определении перспектив развития и совершенствования применяемых в России тротилсодержащих гранулированных ВВ, сопоставить их с международным опытом не представляется возможным, т. к. в мире механизированное заряжание этих типов ВВ не допускается, а использование тротила в качестве коммерческого взрывчатого вещества, например в Китае, запрещено с 2007 г. Причины запрета применения тринитротолуола — его высокая токсичность. Тринитротолуол по степени воздействия на организм человека относится ко второму классу опасности — вещество высоко опасное [63]. Предельно допустимая концентрация аэрозоля тринитротолуола в воздухе рабочей зоны 0,1 мг/м<sup>3</sup>. Отравление тринитротолуолом возможно не только при вдыхании и заглатывании пыли, но и при контакте через неповрежденную кожу и слизистые оболочки. Тринитротолуол обладает кумулятивным действием, имеет способность накапливаться в организме. При длительном воздействии тринитротолуола на организм рабочих даже в малых количествах возможны поражения почек и печени, развитие катаракты.

Однако, несмотря на указанные недостатки гранулолота, граммониты и грамммотолы все же применяются. Это обусловлено главным преимуществом тротила, используемого как в качестве собственно взрывчатого вещества, так и компонента смесевых взрывчатых веществ, — являясь достаточно сильным бризантным ВВ, он обладает сравнительно низкой чувствительностью к механическим воздействиям и химической нейтральностью.

Тем не менее очевидность проведения исследований по полной замене тротилсодержащих взрывчатых веществ, стала более актуальной.

## 2.1. Гранулиты типа АС-ДТ на основе гранулированной аммиачной селитры

В зарубежной практике при механизированном зарядании скважин используют взрывчатую смесь ANFO (российский состав АС-ДТ). Это механическая смесь пористых сортов гранулированной или кристаллической аммиачной селитры с горючей жидкой добавкой (например, дизельным топливом). В соответствии с технологическими требованиями взрывных технологий компонентный состав смеси варьируется, но в незначительном диапазоне. При этом сохраняются свойства, обусловленные требованиями механизированной переработки.

Фирмой Du Pont (США) для механизированного зарядания предлагается ряд взрывчатых составов на основе гранулированной аммиачной селитры, наиболее полно удовлетворяющий условиям производства: гранулированные составы SP-2AN, ANFO-P, Nilite R-303 насыпной плотности в пределах 0,75–0,85 г/см<sup>3</sup>, содержащие до 6 % жидкого горючего. Взрывчатые составы на места ведения взрывных работ поставляются в готовом виде в многослойных бумажных мешках массой 20 или 32 кг. Взрывчатый состав, с жидкой добавкой, характеризуется некоторым ухудшением сыпучести смеси. Это накладывает свои требования к конструкции транспортирующих и заряжающих устройств. Кроме того, забои должны хорошо проветриваться и в процессе пневмозарядания, и при удалении газообразных продуктов взрыва [64].

Согласно данным специалистов ЗАО «Взрывиспытания» в США доля взрывчатых смесей ANFO в общем объеме потребления составляет почти 80 %, аналогичная картина наблюдается в других странах, в России доля АС-ДТ составляет около 20 % [65]. В отечественной практике подземных горных работ смеси АС-ДТ местного изготовления для отбойки горной массы практически не использовались, вследствие низкой детонационной способности и низкой физической стабильности заряда, связанных с проблемой удержания горючих добавок гранулами плотной аммиачной селитры и выносом дизельного топлива потоком воздуха при пневматическом зарядании шпуров и скважин. Для эффективного применения смесей такого типа в условиях подземных горных работ определяющим является плотность и структура заряда, формирующегося пневмозаряданием.

Энергетические характеристики простейших взрывчатых смесей, а также количество токсичных газов, выделяющихся при их взрыве, что особенно важно при применении их в подземных условиях, в первую очередь зависят от качества гранулированной селитры, ее пористости, дисперсности и влажности. Наличие достаточного количества пор в гранулах селитры определяет способность и восприимчивость детонационного импульса. Структура гранул зависит от способа получения селитры.

Пористость гранул аммиачной селитры складывается из двух составляющих: открытой пористости, обеспечивающей удержание такого количества жидкого горючего, которое необходимо для получения оптимальных энергетических параметров смесей, т. е. для обеспечения нулевого кислородного баланса, а также закрытой пористости. Закрытая пористость при соответствующем инициировании обеспечивает надежную детонационную способность смесей. Так, например, применение в составе взрывчатого вещества ANDEX 2000 гранул аммиачной селитры с увеличенной на 25 % внутренней удельной поверхностью, меньшей плотности и более мелких фракций по сравнению со стандартной гранулированной

аммиачной селитрой позволило снизить удельный расход ВВ на 5 %, а количество токсичных газов NOx и CO на 33 % [66].

Ранее, в связи с малочисленностью объемов пористых сортов аммиачной селитры, выпускаемой отечественными производителями и низким ее качеством, в России получили развитие следующие направления, связанные с разработкой способов повышения физической стабильности смесей аммиачной селитры с дизельным топливом:

1) увеличение впитывающей способности АС путем измельчения, термообработки, вакуумирования гранул селитры и введения в состав АС поверхностно-активных веществ;

2) применение горючих или инертных стабилизирующих добавок, обладающих высокой сорбционной способностью к жидким нефтепродуктам.

Необходимо отметить, что повышение впитывающей способности АС путем измельчения гранул снижает ее сыпучесть и повышает слеживаемость [67].

Простейшие смеси, приготовленные с использованием вакуумированной аммиачной селитры, отличаются высокой стабильностью и сохраняют сыпучесть даже при низких температурах. Однако предварительное вакуумирование технологически сложно и требует больших материальных затрат [68].

Технологический процесс получения селитры с высокой адгезионной способностью к ДТ, основанный на введении поверхностно-активных веществ, может быть реализован только в заводских условиях.

В условиях горнорудных предприятий с наименьшими эксплуатационными затратами повысить физическую стабильность смесей АС-ДТ можно за счет введения в состав стабилизирующих добавок таких, как аэросил, угольный порошок, полистирол, древесная мука, полимерные смолы и т. п. Широкое применение стабилизирующих добавок сдерживалось либо из-за их высокой стоимости, либо ограниченности сырьевой базы для их получения, либо необходимости проведения значительного количества подготовительных операций [67].

Первым смесевым составом, разработанным в КНЦ РАН (г. Апатиты), стало смесевое взрывчатое вещество гранулит-АК. В составе типа АС-ДТ в качестве стабилизирующей добавки применен аморфный кремнезем (АК), один из продуктов азотно-кислотной технологии переработки нефелина и отходов апатитовой флотации. Использование в АС-ДТ порошка АК с высокой удельной поверхностью (до 200 м<sup>2</sup>/г) позволило получить физически стабильный состав с высокими детонационными характеристиками. Гранулит-АК прошел полный цикл промышленных испытаний и решением Госгортехнадзора был допущен к постоянному применению [69]. Применения гранулита-АК на горнорудных предприятиях не случилось по причине отсутствия товарного количества аморфного кремнезема. Промышленного внедрения технологии комплексной переработки нефелинового сырья не произошло.

Работы по разработке способов повышения физической стабильности и детонационной способности гранулитов продолжились в Горном институте КНЦ РАН. Было установлено, что наиболее перспективным способом в условиях Кольского региона, позволяющим стабилизировать взрывчатые характеристики смесей АС-ДТ и тем самым повысить эффективность взрывной отбойки, является введение в состав смеси вермикулита Ковдорского месторождения.

Вермикулит — минерал, относящийся к триоктаэдрическим слоистым алюмосиликатам со структурой типа 2:1. Он образуется в результате предельной вермикулитизации слюды — флогопита и биотита. В процессе вермикулитизации слюды происходит гидратация межпакетного пространства с одновременным удалением калия и частичным замещением его другим катионом (преимущественно магния), а также окислением двухвалентного железа.

Химический состав вермикулита заметно колеблется, что определяется в основном характером исходной слюды и географическими условиями процесса ее гидратации. Как правило, суммарное количество  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$  составляет 77–79 %, количество связанной и свободной воды — от 19–21 %, закиси железа, калия и натрия — доли процента [70].

Особенностью вермикулита является способность к вспучиванию при термообработке с увеличением объема в 10–15 раз. Процессы, вызывающие вспучивание вермикулита, т. е. расслоение его чешуек перпендикулярно к плоскостям спайности под действием высоких температур, обусловлены в основном наличием воды на спайных поверхностях пакетов вермикулита и в межуатомных промежутках кристаллической решетки. Вспучивание вермикулита происходит за счет давления микродоз пара, образующегося в замкнутых межслоевых пространствах, в результате чего наблюдается резкое увеличение суммарной пористости. Образующиеся поры характеризуются размерами от 15 до 2000 А (мезопоры) и более 2000 А (макропоры). Доступность этих пор определяет способность вспученного вермикулита к высокому водопоглощению — 150–300 % по весу в сутки. Объемный вес вспученного вермикулита может изменяться от 100 до 600 кг/м<sup>3</sup> и обусловлен степенью вспучивания вермикулита, фракционным составом, наличием негидратированных частиц исходной слюды и пустой породы. Гидрофобизированный вермикулит имеет большую удельную поверхность и обладает значительной маслосемкостью при малом водопоглощении, что делает перспективным его использование в качестве стабилизатора смесей АС-ДТ.

С целью снижения водопоглощения и повышения маслосемкости вермикулита в лаборатории геоэкологии Горного института КНЦ РАН разработан способ получения гидрофобизированного вермикулита (ВК). Одновременный обжиг вермикулита и его обработка углеводородами нефтяного происхождения в струе раскаленных газов при температуре 670–850 °С позволяет получить вспученный вермикулит с четко выраженными гидрофобными свойствами за счет нанесения на его активную поверхность продуктов сгорания углеводородов. Создание гидрофобного слоя обеспечивается по всему сорбционному объему вермикулита [71].

С использованием гидрофобизированного вермикулита было разработано смесевое взрывчатое вещество гранулит-ВК. Испытания гранулита-ВК на подземных горных работах проводились в очистных и проходческих забоях. Приготовление гранулита-ВК осуществлялось на стационарном подземном пункте, расположенном в северном откаточном штреке гор. +290 м рудника «Умбозеро» Ловозерского ГОКа. Технологический процесс приготовления гранулита-ВК был следующим: аммиачная селитра и гидрофобизированный вермикулит в определенной пропорции загружались в пневматический зарядчик ЗМК-1. С помощью сжатого воздуха смесь подавалась в накопительный бункер — нагнетательную камеру от зарядчика «Ульба-400». Далее смесь под действием силы тяжести поступала в зарядчик ЗМК-1. К зарядчику была подключена емкость для дизельного топлива. При открывании клапана сжатого воздуха смесь вермикулита и селитры поступала в дозирующую камеру зарядчика, где равномерно в определенной пропорции обогащалась дизельным топливом. Готовое ВВ по зарядному трубопроводу поступало в мешки. Затаренный гранулит-ВК складировался на стеллажах. Производительность пункта 5 т/смену.

На проходческих работах гранулит-ВК испытывали при проходке выработок сечением 21,9 м<sup>2</sup> по породам крепостью по шкале профессора М. М. Протоdjяконова 13–16. Диаметр шпуров изменялся от 42 до 45 мм. Зарядка шпуров производилась зарядчиками ЗМК-1, ЗП-2. Иницирование шпурового заряда гранулита-ВК осуществлялось одним патроном аммонита 6ЖВ весом 200 г. Основные показатели БВР приведены в табл. 2.

Таблица 2

## Основные показатели БВР при проходке горных выработок

Сечение, м <sup>2</sup>	Количество шпуров, шт.	Подвигание забоя за цикл, м	Удельный расход ВВ, кг/м <sup>3</sup>	К.и.ш.	Общий вес ВВ, кг
21,9	64	2,5	3	0,9	134,4

При проведении взрывных работ на очистных забоях зарядание шпуров производилось зарядчиками ЗМК-1, ЗП-5, «Ульба»-С1А, диаметр шпуров — 42–45 мм. Взрывание электрическое. Для инициирования зарядов гранулит-ВК использовались стандартные патроны аммонита 6ЖВ весом 200 г, один патрон на шпур. Основные параметры БВР на очистных забоях приведены в табл. 3.

Таблица 3

## Основные показатели БВР на очистных забоях

Количество шпуров, шт.	Общий вес ВВ, кг	Сечение, м <sup>2</sup>	Подвигание забоя за цикл, м	Количество отбитой горной массы, м <sup>3</sup>	К.и.ш.
60	198	44	2,85	125	0,87

По результатам опытных взрывов на проходческих и очистных забоях установлено, что применение гидрофобизированного вермикулита, имеющего большое количество микропор, заполненных воздухом и жидким горючим, повышает детонационную способность смеси АС-ДТ, что позволяет ей устойчиво детонировать в зарядах диаметром 42–45 мм. Кроме того, при пневматическом зарядании гранулит-ВК, даже при низком давлении в пневмотракте, не происходило образования пробок в зарядных шлангах. При использовании гранулит-ВК вместо патронированного аммонита 6ЖВ для взрывания по породам крепостью 13–16, в случае сохранения неизменного количества и диаметра шпуров, не наблюдалось снижения к.и.ш. и увеличения удельного расхода на проходку и очистную выемку при значительно меньших затратах на ВВ.

На основании результатов промышленных испытаний Госгортехнадзор России Постановлением № 08-10/366 от 14.05.99 г. допустил гранулит-ВК к постоянному применению [72].

Этот состав, как и гранулит-АК, не применялся в промышленности, по причине отсутствия производства применяемых стабилизирующих добавок и усложнения технологии изготовления составов.

Значительно повысить физическую стабильность составов, применяемых в восходящих скважинах подземных условий ведения горных работ стало возможно только с появлением доступной пористой аммиачной селитры.

## 2.2. Гранулиты типа АС-ДТ на основе пористой гранулированной аммиачной селитры

Качества пористой гранулированной аммиачной селитры, которые являются определяющими при получении на ее основе промышленных взрывчатых составов типа АС-ДТ, характеризуются значениями насыпной плотности, грансостава, пористости, показателей маслопоглощения и удерживающей способности.

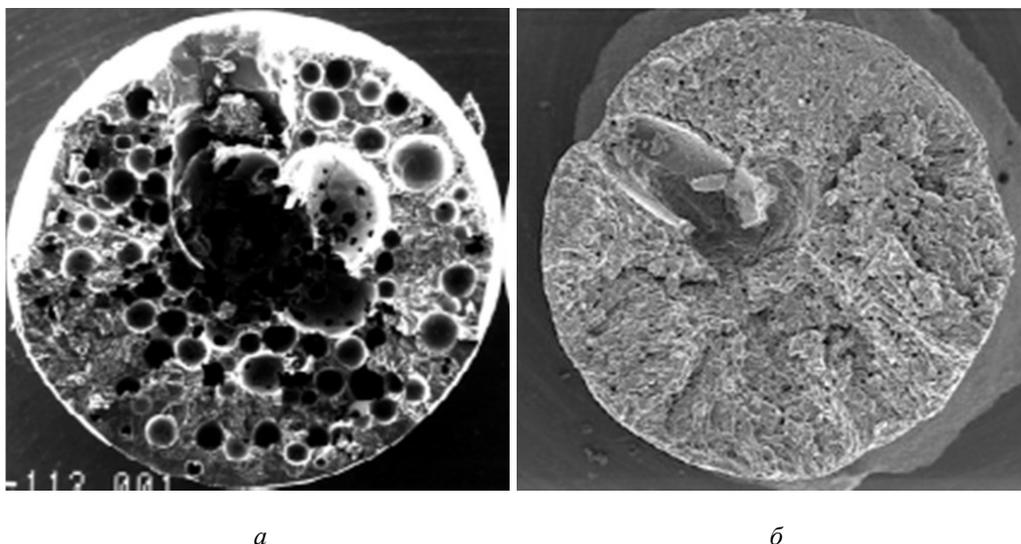
Все производимые сорта пористой селитры по размеру гранул и равномерности грансостава, как видно из табл. 4, находятся примерно на одном уровне.

Таблица 4

Физико-химические характеристики отечественной и зарубежной пористых аммиачных селитр [12, 73, 74]

Тип образца	Марка АС	Содержание основного вещества, %, не менее	Насыпная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Гранулометрический состав		Прочность гранул, Н/гранулу	Совместимость с жидким нефтепродуктом, %
				мм	%		
ГОСТ 2-85	А	98	–	Менее 1 1–3 Более 6	4 93 0	≥ 5	–
ГОСТ 2-85	В	–	–	Менее 1 1–4 Более 6	3–4 95 0	5–10	–
ГОСТ 14702	ЖВГ	99	–	1–3	93	≥ 4	–
ТУ 113-03-635-96	ПАС	98	0,84	1–3 Менее 1 и более 3	90 ∑ менее 10	≥ 4	Впитывающая способность ≥ 10 Удерживающая способность ≥ 5
ТУ 113-03-00203789-16-93	ПАС	98	0,76–0,84	Менее 1 1–3 Менее 1 и более 3	2 85–95 5–15	≥ 5	Маслопоглощение ≥ 8,5 Удерживающая способность ≥ 5,5
ТУ 2143-036-00203789-2003	МП	98	0,70–0,76	От 1 до 2 Менее 1 и от 2 До 3 Менее 1	≥ 75 ∑ ≤ 25 ≤ 2	4	Маслопоглощение ≥ 8 Удерживающая способность ≥ 5,6
ТУ 2143-005-86730570-2008	Yara А, В, С	98,6	0,73–0,83	До 1 Менее 2	Менее 2 Менее 20	5	Впитывающая способность ≥ 7–10 Удерживающая способность ≥ 7
Grand Paroisse	ПАС	–	0,7	От 1 до 2 Менее 1 и более 2	83,8 ∑ 16,2	5,7	Впитывающая способность ≥ 18,2
Norsk Hydro	ANPP	–	–	Менее 1 1–2 Более 2	3 80 17	–	Oil absorption ≥ 8
Nitratos Asturianos S. A.	Porous AN	98,5	0,65–0,75	Менее 1 1–2 Более 2	2 90–95 5–10	–	Fuel absorption ≥ 12
Nitratos Asturianos S. A.	Dense AN	98,5	0,75–0,8	Менее 1 1–2,38	2 98	–	Fuel absorption ≥ 10
Nam Hae	AN Prill	99,5	0,8–0,9	Менее 0,8 Более 2,8	95	–	Oil absorption ≥ 7,5

На рисунке 4 б приведена фотография среза гранулы нитрита аммония, представленная в рекламных материалах зарубежной фирмы-изготовителя. Для сравнения на рисунке приведена фотография отечественного образца пористой селитры (рис. 4 а).



**Рис. 4.** Внутренняя структура гранул аммиачной селитры российского производства (а) и импортного (б)

Гранулы с многочисленными микроскопическими порами позволят обеспечить более высокую удерживающую способность. Так как поры открыты, то за счет капиллярных сил выходит равномерное оптимальное соотношение окислителя и добавляемого горючего в каждой отдельной грануле и в заряде в целом. Следствием этого является возможность относительно длительного хранения, хорошая чувствительность к детонационному импульсу, высокая скорость детонации.

Исследования внутренней структуры гранул пористой аммиачной селитры, выпускаемых российскими производителями, показали, что их удельная поверхность обеспечивается не системой пор, равномерно распределенных по поверхности и телу гранулы, а кавернами. Причем некоторые каверны не сообщаются с поверхностью и лишь способствуют уменьшению плотности гранулы, не повышая их адсорбционную способность [75–77]. По физико-химическим характеристикам аммиачные селитры импортного производства превосходили отечественные образцы, и, в результате, смеси обладали более высокой детонационной способностью, особенно в зарядах малого диаметра.

Согласно рекламным данным компании Yara AB (Швеция), изготовителя мелкогранулированной пористой аммиачной селитры, смеси на основе их селитры обладают высокой детонационной способностью, особенно в зарядах малого диаметра. Так, для состава АС-ДТ (насыпная плотность селитры —  $0,76\text{--}0,78\text{ г/см}^3$ ) со стехиометрическим соотношением компонентов  $94,3 - 5,7\%$ , скорость детонации заряда в стальной трубе диаметром 70 мм составляет 3600 м/с; для заряда диаметром 150 мм — 4200 м/с. Дальнейшее увеличение диаметра заряда не приводит

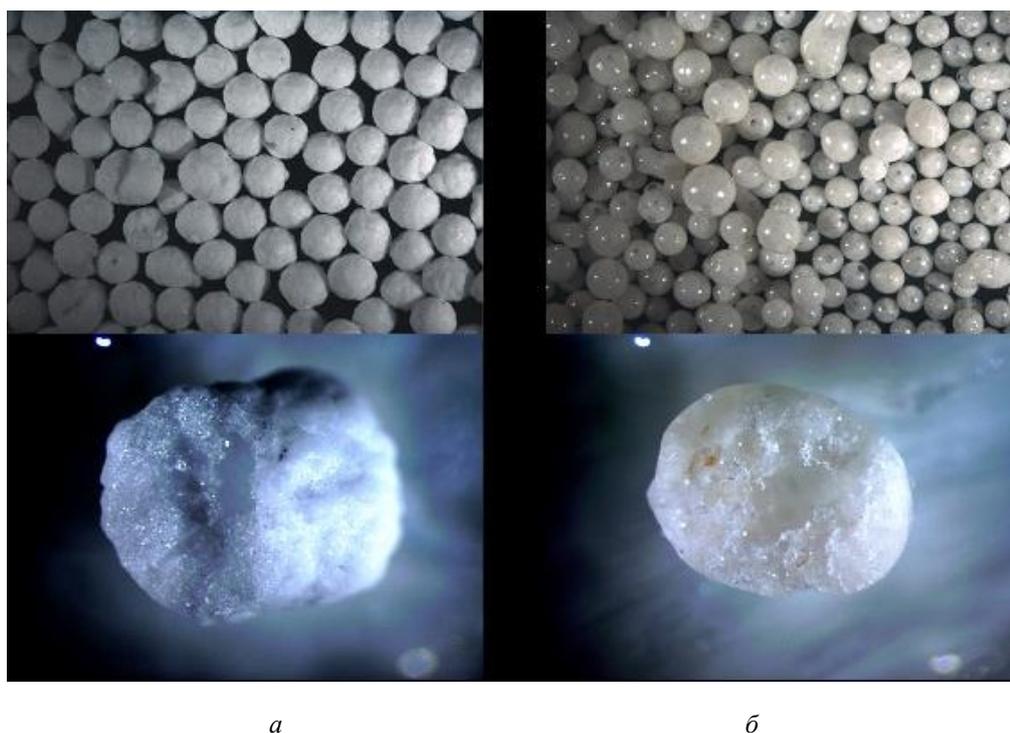
к увеличению скорости детонации. Эти величины скорости детонации зарядов значительно выше, чем для зарядов на обычных сортах пористой селитры.

В лаборатории Горного института КНЦ РАН была выполнена сравнительная оценка взрывной эффективности смесей АС-ДТ, изготовленных на основе пористых мелко-гранулированных аммиачных селитр разных производителей: отечественной марки МП по ТУ 2143-036-00203789-2003 производства ОАО «Акрон» и селитры производства компании Yara AB по ТУ 2143-005-86730570-2008 (далее — Yara). Для приготовления смесей использовали дизельное топливо по ГОСТ 305-82. Все смеси для испытаний изготавливались на промышленной смесительной установке УИ-2 [78]. Содержание дизельного топлива во всех составах — 5,7 %.

Основные заявленные характеристики селитры марки МП: насыпная плотность — 0,73–0,77 г/см<sup>3</sup>, абсорбция дизтоплива — 9–10 %, рассыпчатость — 100 %, удерживающая способность — не менее 5,5 %, статическая прочность гранул — 5–6 Н/гр. Гранулометрический состав: массовая доля гранул диаметром от 1 до 2 мм — не менее 75 %, менее 1 мм — не более 2 %, менее 1 мм и более 2 мм — суммарно не более 25 %.

Для селитры компании Yara марки С: насыпная плотность — 0,73 г/см<sup>3</sup>, абсорбция дизтоплива — не менее 10 %, рассыпчатость — 100 %, удерживающая способность — не менее 7 %; гранулометрический состав: массовая доля гранул диаметром от 1 до 2 мм — 78 %, менее 1 мм ≤ 2 %, более 2 мм ≤ 20 %.

Выбранные типы селитр по размеру гранул находятся примерно на одном уровне. Фотографии гранул селитр и их срезы представлены на рис. 5.



**Рис. 5.** Внешние поверхности и срезы гранул селитр Yara (*a*) и марки МП (*б*)

Аммиачная селитра шведского производства представляет собой гранулы чисто-белого цвета с небольшим колебанием размеров гранул от 0,5 до 1,5 мм. На внешней их поверхности и по срезу имеет место мелкозернистая губчатая

структура. В отдельных гранулах встречаются небольшие каверны. Селитра марки МП на внешней поверхности имеет глянцевую структуру. На разрезе гранулы видны поры-каверны с выходом на поверхность в виде каналов.

Перед проведением экспериментальных работ по определению взрывчатых характеристик были проведены исследования впитывающей и удерживающей способностей селитр по отношению к дизельному топливу, установлен гранулометрический состав образцов селитр и то, как он изменяется после пневмозаряжания заряда.

### **2.2.1. Сравнительное определение физико-химических характеристик отечественной и зарубежной пористых аммиачных селитр**

С целью определения возможности и эффективности применения пористых гранул аммиачной селитры в составе смесевых ВВ для подземных горных работ были проведены исследования впитывающей и удерживающей способностей различных селитр по отношению к дизельному топливу. Сравнивали гранулированную пористую аммиачную селитру, изготовленную в России и селитру шведского производства «Селитра аммиачная пористая “Яра” техническая, для изготовления промышленных взрывчатых веществ» по ТУ 2143-005-86730570-2008.

Определение впитывающей способности гранул селитры выполняли гравиметрическим методом. Анализ основан на пропитке гранул селитры дизельным топливом в течение 20 мин и измерении массы используемого дизельного топлива до ( $m_1$ ), и после пропитки гранул ( $m_2$ ).

Пробу селитры известной массы ( $m$ ) засыпают в бюретку (объем не менее 100 мл), установленную в штативе в вертикальном положении. Для предотвращения закупорки отверстия крана бюретки в нее в первую очередь помещают самые крупные гранулы (штук 5–6). Навеску дизельного топлива известной массы из стеклянного стакана без потерь переносят в бюретку, заполненную гранулами селитры, так, чтобы дизельное топливо равномерно смачивало все гранулы по высоте бюретки, а верхний уровень ДТ был выше уровня селитры на 3–4 см.

Стакан с оставшимся дизельным топливом ставят под закрытый кран бюретки. Пропитка гранул продолжается в течение 20 мин, после чего кран открывают и дизельное топливо, не впитавшееся в гранулы, свободно вытекает из бюретки в стакан в течение 1 ч. Затем кран бюретки закрывают и вновь взвешивают стакан с дизельным топливом.

Впитывающую способность гранул  $X_B$  в процентах вычисляют по формуле (1):

$$X_B = \frac{m_1 - m_2}{m} 100\% , \quad (1)$$

где  $m_1$  — масса дизельного топлива до пропитки гранул, г;  $m_2$  — масса дизельного топлива после пропитки гранул, г;  $m$  — масса навески аммиачной селитры, г.

Опыты по определению впитывающей способности гранул аммиачной селитры по отношению к дизельному топливу показали, что впитывающая способность анализируемых образцов хорошая: для селитры Урага 16 %; для селитры МП — 14 %. Это намного превышает необходимое для достижения нулевого кислородного баланса в смесях АС-ДТ, т. е. по впитывающей способности селитра российского производства не отличается от дорогостоящей импортной селитры.

Удерживающую способность гранул аммиачной селитры определяли путем механического удаления дизельного топлива с поверхности гранул

и определения увеличения массы образцов. Определение производили в следующей последовательности. Пробу селитры известной массы ( $m$ ) засыпали в стакан (объем не менее 100 мл) и добавляли дизельное топливо в количестве, достаточном для полного покрытия всех гранул селитры. Выдерживали при комнатной температуре в течение часа. После выдержки содержимое стакана фильтровали через сито, для полного удаления дизельного топлива образец выдерживали на сите в течение часа. После выдержки смесь селитры с дизельным топливом переносили на фильтровальную бумагу, сложенную в 4 слоя (размер одного слоя фильтра — 300×300 мм). Ровным слоем распределяли по всей поверхности бумаги так, чтобы гранулы не скатывались с фильтра. Распределение продолжали до полного пропитывания листа фильтровальной бумаги дизельным топливом. При появлении пятен ДТ на нижнем листе всю навеску с предосторожностями переносили на подготовленный новый лист фильтровальной бумаги и процедуру повторяли. Затем взвешивали образец смеси ( $m_1$ ) и удерживающую способность гранул селитры  $X_y$  в процентах вычисляли по формуле (2):

$$X_y = \frac{m_1 - m}{m} 100 \%, \quad (2)$$

где  $m$  — масса навески селитры, взятой для анализа, г;  $m_1$  — масса смеси, после выдержки на фильтровальной бумаге, г.

В случае испытаний селитры Yaга повторного переноса не потребовалось, смесь была совершенно сухая после первого этапа «осушения». Удерживающая способность составила 7,8 %. С селитрой МП описанную процедуру производили три раза, и тем не менее селитра осталась омасленной. Удерживающая способность составила 5,6 %.

Полученные результаты можно объяснить тем, что удерживающая способность гранул селитры определяется как состоянием поверхности и величиной суммарной поверхности гранул, так и возможностью проникновения горячего внутрь гранулы равномерно по всему объему. В случае глянцевых гранул селитры МП дизельное топливо распределяется только по поверхности за счет явлений смачивания и поверхностного натяжения на границе раздела. Поэтому даже при близких геометрических размерах без обеспечения возможности проникновения горячего внутрь гранулы равномерно по всему объему разница в величинах удерживающей способности будет присутствовать.

Приведение в технической документации значений впитывающей способности селитры, конечно, характеризует образцы и дает возможность их сравнивать. Но с позиций технологических знаний только впитывающей способности недостаточно, т. к. нас интересуют характеристики системы «селитра – дизельное топливо» в зарядной полости, когда приготовленная смесь, в процессе упаковки, хранения, доставки к месту зарядки и собственно зарядания подвергается неоднократному механическому воздействию, вследствие чего гранулы селитры не в состоянии эффективно удержать впитанное дизельное топливо. Поэтому величина удерживающей способности гранул селитры более информативна.

Удерживающую способность гранул селитры оценивали с помощью красителя, добавляемого в дизельное топливо. Распределение дизельного топлива в объеме, определяемое по равномерности окраски гранул селитры при введении в дизельное топливо специального красителя, для различных селитр

равномерное (рис. 6). В обоих случаях встречаются белые, неокрашенные гранулы селитры в примерно равном количестве. Следовательно, впитывающая способность гранул сопоставима. Более яркая окраска селитры марки Yara позволяет утверждать, что она обладает большей удерживающей способностью.



**Рис. 6.** Фотографии смесей АС-ДТ после пневмозаряжания: сверху — селитра фирмы Yara AB; снизу — селитра марки МП

Визуальный анализ селитры, выделенной из зарядов после пневмозаряжания, показывает, что происходит разрушение более 80 % гранул до порошкообразного состояния, что делает их в заряде одинаковыми по грансоставу (табл. 5).

*Таблица 5*

**Экспериментальные физико-химические характеристики аммиачной селитры, в том числе выделенной из зарядов АС-ДТ**

Тип селитры	Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	Плотность после пневмозаряжания, г/см <sup>3</sup>	Гранулометрический состав, %			Совместимость гранулированной аммиачной селитры с ДТ, %
				Исходная ПАС	АС из заряда после пневмозаряжания	
МП	0,76	0,97	Более 2 мм От 1 мм до 2 мм Менее 1 мм	17,49 81,17 1,35	2,77 34,6 62,63	Впитывающая способность — 14 Удерживающая способность — 5,6
Yara	0,73	0,89	Более 2 мм От 1 мм до 2 мм Менее 1 мм	11,26 88,65 0,1	1,65 42,81 55,54	Впитывающая способность — 16 Удерживающая способность — 7,6

Фактические характеристики селитр на момент испытаний и гранулометрический состав селитр, выделенных из зарядов АС-ДТ, приготовленных пневмозаряданием, приведены в табл. 5.

Гранулометрический состав образцов селитр, удерживающая и впитывающая способность практически соответствуют заявленным значениям в технических условиях. Удерживающая способность гранул селитры определяется как собственно состоянием поверхности и величиной удельной поверхности гранул, так и возможностью проникновения горючего внутрь гранулы равномерно по всему объему. В случае глянцевой поверхности гранул селитры марки МП (см. рис. 5 б) дизельное топливо распределяется только по поверхности за счет явлений смачивания и поверхностного натяжения на границе раздела. Поэтому даже при близких геометрических размерах величина удерживающей способности гранул селитры Yara выше.

Для эффективного использования ВВ не так важна структура смеси, сколько структура сформированного во взрывной полости заряда взрывчатой смеси.

Для установления влияния структуры заряда на эффективность их применения был проведен сравнительный гранулометрический анализ исходных селитр и образцов селитры, выделенных из зарядов после пневмозарядания (табл. 5). На рисунке 7 представлены гистограммы распределения гранулометрического состава аммиачной селитры, выделенной из смесей АС-ДТ до и после пневмозарядания по фракциям: более 2 мм; от 1 мм до 2 мм и менее 1 мм.

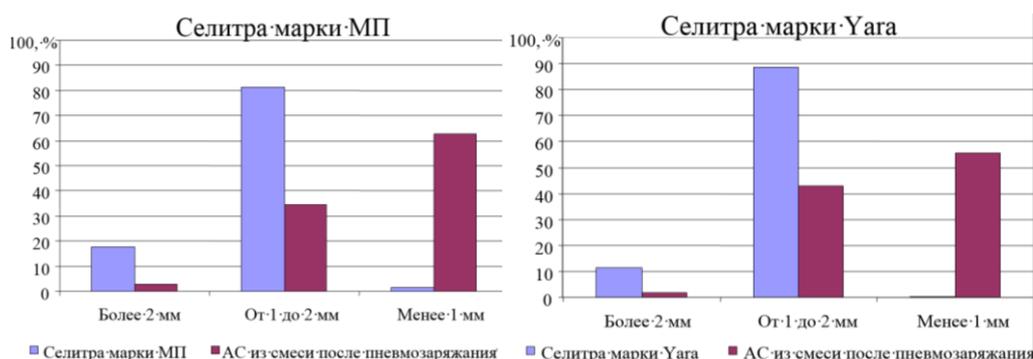


Рис. 7. Гранулометрический состав исходной аммиачной селитры и селитры, выделенной из смеси после пневмозарядания

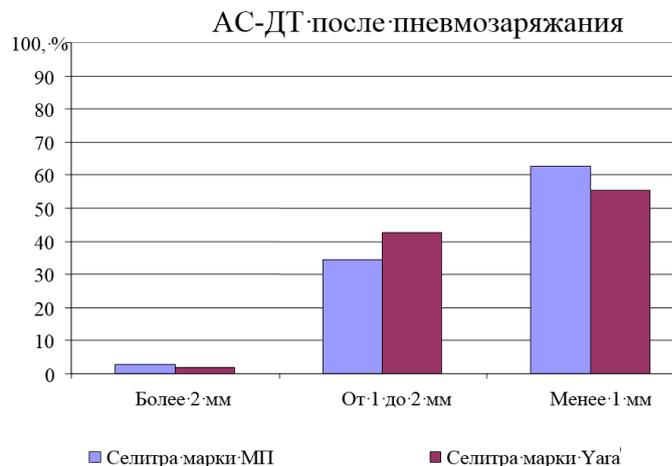
Исходные селитры близки по своим гранулометрическим свойствам. Селитра типа Yara более однородная: суммарное содержание фракций — +2 и –1 мм составляет 11 %. Для селитры МП эта величина составляет более 20 %. Отсюда и указанная разница в насыпной плотности и впитывающей способности (табл. 5).

Анализ образцов ВВ после пневмозарядания зарядов смесей АС-ДТ на их основе показал, что после зарядания на обоих типах селитр гранулометрический их состав становится равным, что и обеспечивает одинаковое увеличение плотности заряда (рис. 8).

В обоих случаях при пневмозарядании плотность зарядов увеличивается примерно на 6 % (относительно насыпной плотности). Что и подтверждается представленными на рис. 9 фотографиями образцов смесей АС-ДТ, изготовленных на основе селитр марки МП и Yara, выделенных из зарядов после пневмозарядания.

Таким образом, взрывная эффективность в значительной мере будет определяться внутренней структурой гранул, следовательно, существует

возможность оптимизации свойств смесей за счет использования гранулированной селитры с высокими структурными характеристиками.



**Рис. 8.** Гранулометрический состав селитр, выделенных из смесей АС-ДТ на основе различных селитр после пневмозаряжания



Смесь АС-ДТ на основе селитры марки МП      Смесь АС-ДТ на основе селитры Yara

**Рис. 9.** Внешний вид смесей АС-ДТ после пневмозаряжания

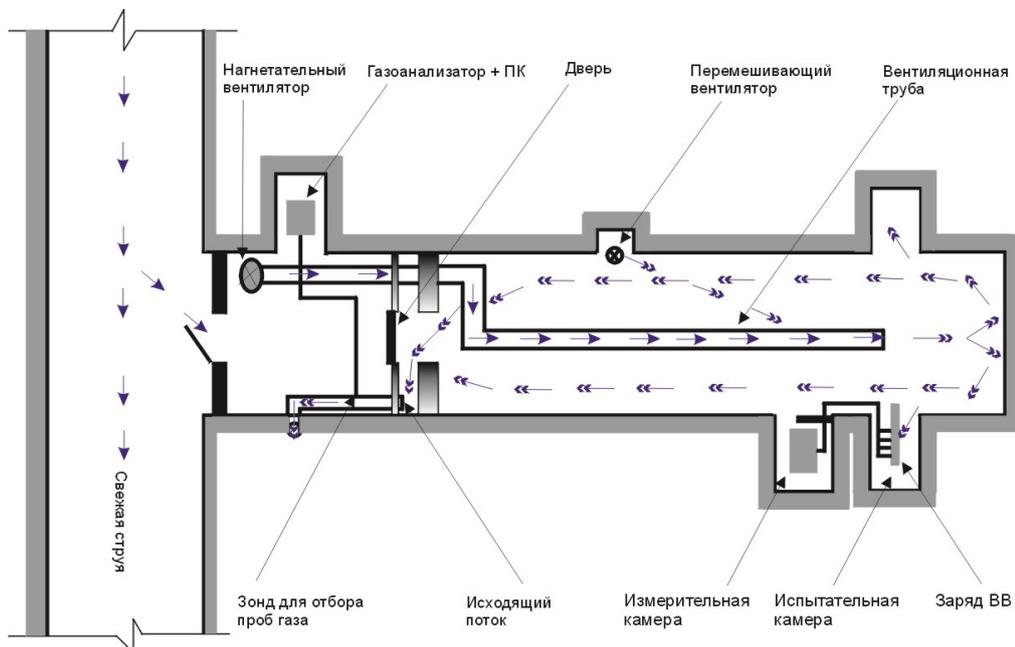
### 2.2.2. Экспериментальная оценка взрывной эффективности гранулитов АС-ДТ

Испытания смесей на взрывную эффективность проводились на подземном испытательном полигоне ОАО «Апатит» с использованием комплексного метода испытаний промышленных ВВ [79], позволяющего в одном эксперименте измерять скорость детонации (по всей длине заряда и на определенных расстояниях), количество выделяющихся при взрыве токсичных газов, производить оценку относительной работоспособности и бризантного действия взрыва по степени расширения стального кольца (в сравнении с эталонным ВВ) (рис. 10). Данная методика защищена патентами РФ [80, 81]. Преимущества метода:

- оперативное определение взрывчатых характеристик взрывчатых веществ в одном экспериментальном цикле, что снижает погрешность измерений по сравнению с разрозненными испытаниями;
- сравнительная оценка относительной работоспособности и бризантного действия взрыва по степени расширения стального кольца (в сравнении с эталонным ВВ) после проведения эксперимента;
- возможность определения оптимальных взрывчатых характеристик путем регулирования компонентного состава и плотности заряжания.

Испытывались заряды в стальных трубах длиной 0,5 м и внутренним диаметром 50 мм с толщиной стенки 5 мм, а также заряды диаметром 100 мм

длиной 1 м. Приготовленные составы заряжали пневмозарядчиком РПЗ-0.6 через специальную насадку с добавлением 4 % воды. В качестве промежуточного детонатора использовался патронированный аммонит бЖВ.



**Рис. 10.** Схема подземного испытательного полигона

В диаметрах 50 мм было испытано 15 зарядов: 6 зарядов с селитрой марки МП; 9 зарядов с селитрой Yara: из них 7 зарядов с селитрой марки С (Yara С) насыпной плотности 0,73 г/см<sup>3</sup> и 2 заряда с селитрой марки В (Yara В), насыпной плотности 0,83 г/см<sup>3</sup>. В трубах диаметром 100 мм произведено по два взрыва смесей на каждой селитре. Результаты полигонных испытаний представлены в табл. 6.

*Таблица 6*

Результаты испытаний смесей АС-ДТ на подземном полигоне

Тип ВВ	Yara С-ДТ	Yara В-ДТ	Yara С-ДТ	МП-ДТ	МП-ДТ
Диаметр заряда, мм	50	50	100	50	100
Длина заряда, мм	500	500	1000	500	1000
Масса ПД, г	100	100	300	100	300
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	0,90	0,94	0,86	0,91	0,88
Средняя скорость детонации на базе 16 см, м/с (ОВР)	3950	3840	4280	3850	4240
Средняя скорость детонации по длине заряда, м/с	–	–	4254	–	4081
Газовая вредность, л/кг	60	76	72	91	84
Работоспособность относительно бЖВ	0,56	–	–	0,51	–

Плотность зарядов, полученных пневмозаряданием, примерно равна. Для зарядов в трубах диаметром 100 мм она чуть меньше, что объяснимо ошибкой измерения объема заряда. Скорость детонации измерялась двумя способами: оптоволоконными датчиками и реостатным методом. Полученные значения близки. Скорости детонации в примененных диаметрах для данных составов имеют высокие

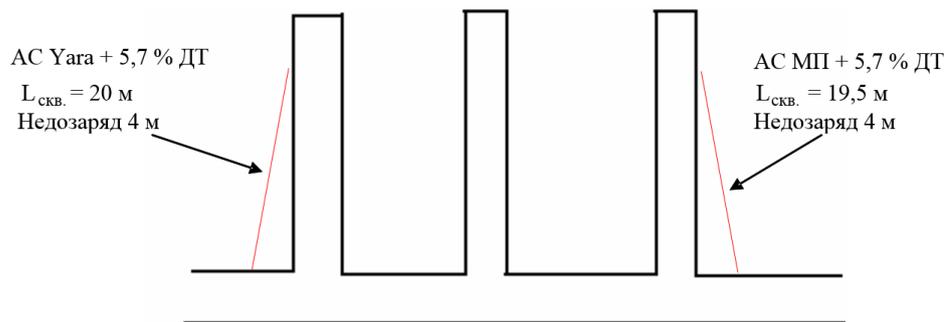
значения. Газовая вредность составов не низкая, что, вкупе с невысокими значениями относительной работоспособности, соответствует действительности.

Иллюстрация результатов относительной работоспособности составов АС-ДТ, установленная по методу расширения стального кольца, представлена на рис. 11.



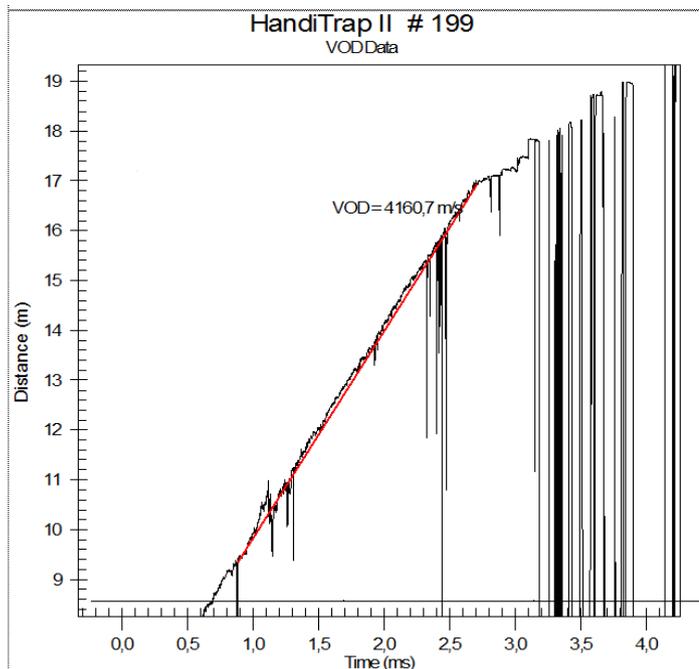
**Рис. 11.** Относительная работоспособность испытуемых смесей по методу расширения стального кольца в трубах диаметром 50 мм в сравнении с аммонитом 6ЖВ

В ходе испытаний проводилась оценка скорости детонации и в натуральных условиях. Замеры производились в подземных условиях Кировского рудника ОАО «Апатит» при взрывании экспериментальных горизонтальных скважин диаметром 102 мм, глубиной 20 м (рис. 12). Заряжание скважин осуществлялось с помощью зарядной машины Paus. Иницирование обратное с использованием СИНВ. Боевик — патрон аммонита 6ЖВ диаметром 90 мм, массой 3 кг. Недозаряд — 4 м.

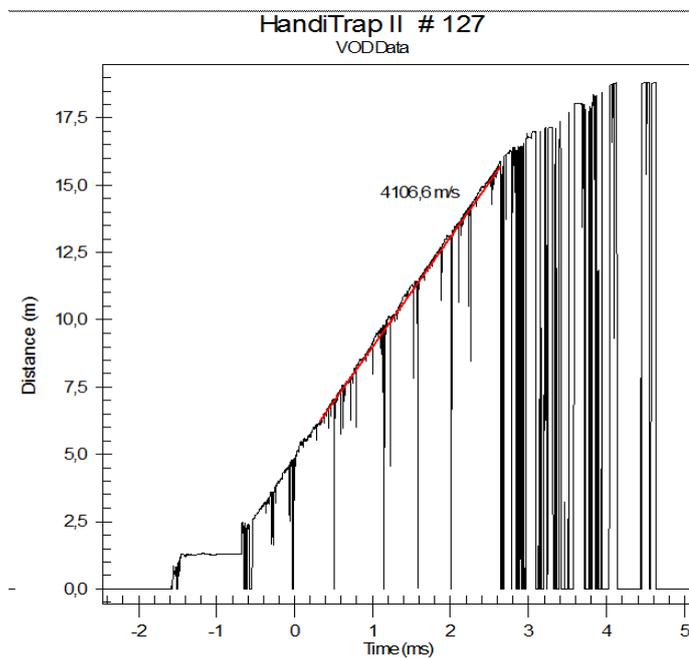


**Рис. 12.** Схема проведения экспериментов по замеру скорости детонации в скважинах

Результаты измерений скорости детонации прибором HandiTrap II по длине колонки заряда представлены на рис. 13.



*a*



*б*

**Рис. 13.** Полезная часть записи скорости детонации при взрыве зарядов Yara-ДТ (*a*) и МП-ДТ (*б*)

Средняя скорость детонации для смесей Yaга-ДТ составила 4161 м/с, а для смеси МП-ДТ — 4106 м/с.

Проведенные эксперименты показали, что при пневмозаряжении смесей АС-ДТ, приготовленных на пористых селитрах мелкогранулированной МП и Yaга, обеспечивается оптимальная плотность заряжения, а скорости детонации в скважинах ( $D_{АСУ-ДТ} = 4161$  м/с,  $D_{МП-ДТ} = 4106$  м/с) сопоставимы со значениями, полученными в полигонных условиях для зарядов в трубах различного диаметра (табл. 7).

Таблица 7

Экспериментальные значения скорости детонации смесей ВВ на различных видах селитры

Смесь ВВ	Заряд в стальной трубе диаметром 50 мм		Заряд в стальной трубе диаметром 100 мм		Заряд в стальной трубе диаметром 102 мм	
	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с	$\rho$ , г/см <sup>3</sup>	$D$ , м/с
Yaга-ДТ	0,91	4030	0,86	4280	1,05	4161
МП-ДТ	0,94	3950	0,88	4240	1,00	4106

При проведении данных экспериментов в натуральных условиях оценивалась также пробивная способность при взрыве скважинных зарядов АС-ДТ на свободную поверхность. Для этих целей скважины обуривались под углом к боковой поверхности выработки (рис. 10), чтобы обеспечить переменную ЛНС. В данном случае величина ЛНС на уровне торца скважин составляла 1,5 м, а на уровне недозаряда — 3,5 м. Для обоих типов ВВ пробивное расстояние для пород уртитового ряда составило 2,2–2,3 м (рис. 14).

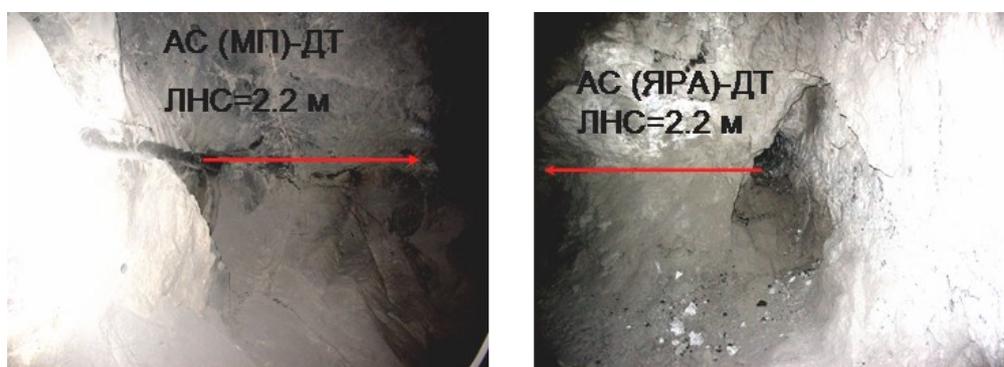


Рис. 14. Пробивное расстояние от взрыва одиночных скважин на свободную поверхность для смесей МП-ДТ и Yaга-ДТ

При совместном взрывании скважин в веере за счет их взаимодействия величина ЛНС будет выше, и, как показали опытные взрывания, приемлемое дробление обеспечивается при величине ЛНС 2,5–2,6 м.

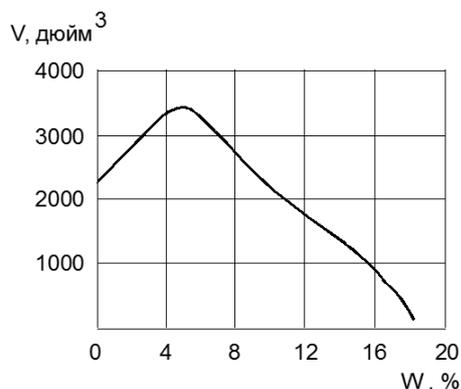
Из проведенного анализа можно сделать вывод, что гранулометрический состав образцов, удерживающая и впитывающая способность обоих типов селитр практически соответствуют заявленным значениям в технических условиях. Скорость детонации и работоспособность сравниваемых ВВ, определенные в полигонных и натуральных условиях, находятся примерно

на одном уровне. При взрывании зарядов АС-ДТ, получаемых пневмозаряжением, скорость детонации увеличивается по сравнению с зарядами насыпной плотности на 10–15 %. Газовая вредность смесей МП-ДТ и Уага-ДТ примерно равны (в зарядах диаметром 100 мм — 84 и 72 л/кг соответственно). Поэтому данные составы могут применяться в подземных условиях для отбойки горных пород средней крепости.

### 2.2.3. Исследование особенностей детонации гранулитов АС-ДТ

Взрывчатые характеристики смесей АС-ДТ известны достаточно хорошо. Однако имеется ряд вопросов, которые требовали дальнейших исследований. В частности, у специалистов не было единого мнения о влиянии воды на детонационные характеристики смесей АС-ДТ.

Эксперты компании INCO (International Nickel Company of Canada) утверждали, что при добавлении воды эффективность взрыва смесей АС-ДТ повышается. В экспериментах эффективность взрыва оценивалась по объему воронки выброса, образующейся в мелко раздробленной породе, при взрыве накладного заряда АС-ДТ весом 5 фунтов (2,048 кг). Результаты эксперимента представлены на рис. 15 [82].



**Рис. 15.** Зависимость объема воронки выброса ( $V$ ) от содержания воды ( $W$ ) в составе АС-ДТ

Анализ данных, приведенных на рис. 15, показывает, что максимальный объем воронки выброса достигается при содержании воды в составе АС-ДТ, равном 6 %. При таком содержании воды объем воронки выброса на 40 % больше, чем при взрыве сухой смеси АС-ДТ. При содержании воды, равном 10 %, объем воронки выброса равен объему воронки выброса, образующейся при взрыве сухой смеси АС-ДТ.

Однако существуют и другие данные о влиянии воды на эффективность взрыва смеси АС-ДТ. По данным В. Маурера и Д. Рейнхарта (рис. 16) [64], при введении в АС-ДТ воды наблюдается резкое снижение скорости детонации  $D$  (м/с).

Нами были проведены исследования по установлению зависимости скорости детонации и газовой вредности смесей АС-ДТ от содержания воды в заряде. Для приготовления смеси использовалась пористая аммиачная селитра ТУ 113-03-00203789-16-93 (ОАО «Акрон»). Смеси АС-ДТ заряжались в трубы диаметром 100 мм с толщиной стенки 5 мм. Плотность заряжания в зависимости от содержания воды колебалась 0,8–0,86 г/см³. Скорость детонации измерялась

с использованием оптоволоконна на двух базах по 8 см, расположенных на расстоянии от инициатора 7 и 9 калибров. Инициатор — два патрона аммонита 6ЖВ, общий вес — 400 г. Результаты экспериментов представлены на рис. 17.

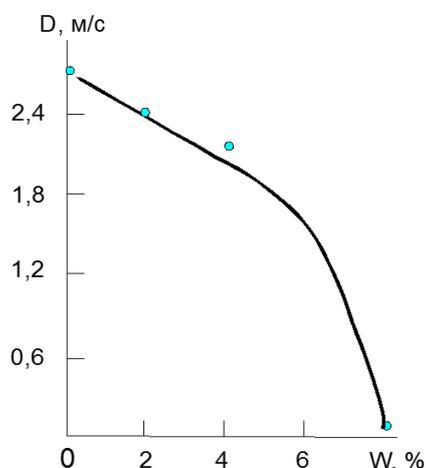


Рис. 16. Зависимость скорости детонации ( $D$ ) от содержания воды в составе АС-ДТ

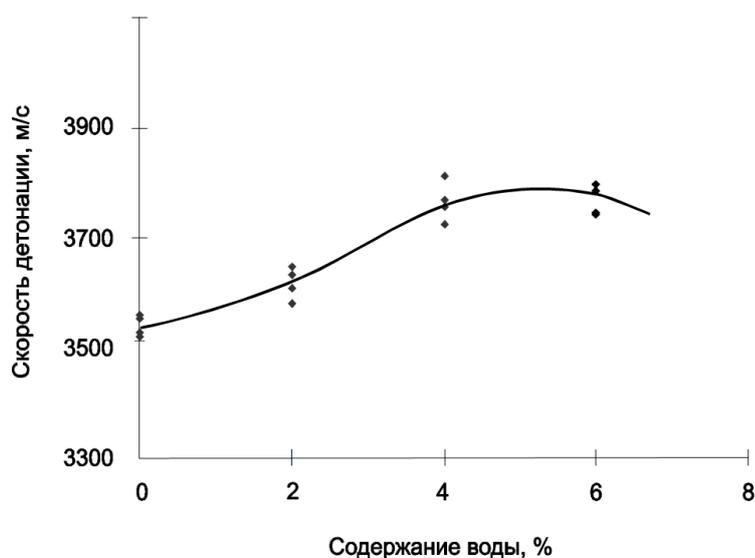
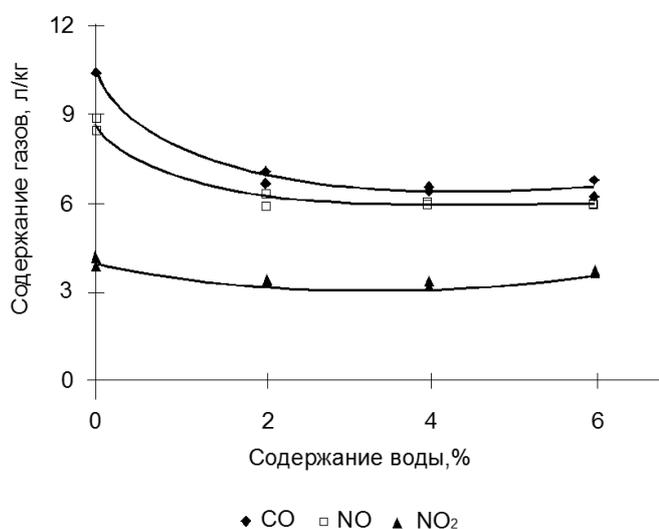


Рис. 17. Зависимость скорости детонации смеси АС-ДТ от содержания воды

Анализ полученной зависимости показывает, что при увеличении содержания воды до определенных пределов наблюдается повышение скорости детонации смеси АС-ДТ. Оптимальное содержание воды в смеси АС-ДТ находится в пределах 4–6 %. При выходе из этого диапазона в ту или другую сторону скорость детонации падает. По нашему мнению, увеличение параметров детонации смесей АС-ДТ с водой связано с изменением механизма детонационного превращения. Замена воздуха в насыпном заряде на воду и, соответственно, повышение плотности заряжения

способствуют распространению по заряду мощной инициирующей ударной волны. Ударная волна, обладая высоким давлением на фронте, создает условия для возникновения детонации одновременно по всему объему ВВ, охваченному ударной волной. В результате, значительно повышается полнота взрывчатого превращения гранул, что приводит к повышению скорости детонации. Режим детонационного превращения смесей АС-ДТ с водой становится близким к детонационному режиму водонаполненных ВВ. При увеличении воды выше оптимального значения затраты тепла на ее испарение уже не могут быть скомпенсированы за счет изменения механизма детонационного превращения, что приводит к резкому падению скорости детонации.

О повышении полноты взрывчатого превращения при введении в состав АС-ДТ воды свидетельствуют замеры количества токсичных газов в продуктах взрыва (рис. 18).



**Рис. 18.** Зависимость количества ядовитых газов в продуктах взрыва от содержания воды в составе смесей АС-ДТ

Анализ приведенных данных показывает, что при введении в состав ВВ воды наблюдается снижение в продуктах взрыва окиси углерода и окислов азота, это свидетельствует о более полном разложении ВВ.

Нами также проведены исследования по изучению влияния воды на процесс уплотнения смесей АС-ДТ. Этот параметр имеет большое значение при пневмозаряжении ВВ. Уплотнение смесей АС-ДТ исследовалось в специально изготовленной пресс-форме. Давление на пуансон создавалось с использованием винтового пресса. Результаты эксперимента приведены на рис. 19.

Опыты показали, что за счет введения воды возможно значительное уплотнение смесей АС-ДТ.

Таким образом, вода не только повышает детонационную способность смесей АС-ДТ, но и позволяет устойчиво сформировать заряд в восстающих скважинах и регулировать плотность ВВ.

Известно, что детонационные и взрывчатые характеристики смесей АС-ДТ повышаются за счет увеличения пористости аммиачной селитры, которую в первом

приближении можно оценить по ее впитывающей способности жидких нефтепродуктов. Анализ характеристик различных сортов пористой аммиачной селитры показал, что увеличение впитывающей способности селитры неизбежно приводит к уменьшению насыпной плотности. Так, например, пористая аммиачная селитра ОАО «Акрон» характеризуется впитывающей способностью по дизельному топливу 8 % и имеет насыпную плотностью 0,74–0,77 г/см<sup>3</sup>, аммиачная селитра фирмы Nitratos Asturianos S. A: впитывающая способность — более 12 %, насыпная плотность — 0,65–0,75 г/см<sup>3</sup>.

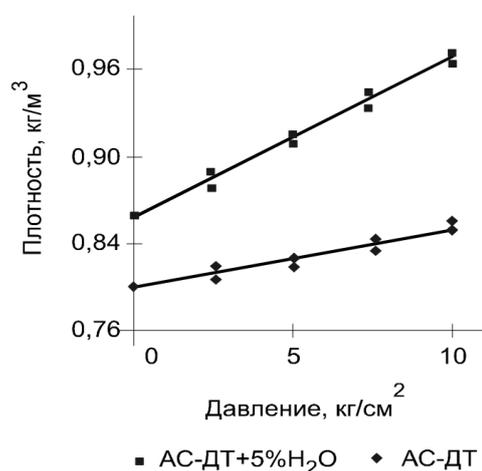


Рис. 19. Зависимость плотности АС-ДТ от давления прессования

Пониженная насыпная плотность приводит к уменьшению концентрации энергии взрыва ВВ в зарядной полости, в результате этого эффект от повышения пористости аммиачной селитры снижается.

Нами установлено, что детонационные характеристики смеси АС-ДТ можно повысить без увеличения пористости гранул, а именно за счет использования мелкодисперсной пористой гранулированной аммиачной селитры — миниприллита, выпускаемого ОАО «Акрон» в рамках ТУ 113-03-00203789-16-93. Характеристики стандартной пористой и мелкодисперсной селитр приведены в табл. 8.

Таблица 8

Основные характеристики пористой аммиачной селитры

Показатель	Мелкодисперсная ПАС	Стандартная ПАС
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,74 ÷ 0,77	0,74 ÷ 0,77
Гранулометрический состав, %:		
менее 1 мм;	1,6	0,2
–1 + 2 мм;	86	51
более 2 мм	12,4	48,8
Впитывающая способность, %	До 6,5	До 6,5

Процесс детонации смесей АС-ДТ осуществляется по механизму взрывного горения и зависит от поверхностей реагирующих компонентов. Поэтому следует ожидать, что с увеличением поверхности аммиачной селитры,

которая возрастает при уменьшении крупности гранул, детонационные характеристики смесей АС-ДТ будут увеличиваться.

Скорость детонации смесей АС-ДТ на различных сортах аммиачной селитры измеряли в шпурах диаметром 42 мм и в стальных трубах диаметром 100 мм с толщиной стенки 5 мм. При взрывании в трубах наряду со скоростью детонации регистрировали количество образующихся токсичных газов. В шпуры смеси заряжали с использованием пневмозарядчика ЗП-2, в трубы — вручную. Во все заряды добавляли воду в количестве 4 %. Результаты экспериментов приведены в табл. 9.

Таблица 9

Взрывчатые характеристики смесей АС-ДТ с пористой аммиачной селитрой в составе

Показатели	Стандартная ПАС	Мелкодисперсная ПАС
Скорость детонации, м/с: диаметр заряда — 42мм (плотность заряжения — 1,2 г/см <sup>3</sup> );	2950	3060
диаметр заряда — 100 мм (плотность заряжения — 0,82 г/см <sup>3</sup> )	3600	3720
Количество токсичных газов в продуктах взрыва, л/кг:		
CO;	6,8	6,0
NO;	7,5	6,4
NO <sub>2</sub>	4,2	3,7

Анализ приведенных данных показывает, что детонационная способность смесей АС-ДТ на мелкодисперсной гранулированной аммиачной селитре выше детонационной способности смесей АС-ДТ с использованием стандартной ПАС. Это открывает хорошие перспективы для использования смесей АС-ДТ на подземных горных работах.

Смесь АС-ДТ на мелкодисперсной гранулированной аммиачной селитре была испытана при взрывании скважин при торцевом выпуске руды на Расвумчоррском руднике ОАО «Апатит».

При взрывании скважин на руднике граммонитом 79/21 были установлены следующие усредненные параметры отбойки: ширина отбиваемого блока — 12 м; высота отбиваемого блока — 24 м; линия наименьшего сопротивления (ЛНС) — 2,7 м.

Предварительные исследования показали, что для эффективного применения смесей АС-ДТ необходимо изменить существующие параметры отбойки, а именно величину ЛНС. Нами проведены расчеты оптимальной величины линии наименьшего сопротивления для смесей АС-ДТ.

В работе [83] эффективность взрыва промышленных ВВ предложено оценивать с использованием следующего выражения:

$$A \approx Q_{\text{Взр}}^{0,75} V^{0,25}, \quad (3)$$

где  $Q$  — расчетная теплота взрыва ВВ, ккал/кг;  $V$  — расчетный объем газов, л/кг.

Введем понятие эквивалентного заряда, под которым будем понимать массу заряда АС-ДТ, эквивалентную по эффективности 1 кг граммонита 79/21. Эквивалентную массу заряда можно определить следующим образом:

$$m_{\text{экв}} = \frac{A_{79/21}}{A_{\text{АС-ДТ}}}, \quad (4)$$

тогда:

$$m_{\text{экв}} = \left( \frac{1031}{Q_{\text{взр}}} \right)^{0,75} \left( \frac{893}{V} \right)^{0,25}, \quad (5)$$

где 1031 ккал/кг — расчетная теплота взрыва граммонита 79/21; 893 л/кг — расчетный объем газов, выделяющийся при взрыве граммонита 79/21;  $Q_{\text{взр}}$  — расчетная теплота взрыва смеси АС-ДТ (930 ккал/кг);  $V$  — расчетный объем газов, выделяющийся при взрыве смеси АС-ДТ (974 л/кг).

Расчеты по формуле (5) показали, что эквивалентная масса заряда АС-ДТ равна 1,06 кг. По существу, это означает, что удельный расход при применении смесей АС-ДТ необходимо увеличить на 6 %. При неизменных количестве скважин, ширине и высоте блока удельный расход можно увеличить за счет уменьшения линии наименьшего сопротивления.

Кроме того, плотность заряжения АС-ДТ ниже плотности граммонита 79/21, поэтому с учетом этого фактора линия наименьшего сопротивления для АС-ДТ будет равна:

$$\text{ЛНС}_{\text{АС-ДТ}} = 0,94 \cdot \text{ЛНС}_{79/21} \cdot \frac{\rho_{\text{АС-ДТ}}}{\rho_{79/21}}, \quad (6)$$

где  $\text{ЛНС}_{79/21}$  — линия наименьшего сопротивления для граммонита 79/21, равная 2,7 м;  $\rho_{79/21}$  — плотность граммонита 79/21 при пневмозарядании (1 г/см<sup>3</sup>);  $\rho_{\text{АС-ДТ}}$  — плотность АС-ДТ при пневмозарядании (0,92 г/см<sup>3</sup>).

Из формулы (6) следует, что линия наименьшего сопротивления для АС-ДТ должна быть равна 2,4 м.

По рассчитанным параметрам на гор. +470 м, блок 8/10, отм. +517 м, БДО 26 проведено 5 массовых взрывов. Зарядка скважин производилась зарядчиками ЗП-25 и МЗКС-160. Параметры взрывов приведены в табл. 10.

Разрезы по четырем веерам приведены на рис. 20. По всем веерам выпущено запланированное количество руды. Качество дробления руды соответствовало качеству дробления руды с использованием граммонита 79/21.

Расчеты показали, что, несмотря на уменьшение объема отбиваемого блока, будет экономическая эффективность от замены граммонита 79/21 на смесь АС-ДТ за счет ее более низкой стоимости по сравнению с граммонитом 79/21 и снижения удельного расхода на отбойку (погонная вместимость АС-ДТ — 7,2 кг/м, граммонита 79/21 — 8,6 кг/м).

Так, экспериментальные взрывы, проведенные на Расвумчоррском руднике, показали, что при  $\text{ЛНС} = 2,7$  м удовлетворительное дробление получено только в нижней части веера, где сконцентрировано наибольшее количество ВВ. После отбойки с обоих БДО было выпущено около 600 т руды. В верхней части отбиваемого массива произошло зависание слоя руды высотой 7–10 м. Слой был отделен от массива, но, по-видимому, энергии АС-ДТ не хватило для его дробления.

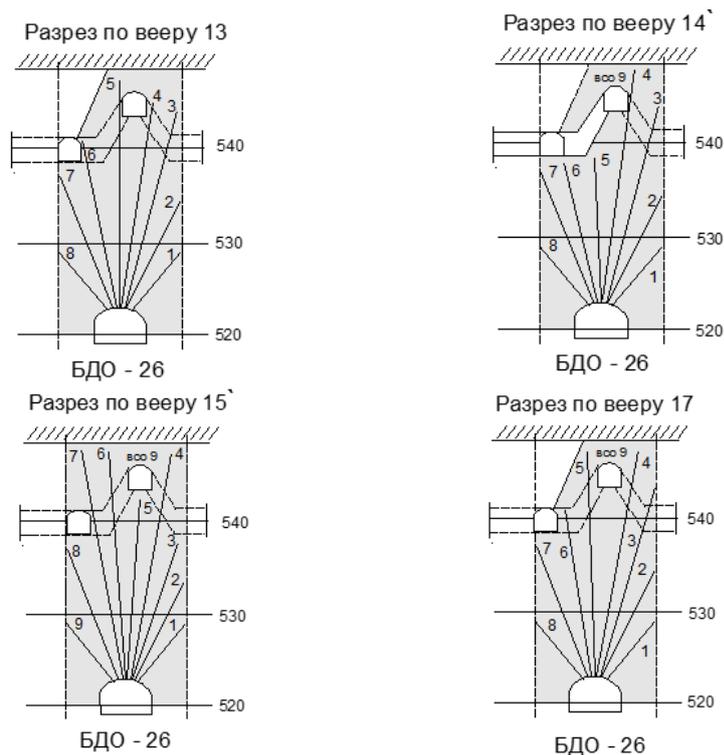
Во второй серии экспериментов на этом же руднике  $\text{ЛНС}$ , исходя из расчетов, была принята равной 2,4 м. В результате отбойки получено удовлетворительное

дробление и выпущено запланированное количество руды. При совместном взрывании скважин в веере за счет взаимодействия зарядов величина ЛНС, согласно расчетам для смесей Уага-ДТ, может быть увеличена до 2,5 м.

Таблица 10

Параметры взрывов зарядами смеси АС-ДТ

БДО-26, веер 13									
№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона, °	50	65	75	81	91	101	113	130	–
Длина скважины, м	8	14	21	23	16	12	10	9	–
Длина заряда, м	7	9	16	21	11	9	9	7	–
Вес заряда, кг	48,8	63,8	116,3	154,2	79,2	63,8	63,4	43	–
Недозаряд, м	1	5	5	2	5	3	1	2	–
Среднее значение веса заряда на 1 п. м. скважины — 7,1									
БДО-26, веер 14'									
№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона, °	50	66	78	85	97	109	120	135	–
Длина скважины, м	–	7	21	25	15	13	13	8	–
Длина заряда, м	–	4	18	22	12	12	10	5	–
Вес заряда, кг	–	27	133	165	90	70	70	34	–
Недозаряд, м	3	3	3	3	3	3	3	3	–
Среднее значение веса заряда на 1 п. м. скважины — 7,1									
БДО-26, веер 15'									
№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона, °	50	60	68	78	86	95	102	114	130
Длина скважины, м	8	11	16	22	18	25	26	14	9
Длина заряда, м	5	8	13	19	15	22	23	11	6
Вес заряда, кг	33,8	56,3	98,8	138,8	108,8	161,3	168,8	78,8	41,3
Недозаряд, м	3	3	3	3	3	3	3	3	3
Среднее значение веса заряда на 1 п. м. скважины — 7,3									
БДО-26, веер 17									
№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона, °	50	64	73	82	92	102	113	130	–
Длина скважины, м	8	12	21	25	24	18	14	9	–
Длина заряда, м	7	9	18	22	23	15	11	8	–
Вес заряда, кг	48,8	63,8	131,3	161,3	168,8	108,8	78,8	56,3	–
Недозаряд, м	1	3	3	1	1	3	3	1	–
Среднее значение веса заряда на 1 п. м. скважины — 7,2									
БДО-26, веер 17'									
№ скважины	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Угол наклона, °	50	64	73	82	92	102	113	130	–
Длина скважины, м	8	12	21	24	24	17	14	9	–
Длина заряда, м	6	7	16	19	22	12	9	7	–
Вес заряда, кг	41,3	48,8	116,3	138,8	161,3	86,3	63,8	48,8	–
Недозаряд, м	2	5	5	5	2	5	5	2	–
Среднее значение веса заряда на 1 п. м. скважины — 7,1									



**Рис. 20.** Расположение скважин в всехах

Не смотря на высокие детонационные характеристики данных смесей и их бризантное действие, они обладают меньшим фугасным действием по сравнению с алюмосодержащими гранулитами, что не позволяет обеспечить дробление массива в дальней зоне действия взрыва и необходимую подвижку отбитой горной массы из-за значительных затрат энергии на дробление в ближней зоне.

Поэтому было рекомендовано данные составы гранулитов, после отработки параметров БВР в натурных условиях, использовать при отбойке горной массы в системе поэтажного обрушения в соответствующих горно-геологических условиях, а также при проходке горных выработок.

### 2.3. Особенности гранулитов, содержащих металлическое горючее

Повысить энергию взрыва гранулитов (смеси типа АС-ДТ) можно за счет введения в состав высококалорийных металлов и их соединений. В качестве энергетической добавки в основном применяют дисперсный алюминий. Алюминий входит в состав многих промышленных ВВ — скальных аммонитов, аммоналов, детонитов, гранулитов (все — Россия), Aluwite, Nilite (США), Anfomet, FRAGPAK<sup>MD</sup>SD (Канада), Andex (Германия), Granulex (Великобритания), приллитов (Швеция), солетролов М (Польша) и др. В России широко применялся и применяется в условиях подземных горных работ гранулит АС-8 с алюминиевой пудрой в составе.

Опыт применения алюмосодержащих взрывчатых составов в различных горно-геологических условиях показал, что фактическая работоспособность составов не соответствует расчетной теплоте взрыва [6]. С. Д. Викторов объясняет это тем, что в продуктах взрыва алюмосодержащих ВВ присутствуют твердые частицы ( $Al_2O_3$ ), нагретые до нескольких тысяч градусов, которые при расширении продуктов взрыва

в работе не участвуют, поэтому энергия, затраченная на их нагревание, должна быть вычтена из общей потенциальной энергии ВВ. Предполагая, что продукты взрыва описываются уравнением состояния идеального газа, он показал, что термодинамические потери энергии на нагревание твердых частиц зависят от соотношения теплоемкостей газа и частиц, а также зависят от соотношения характеристических времен процесса расширения газа и процесса теплообмена твердых частиц с окружающим газом. В свою очередь, характерное время теплообмена твердых частиц с идеальным газом зависит от поверхности твердых частиц, т. е. чем меньше поверхность, а, следовательно, и диаметр частиц, тем меньше характерное время теплообмена. Характерное время расширения идеального газа зависит от диаметра скважины: чем больше диаметр скважины, тем больше характерное время расширения продуктов детонации. Отсюда следует, что термодинамические потери будут уменьшаться при возрастании диаметра заряда и уменьшении диаметра частиц. Основываясь на этих предположениях, С. Д. Викторов оценил влияние дисперсности алюминия на полноту использования потенциальной энергии игданита А-6. В экспериментах использовались алюминиевые частицы двух групп, в одном случае размеры частиц были в диапазоне 0,25–1,25 мм, в другом — 1,25–5 мм. Эксперименты проводились с зарядами ВВ, размещенными в шпурах диаметром 36 и 44 мм и в скважинах диаметром 105 мм. В качестве эталонного ВВ использовался аммонит 6ЖВ. Оценка работы взрыва проводилась по скорости движения свободной поверхности массива над зарядом ВВ. Коэффициент использования потенциальной энергии ВВ вычислялся по формуле:

$$K = \frac{E_k}{E} 100\%, \quad (7)$$

где  $E_k$  — кинетическая энергия ВВ, определяемая по скорости движения свободной поверхности над зарядом ВВ;  $E$  — полная энергия заряда, определяемая по теплоте взрыва.

В таблице 11 приведены средние значения коэффициента  $K$  для каждого вида ВВ и диаметра заряда.

Таблица 11

Коэффициенты использования потенциальной энергии ВВ, рассчитанные по формуле (7)

Диаметр заряда, мм	Тип ВВ / дисперсность алюминия, мм/	$K$	Среднее отклонение
44	Аммонит 6ЖВ	36,7	5,0
	Гранулит А6/0,25-1,25/	25,4	10,2
	Гранулит А6/1,25-5/	14,8	5,6
105	Аммонит 6ЖВ	34,0	2,2
	Гранулит А6/0,25-1,25/	32,1	7,7
	Гранулит А6/1,25-5/	22,4	8,1

Анализ данных, приведенных в табл. 11, показывает, что при уменьшении размеров частиц и увеличении диаметра заряда работоспособность алюмосодержащего гранулита увеличивается. С. Д. Викторов считает, что это связано с увеличением полноты сгорания частиц алюминия.

Б. Я. Светлов также отмечает, что, наряду с термодинамическими особенностями реакций алюминия, при детонации ВВ имеет значение и скорость сгорания частиц алюминия, зависящая от его дисперсности [7]. Особенно это сильно

проявляется в зарядах малого диаметра. Так, например, аммонал на алюминиевом порошке (алюмит № 1), выпускавшийся в СССР в патронах диаметром 30–32 мм, был снят с производства из-за большого количества случаев отравления горняков газообразными продуктами взрыва. Известно, что количество образующихся токсичных газов характеризует полноту взрывчатого превращения ВВ. Б. Я. Светлов считает, что источником газов, наряду с бумажной оболочкой патронов, являлось само ВВ, т. к. в результате медленного сгорания крупных частиц алюминия кислородный баланс газообразных продуктов взрыва становился положительным, что приводило к увеличению в них окиси азота, которая не использовалась на окисление алюминия.

В работе [84] проведены исследования по изучению влияния размеров частиц алюминия на теплоту взрыва и фугасное действие алюмосодержащих ВВ. Теплота взрыва определялась с использованием калориметрической бомбы. Показано, что размеры частиц существенно сказываются на тепловом эффекте. Например, при взрыве смеси тротила с 15 % алюминия крупности 0,3 мм тепловой эффект составил 990 ккал/кг, при взрыве такой же смеси с алюминиевой пудрой ПП-3 (4–5 мкм) тепловой эффект — 1240 ккал/кг при прочих равных условиях.

Фугасное действие смесей «индивидуальное ВВ + металлическое горючее» исследовалось в бомбе Трауэля. Показано, что фугасное действие возрастает при уменьшении размеров частиц металла и увеличении содержания последнего в смеси. Еще больший эффект наблюдается при введении в состав воды [84].

Большой вклад в изучение детонационных характеристик алюмосодержащих ВВ внес К. К. Шведов [85, 86]. Он отмечал, что многочисленные попытки получить повышение параметров фронта детонационной волны за счет введения алюминия в относительно мощные ВВ не увенчались успехом. По его мнению, это указывает на то, что положительного вклада в тепловыделение за характерные для детонации времена реакции 0,1–1,0 мкс при обычно используемой дисперсности компонентов алюминий не вносит.

Несколько другая картина наблюдается в смесях алюминия с окислителями. Изучение параметров детонации смесей мелкодисперсной аммиачной селитры с алюминием показало, что при детонации со скоростями фронта около 4 км/с определенная часть алюминия успевает прореагировать во фронте волны. Несмотря на то, что процесс детонации поддерживается разложением самой селитры, при уменьшении размеров частиц компонентов до микронных алюминий вносит существенный вклад в тепловыделение, что приводит к увеличению скорости фронта. К. К. Шведов делает вывод, что при соответствующих условиях не исключено окисление алюминия в зоне реакции с большим тепловыделением и повышением параметров детонационного фронта.

В лаборатории динамики гетерогенных систем института гидродинамики им. М. А. Лаврентьева СО РАН установлено, что реакция металлической добавки на фронте детонации в микросекундном диапазоне времен протекает только на поверхности частиц в тонком поверхностном слое. При этом внутренняя часть частицы не взаимодействует с продуктами детонации. Поэтому большая часть частицы в реакции не участвует и служит инертным балластом.

В работе [87] приведены результаты исследований детонационной способности смесей мелкодисперсной аммиачной селитры с алюминиевой пудрой марок ПП-1 (6–7 мкм) и ПАК-3 (0,8–0,9 мкм). Исследования показали, что при добавлении к нитрату аммония алюминиевой пудры детонационная способность смесей

повышается и становится значительно выше детонационной способности самой аммиачной селитры. Так, например, смесь аммиачной селитры с 1 % алюминиевой пудры имеет критический диаметр 33 мм, а критический диаметр аммиачной селитры с 18 % алюминиевой пудры составляет 5 мм. Кроме того, установлено, что при добавлении к нитрату аммония алюминиевой пудры возрастает скорость детонации и работоспособность по пробе Трауцля. В среднем каждый процент добавки алюминия увеличивает скорость детонации на 27 м/с, а работоспособность на 21,5 см<sup>3</sup>.

В. Б. Иоффе и Б. А. Меньшиков [88] также провели исследования детонационной способности смесей аммиачной селитры с алюминием. Изучено влияние дисперсности компонентов на детонационную способность сухих смесей аммиачной селитры с алюминием следующего состава: 15 % алюминия и 85 % аммиачной селитры. Данные по эксперименту представлены в табл. 12.

Таблица 12

Экспериментальные данные В. Б. Иоффе и Б. А. Меньшикова [88]

Показатели	Размер фракций аммиачной селитры, мм								
	менее 0,56			0,56–1,5			1,5–2,5		
	Марка порошка алюминия								
	ПП-1	ПА-4	АКВ	ПП-1	ПА-4	АКВ	ПП-1	ПА-4	АКВ
Плотность, г/см <sup>3</sup>	0,95	0,9	0,9	0,93	0,91	0,9	0,9	0,94	0,88
Скорость детонации, км/с	3,56	3,47	3,24	3,3	3,25	3,06	2,62	2,62	2,44

*Примечание.* Дисперсность алюминия — пудра ПП-1 — 5 мкм; порошок ПА-4 — 25,4 мкм; вторичная крупка АКВ — 125 мкм.

Заряды взрывались в асбоцементных трубах с внутренним диаметром 100 мм, толщина стенки 14 мм, длина заряда — 0,7–1,2 м. Иницирование осуществлялось при помощи шашки из прессованного тротила массой 50 г. Анализ приведенных данных показал, что при увеличении крупности алюминия детонационные свойства зарядов снижаются.

Влияние крупности алюминия на детонационные характеристики ВВ можно объяснить следующим образом. В работе [89] установлено, что температура воспламенения и время горения частиц алюминия в продуктах конденсированных систем прямо пропорциональна их диаметру. Кроме того, в процессе разогрева аморфной окисной пленки, покрывающей частицы алюминия, происходит ее кристаллизация. На поверхности, занятой кристаллами, ввиду большого диффузионного сопротивления последней, реакция не идет. Частицы небольшого размера, обладающие незначительной тепловой инерцией, во фронте детонационной волны успевают прогреться до температуры плавления  $Al_2O_3$  прежде, чем окисная пленка успеет кристаллизоваться. Крупные частицы ( $d > 15–20$  мкм), тепловая инерционность которых значительно выше, не успевают прогреться до температуры плавления, т. к. окисная пленка кристаллизуется раньше, чем произойдет ее плавление.

Интенсифицировать процесс воспламенения крупных частиц можно за счет добавления к фракции с крупными частицами мелких частиц алюминия. Поджигающее действие мелких частиц обуславливается их радиацией и непосредственным действием при соударении с крупными негорящими частицами [90].

Таким образом, эффективность взрыва алюмосодержащих ВВ в значительной степени зависит от дисперсности частиц алюминия.

Но по поводу влияния крупности алюминия есть и другие мнения. В работе [91] указано, что, чем большая доля алюминия сгорает в зоне химической реакции, тем

большого снижения параметров детонации следует ожидать, т. е. более мелкие частицы алюминия снижают параметры детонации в большей мере. М. В. Гоголя и др. [92] отмечают, что, как правило, с уменьшением размеров частиц и увеличением содержания алюминия скорость детонации, давление и массовая скорость снижаются, а теплота взрыва и фугасное действие увеличиваются.

Из представленного анализа можно сделать следующие выводы. Скорость сгорания частиц алюминия зависит от его дисперсности. При нагревании алюминий окисляется в начале лишь с поверхности, т. е. кислород не поступает к другим его слоям, оксидная пленка его поверхности, имеющая высокую температуру плавления (около 2000 °С), препятствует контакту других слоев алюминия с кислородом, в результате чего реакция затухает. Учитывая, что температура взрыва гранулированных ВВ составляет примерно 3000 °С, то можно видеть, какое количество тепла уходит на разогрев оксидной пленки.

Снижение параметров детонации смесевых ВВ при использовании мелких фракций алюминия можно объяснить тем, что при их применении увеличивается удельная поверхность горючего, а значит, необходимо и большее количество тепла для его окисления.

Изучению взрывчатых характеристик алюмосодержащих ВВ посвящены многочисленные исследования [84–93], большинство исследователей придерживаются мнения, что энергетические добавки не дают прироста дополнительной энергии и повышения параметров детонационной волны.

В связи с малостью представленных в технической литературе экспериментальных данных по взрывчатым и детонационным характеристикам смесевых алюмосодержащих ВВ, особенно при использовании в подземных условиях, в Горном институте КНЦ РАН были проведены дополнительные эксперименты по их изучению.

### ***2.3.1. Алюмосодержащие гранулиты***

Опыт применения алюмосодержащих ВВ в различных горно-геологических условиях показал, что их фактическая работоспособность не соответствует расчетной теплоте взрыва. Например, в работе [94] установлено, что выход негабарита при отбойке горной массы с использованием граммонита 79/21 ниже, чем с использованием гранулита АС-8, несмотря на то, что теплота взрыва гранулита АС-8 (1241 ккал/кг) выше теплоты взрыва граммонита 79/21 (1031 ккал/кг).

По-видимому, в алюмосодержащих ВВ определенная часть алюминия не успевает разложиться во фронте детонационной волны и дальнейшее окисление алюминия происходит при взаимодействии его с продуктами взрыва на стадии их расширения, т. е. за плоскостью Чепмена – Жуге. Отсюда следует, что расчет энергетических характеристик ВВ, содержащих в своем составе алюминий, с использованием традиционных схем дает завышенные значения теплоты взрыва.

В то же время анализ известных данных [95–97] показывает, что смеси АС-ДТ-А1 на обычной гранулированной селитре обладают хорошими детонационными свойствами. Скорость детонации возрастает почти прямо пропорционально содержанию алюминия. Это объясняется тем, что горение алюминия в первую очередь определяется содержанием кислорода в продуктах взрыва. При увеличении содержания алюминия в смеси АС-ДТ-А1 кислородный баланс АС-ДТ становится все более положительным и в продуктах взрыва, образующихся на первой стадии, возрастает количество кислорода. В результате

более полного окисления алюминия кислородом выделяется значительное количество энергии, часть из которой идет на поддержание детонационного фронта, а это приводит к увеличению скорости детонации.

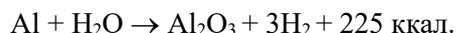
Замеры количества токсичных газов показали, что алюмосодержащие смеси АС-ДТ по сравнению со смесями ТНТ-АС-ДТ выделяют значительно меньшее количество токсичных газов, что позволяет снижать потребности свежего воздуха, необходимого для проветривания забоев, т. е. сократить время проветривания после проведения взрывных работ [98].

Можно предположить, что на детонационную способность смесей АС-ДТ-А1 значительное влияние будет оказывать крупность частиц алюминия, т. к. скорость горения частиц алюминия зависит от их диаметра [92, 99]. Кроме того, частицы небольшого размера, обладающие меньшей тепловой инерцией, будут быстрее прогреваться до температуры вспышки  $Al_2O_3$ .

Влияние крупности частиц алюминия на скорость детонации смесей АС-ДТ-А1 изучалось на шпурах диаметром 42 мм. В экспериментах использовался порошок ПА-4 крупностью 20–50 мкм и алюминиевая крупка «АКП» крупностью 500–1250 мкм. Испытывались составы, содержащие 3 % алюминия. В качестве окислителя использовали мелкодисперсную пористую аммиачную селитру — миниприлит МП. Измерения скорости детонации показали, что скорость детонации смеси АС-ДТ-А1 с использованием алюминиевого порошка равна 3209 м/с, а с использованием крупки — 3076 м/с [99].

Таким образом, при уменьшении размеров частиц алюминия скорость детонации увеличивается, что связано с возрастанием полноты сгорания частиц во фронте детонационной волны.

Алюминиевые порошки являются дорогостоящими и небезопасными продуктами. Алюминий в ряду электрохимических потенциалов стоит ниже водорода и может реагировать с водой с выделением значительного количества теплоты:



Это может привести к загоранию порошков и самопроизвольным взрывам. Поэтому емкости с порошком алюминия предохраняют от попадания, влаги и прямых солнечных лучей. Кроме того, при использовании алюминия постоянно ведут контроль температуры внутри емкостей хранения. В случае разогрева порошка емкость закрывают крышкой для предотвращения доступа воздуха, выносят из хранилища и помещают в так называемый «тушильник».

Наибольшее распространение на подземных горных работах горнорудных предприятий России и ближнего зарубежья получил гранулит А6. Компонентный состав гранулита А6 представлен в табл. 13 [100].

Таблица 13

Компонентный состав гранулита А6

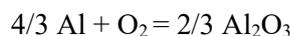
Компоненты	Норма, мас. %
Селитра аммиачная ГОСТ 2-85	$90,0 \pm 3,0$
Дизельное топливо	$4,0 \pm 1,0$
Порошок алюминия	$6,0 \pm 2,0$

На основе технологии и оборудования, разработанных НПП «Интеррин», спроектировано, построено и эксплуатируется несколько комплексов, часть из которых действует в подземных условиях [101]. В Казахстане мини-заводы действовали на таких крупных предприятиях, как «Корпорация Казахмыс» Атасуйское

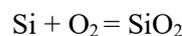
рудоуправление, Соколовско-Сарбайское ГПО, АООТ «Шубаркольский разрез», Карагайлинское РУ; в России — ОАО «ГМК “Норильский никель”», Тырныаузский ВМК, Садонский СЦК; в Кыргызстане — Кара-Балтинский ГРК; в Украине — Криворожский ГМК, Запорожский ЖРК [102, 103].

### 2.3.2. Гранулиты, содержащие ферросплавы

Тепловой эффект от взрыва смесей АС-ДТ может быть повышен путем использования ферросплавов [104]. Из выпускаемых ферросплавов практическое использование в промышленных ВВ нашел сплав ФСА [105] с содержанием кристаллического кремния Si — 40–65 %, металлического алюминия Al — 10–30 % и остальное — металлическое железо Fe. Сплав в измельченном состоянии сильно экзотермичен и в смеси с окислителем бурно реагирует с выделением большого количества энергии в малый промежуток времени. При окислении 1 кг порошка алюминия по реакции:



выделяется 3708 ккал энергии в виде тепла. При окислении 1 кг кремния по реакции:



выделяется 3625 ккал.

Рецептурный состав гранулита-8ФСА приведен в табл. 14.

Таблица 14

Массовая доля компонентов гранулита-8ФСА

Компонент	Норма, %
Аммиачная селитра гранулированная или пористая	90,0 ± 3,0
Нефтепродукт (дизельное топливо или индустриальное масло)	4,0 ± 1,0
Порошок ФСА	6,0 ± 2,5

Гранулит-8ФСА характеризуется химической и термической стойкостью. Промышленные испытания гранулита проводились в подземных условиях Малеевского рудника АО «Казцинк» [106]. ВВ готовили на стационарном пункте в подземной выработке рудника. В ходе сравнительных испытаний проведено 70 взрывов в забоях, в том числе 50 по полиметаллической и медно-колчеданной руде с коэффициентом крепости  $f = 14–15$ , и 20 по породе с коэффициентом  $f = 17–18$ . Сечение проходимых выработок составляло 18,8 м<sup>2</sup>, диаметр компенсационных шпуров — 65, остальных — 43 мм. Глубина компенсационных — 2,8, остальных — 2,6 м. Кроме того, испытания проводились и при глубине шпуров 4,3 м. Зарядание шпуров производилось шведской самоходной зарядной машиной ДС-11В при давлении сжатого воздуха  $4,5 \times 10^5$  МПа. Иницирование зарядов проводили с помощью СИНВ-Ш. Сравнение гранулита-8ФСА с гранулитом А6 (с алюминиевым порошком ПА-2 в составе) производили в одних и тех же забоях.

Скорость детонации гранулита по всей длине восстающей скважины глубиной 39,5 м составила 3592 м/с.

По результатам взрывов установлено, что при использовании гранулита-8ФСА с содержанием ФСА в составе 7 %, и гранулита А6 содержанием алюминия 6 % наблюдался одинаковый к.и.ш., оконтуривание выработок соответствовало проекту.

Также проводили сравнительные испытания гранулита-8ФСА при скважинной отбойке [107]. Коэффициент крепости руды  $f = 14–15$ , диаметр восходящих скважин

(глубиной от 5 до 20 м) – 115 мм, расположение веерное, расстояние между веерами — 2,5–2,7 м. Проведено 23 массовых взрыва, при которых отбито 100 тыс. т балансовой руды. Заряжание скважин проводилось с помощью зарядных машин «Ульба-400МИ» при длине зарядного шланга 50 и 100 м.

В ходе заряжания скважин и выдерживании ВВ в течение до 3 суток не наблюдалось интенсивного стекания дизельного топлива, а также выноса с отработанным сжатым воздухом порошка ФСА, просыпь ВВ не превышала 0,3 %. Отказов и выгорания ВВ не наблюдалось.

Между тем в ходе пневмозаряжания скважин при дальности транспортирования зарядных шлангов более 50 м, при содержании порошка ФСА более 6 %, из-за его повышенной абразивности и угловатой формы выявлен увеличенный (в 2–3 раза) износ полиэтиленовых шлангов на их концах (у забоя) и в местах их перегибов по сравнению с пневмозаряжением гранулитом А-6 с алюминиевым порошком.

По результатам анализа массовых взрывов руды установлено, что при размере кондиционного куска полиметаллических и медно-колчеданных руд в 500 мм выход негабарита составил от 0,9 до 3,8 %. «Затяжек» в кровле камер не наблюдалось. Выход руды с 1 п. м составил 20–21 т, удельный расход на первичное взрывание — 1,5–1,9 кг/м<sup>3</sup> как при использовании гранулита-8ФСА, так и гранулита А6 [107].

На протяжении длительного времени на всех подземных рудниках АО «Апатит» для отбойки горной массы применялся граммонит 79/21, который по своей эффективности полностью удовлетворял производство по качеству дробления. Запрет на использование для подземной отбойки штатного граммонита 79/21 привел предприятие к необходимости замены его на граммотолы или гранулит АС-8 заводского изготовления.

Дальнейший опыт работы показал, что при использовании граммотолов не обеспечивается необходимая степень дробления горных пород. Это вызвано, по всей видимости, неравномерным распределением тротила в составе и не достаточным дроблением гранул тротила и селитры при пневмозаряжании скважин, в результате не формируется колонка заряда необходимой плотности и снижаются детонационные и энергетические характеристики ВВ [108].

Не достигалась необходимая степень дробления и при применении гранулита АС-8, несмотря на то, что его теплота взрыва значительно выше теплоты взрыва граммонита 79/21. Снижение работоспособности гранулита АС-8, по всей видимости, также связано с особенностями пневмозаряжания скважин [94]. В гранулите АС-8 используется алюминиевая пудра, представляющая собой плоские частицы размером 5–10 мкм с высокой удельной поверхностью (до 5000 см<sup>2</sup>/г). Суммарная поверхность частиц пудры превышает общую поверхность частиц аммиачной селитры, в результате гранулы селитры покрываются несколькими слоями пудры. При пневмозаряжании алюминиевая пудра легко срывается с поверхности селитры и концентрируется в межгранульном пространстве, а часть выносится через устье скважин. Из 8 % алюминия, содержащегося в гранулите до заряжания, в заряде остается около 5–6 %. Вынос алюминия из заряда приводит к повышенному содержанию его в воздухе рабочей зоны, а также к несбалансированности заряда ВВ по стехиометрии, что ведет к снижению скорости детонации и повышенному выделению токсичных продуктов взрыва.

## 2.4. Гранулиты местного изготовления в условиях ОАО «Апатит»

Для удовлетворения собственных потребностей в ВВ для подземных горных работ ОАО «Апатит» в 2004 г. ввело в эксплуатацию пункт по производству бестротилового гранулированного вещества. Первоначально на пункте изготавливали гранулит А6, который применялся в основном при поэтажной системе разработки с отбойкой руды глубокими скважинами и торцевым выпуском и при проведении горных выработок. При переходе на гранулит А6 при отбойке руды глубокими скважинами выявлен ряд недостатков его применения — в ряде случаев не достигнуто требуемое качество дробления руды; ухудшились показатели выпуска; увеличились потери и разубоживание; в процессе заряжения зафиксированы случаи превышения предельно-допустимой концентрации паров нефтепродуктов в воздухе рабочей зоны забоя [93].

Для устранения этих недостатков необходимо было в первую очередь совершенствовать составы взрывчатых веществ для подземных горных работ с отработкой параметров отбойки и технологии заряжения. На основе мелкодисперсной пористой аммиачной селитры МП были разработаны составы гранулита-МП [109], марок 3МП, 5МП и 5МПГ с различным количеством алюмосодержащего порошка  $AlSi_{25}$  [110]. Для установления параметров БВР были выполнены сравнительные эксперименты по определению взрывной эффективности и измерению скорости детонации составов гранулитов, изготовленных с использованием селитры МП. Показано, что гранулит, изготовленный на селитре МП, имеет более низкую плотность заряда, обладает более высокой скоростью детонации и работоспособностью по сравнению с гранулитом на обычной гранулированной аммиачной селитре [111].

На рисунке 21 приведена динамика применения алюминийсодержащих ВВ на Кировском руднике ОАО «Апатит» за 2001–2010 гг. Видно, что разработанные гранулиты-МП почти полностью заменили заводской гранулит-АС8, который стали применять только при подготовке массовых взрывов.

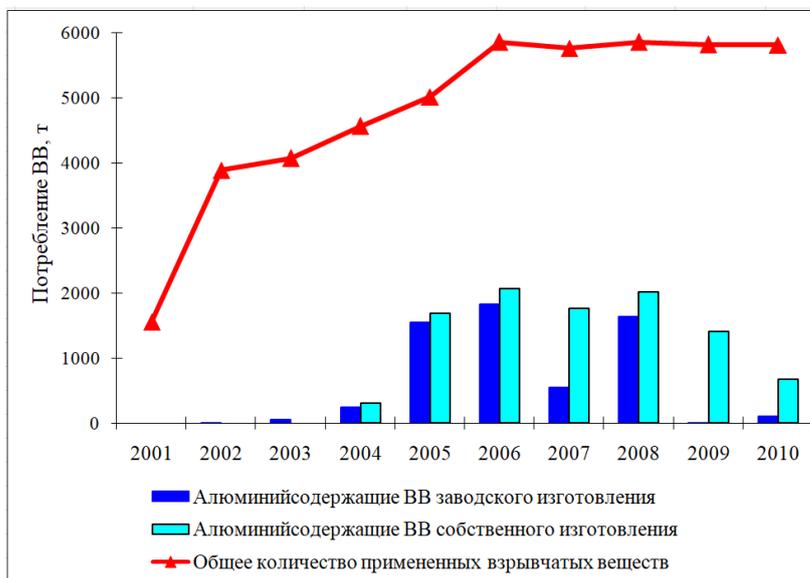
Из всех допущенных взрывчатых составов заводского изготовления для подземной отбойки крепких горных пород наибольшее распространение получили гранулит АС-8, гранулит А6 и их разновидности местного изготовления. На подземных рудниках ОАО «Апатит» при производстве массовых взрывов после трагедии 2012 г. взамен граммонита 79/21 стали применять гранулит АС-8 и алюмосодержащие гранулиты собственного изготовления под маркой гранулит-5МПГ. В гранулите-5МПГ в качестве окислителя используется смесь 40 % пористой селитры марки МП и 60 % гранулированной селитры по ГОСТ 2-85, в качестве горючего — дизельное топливо и порошок силикоалюминия крупностью 300–900 мкм.

В результате довольно длительного применения данных ВВ среди специалистов ОАО «Апатит» сложилось разное мнение об эффективности их действия при дроблении массивов горных пород. Особенно много противоречивых мнений относилось к гранулиту-5МПГ.

В связи с этим оценивалась эффективность действия смесевых взрывчатых веществ и подбирался оптимальный состав для отбойки апатит-нефелиновых руд в подземных условиях при использовании пневматического заряжения.

На первом этапе были проведены испытания заводского гранулита АС-8 различных партий поставки. Взрывание зарядов производили в стальных трубах

с внутренним диаметром 50 мм, толщиной стенки 5 мм и длиной 500 мм. Оценка скорости детонации производилась оптоволоконным регистратором, работоспособность оценивалась относительно аммонита 6ЖВ по методу расширения стальных колец [79]. Результаты испытаний представлены в табл. 15 и на рис. 22.



**Рис. 21.** Динамика применения алюминийсодержащих взрывчатых веществ на Кировском руднике ОАО «Апатит» в период 2001–2010 гг.

*Таблица 15*

Результаты испытаний гранулита АС-8

Номер образца гранулита АС8, №	1	2	3	6ЖВ (4)
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,13	1,14	1,16	0,99
Скорость детонации, км/с	2,97	3,05	2,97	4,57
Относительная работоспособность	0,63	0,54	0,55	1



**Рис. 22.** Скорость детонации и работоспособность гранулитов АС-8 для различных поставляемых партий и их сравнение с аммонитом 6ЖВ

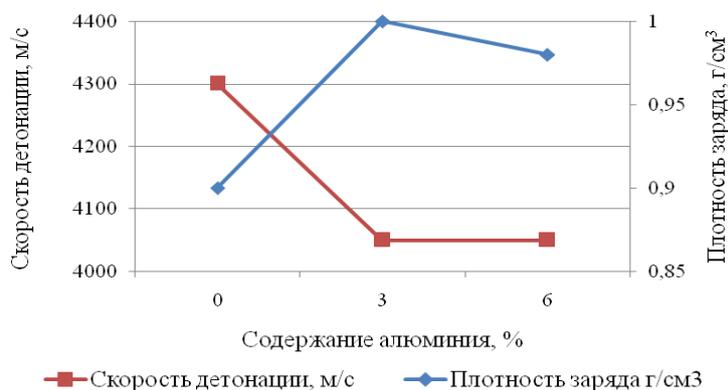
Как следует из представленных результатов, средняя скорость детонации гранулита АС-8 при плотности заряжания  $1,13\text{--}1,16\text{ г/см}^3$  составляет примерно  $3000\text{ м/с}$ . Работоспособность составов АС-8 составляет примерно половину от аммонита 6ЖВ.

На втором этапе испытывались гранулиты, изготовленные на месте применения вручную на полигоне непосредственно перед взрывом или в смесительной установке УИ-2 в подземных условиях. Для приготовления гранулитов использовали:

- мелкогранулированную пористую аммиачную селитру марки МП по ТУ 2143-036-00203789-2003 производства ОАО «Акрон» (МП);
- аммиачную селитру пористую Yara AB техническую для изготовления промышленных взрывчатых веществ по ТУ 2143-005-86730570-2008 производства Yara-AB (Я);
- порошки алюминиевые AlSi25 (ЕСКА и GRANAL85) по ТУ 1713-001-93350951-07;
- топливо дизельное по ГОСТ 305-82 или масло соляровое по ОСТ 38157-74.

Первоначально оценивались взрывчатые характеристики гранулитов, изготовленных с использованием порошка силикоалюминия (AlSi25) крупностью  $300\text{--}900\text{ мкм}$  [111].

Взрывчатую смесь готовили непосредственно перед взрывом смешением мелкогранулированной пористой селитры марки МП с порошком силикоалюминия и добавлением дизельного топлива в количестве, обеспечивающим нулевой кислородный баланс. Взрывание производилось в стальных трубах  $100\times 6\text{ мм}$  длиной  $1\text{ м}$ . Заряжание труб производилось пневмозарядчиком РПЗ-0.6 через специальные насадки. Инициирование — патроном аммонита 6ЖВ массой  $200\text{ г}$ . Скорость детонации измеряли оптоволоконным способом на базе  $15\text{ см}$ . Результаты испытаний представлены на рис. 23.



**Рис. 23.** Изменение скорости детонации гранулитов на мелкогранулированной пористой селитре МП с использованием порошка силикоалюминия AlSi25 (крупность  $300\text{--}900\text{ мкм}$ )

В составах на мелкогранулированной пористой селитре и порошке силикоалюминия при одинаковой плотности заряжания с увеличением содержания алюминия имеет место снижение скорости детонации.

С целью увеличения объемной концентрации энергии заряда далее испытывали гранулиты на основе селитр с разной насыпной плотностью с добавлением порошка силикоалюминия (размер частиц —  $150\text{--}900\text{ мкм}$ ) и дизельного топлива в количестве, обеспечивающим нулевой кислородный баланс (табл. 16, рис. 24). В таблице и на рисунке использованы следующие сокращения: АСУ — гранулит АС-ДТ на основе аммиачной селитры Yara; 6МП+Г — гранулит

на основе смеси селитр пористой МП и ГОСТ 2-85 (40/60) и 6 % порошка силикоалюминия; 8МП+Г — гранулит на основе смеси селитр пористой МП и ГОСТ 2-85 (40/60) и 8 % порошка силикоалюминия; 6Я+Г — гранулит на основе смеси селитр пористой Яга и гранулированной по ГОСТ 2-85 (40/60) и 6 % порошка силикоалюминия; 6МП — гранулит с селитрой пористой МП и 6 % порошка силикоалюминия; 6Я — гранулит с использованием селитры пористой Яга и 6 % порошка силикоалюминия; 6ЖВ — аммонит 6ЖВ.

Таблица 16

Результаты испытаний гранулитов с порошком силикоалюминия AlSi25  
(размер частиц — 150–900 мкм)

Тип ВВ (номер образца)	АСУ (1)	6МПГ (2)	6ЯГ (3)	6МП (4)	6Я (5)	6ЖВ (6)
Скорость детонации, м/с	3770	2920	3275	3510	3667	4570
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	0,84	1,13	1,04	1,09	0,88	0,99
Относительная работоспособность	0,74	0,34	0,54	0,60	0,61	1,00

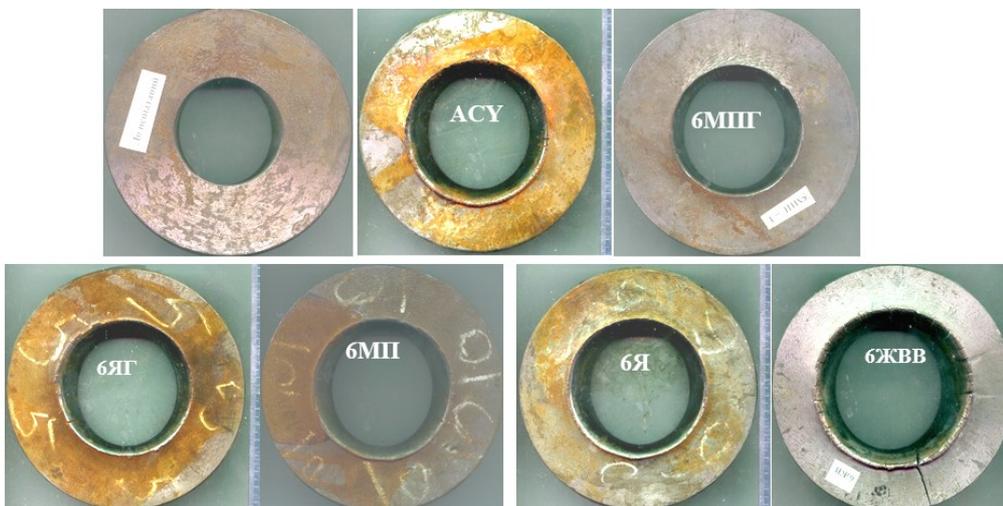
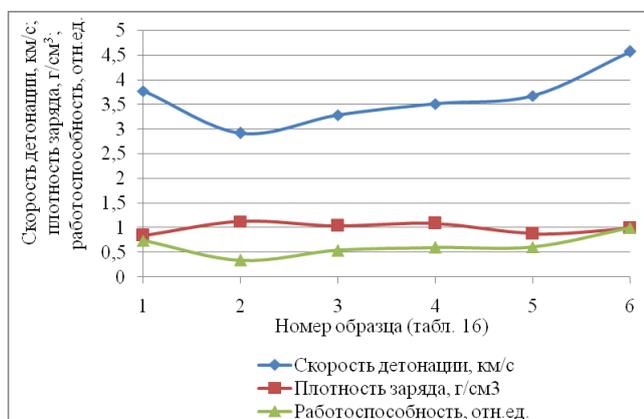
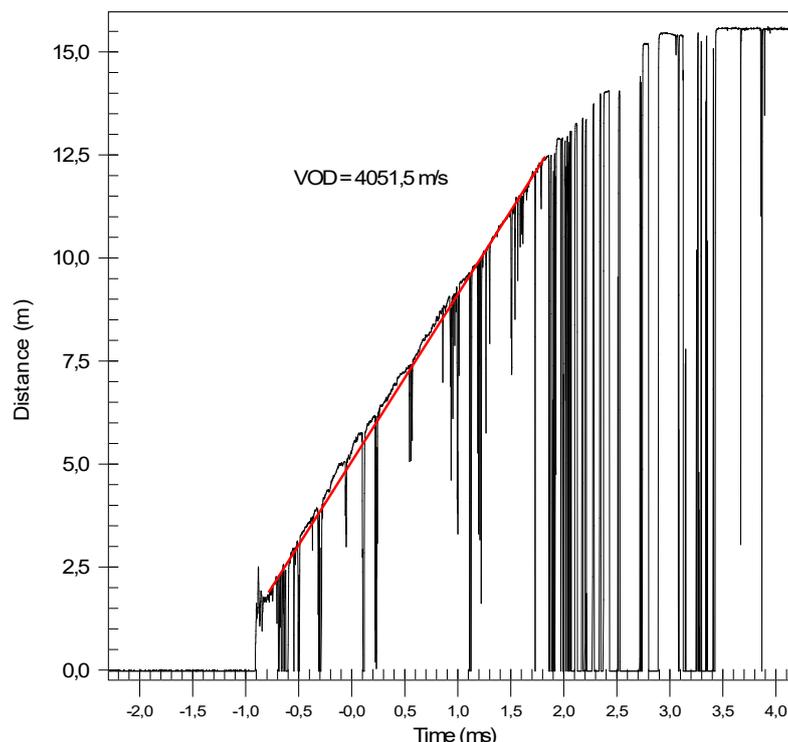


Рис. 24. Изменение скорости детонации и относительной работоспособности гранулитов на различных селитрах с порошком силикоалюминия AlSi25 (150–900 мкм) в составе

Условия проведения экспериментов те же, что и выше, но в стальных трубах с внутренним диаметром 50 мм, толщиной стенки 5 мм и длиной 500 мм. Для инициирования использовали патрон аммонита 6ЖВ массой 200 г.

Как следует из представленных данных, при одинаковом содержании порошка силикоалюминия наибольшей работоспособностью и скоростью детонации обладают составы, приготовленные на пористых селитрах, причем с небольшим преимуществом лидирует состав, приготовленный на мелкогранулированной пористой селитре Уага. На втором месте по эффективности действия взрыва стоит состав, приготовленный на пористой селитре марки МП. Введение в составы смесей гранулированной селитры снижает показатели взрывной эффективности. Возможно, это вызвано тем, что при пневмозарядании гранулы пористой селитры разбиваются на более мелкие фракции, а гранулированная селитра остается почти неизменной. Более активные мелкие фракции могут превращаться в газообразные продукты быстрее крупных, причем взаимодействия продуктов превращения крупных фракций могут сместиться по времени и обусловить этим рост химических потерь и снижение параметров детонационной волны. В данном случае необходимо стремиться использовать в смесях пористую селитру, позволяющую обеспечивать допустимую плотность заряда. Кроме того, из представленных на рис. 24 данных следует, что использование в гранулите порошка силикоалюминия крупностью 150–900 мкм снижает скорость детонации ВВ по сравнению с АС-ДТ на этих же селитрах (см. рис. 24).

Проверка в натуральных условиях состава гранулита-МП с 6 % силикоалюминия показала, что при взрыве скважины 102 мм в веере, при промышленном пневмозарядании, скорость детонации еще увеличивается и достигает значения 4050 м/с (рис. 25).



**Рис. 25.** Полезная часть записи при взрыве заряда гранулита с 6 % силикоалюминия

Далее испытывали гранулиты с использованием селитры МП с 6 % порошка алюминия ПА-2 (размер частиц — менее 45 мкм) и силикоалюминия (размер частиц — 150–300 мкм) и добавлением дизельного топлива в количестве, обеспечивающим нулевой кислородный баланс. Условия проведения экспериментов те же (стальные трубы с внутренним диаметром 50 мм, толщиной стенки 5 мм и длиной 500 мм). Все составы готовили непосредственно перед взрывом ручным смешением. Для инициирования использовали аммонит 6ЖВ массой 100 г. Плотность заряжания составила 1,00 г/см<sup>3</sup>. Скорость детонации измеряли оптоволоконным способом на базе 15 см. Относительную работоспособность смесей определяли по степени расширения стального кольца и деформированию свинцового столбика [111]. Результаты испытаний представлены в табл. 17.

Для сравнения в табл. 16 приведены результаты для граммонита М21, содержащего 21 % гранулированного тротила и 79 % гранулированной аммиачной селитры по ГОСТ 2-85, и относительная работоспособность по методу стального кольца гранулитов в стальных трубах диаметром 50 мм. Видно, что бризантность гранулита с мелкодисперсным порошком алюминия ПА-2 (состав 1) находится на одном уровне с граммонитом и выше, чем для гранулита с порошком силикоалюминия (состав 2). Фугасное действие — наоборот, гранулит с порошком силикоалюминия превосходит и гранулит с мелкодисперсным порошком ПА-2 и тротилсодержащий граммонит М21.

Таблица 17

Результаты испытаний гранулитов на мелкодисперсной селитре МП с использованием порошка алюминия ПА-2 (1), силикоалюминия (2) и дизельного топлива

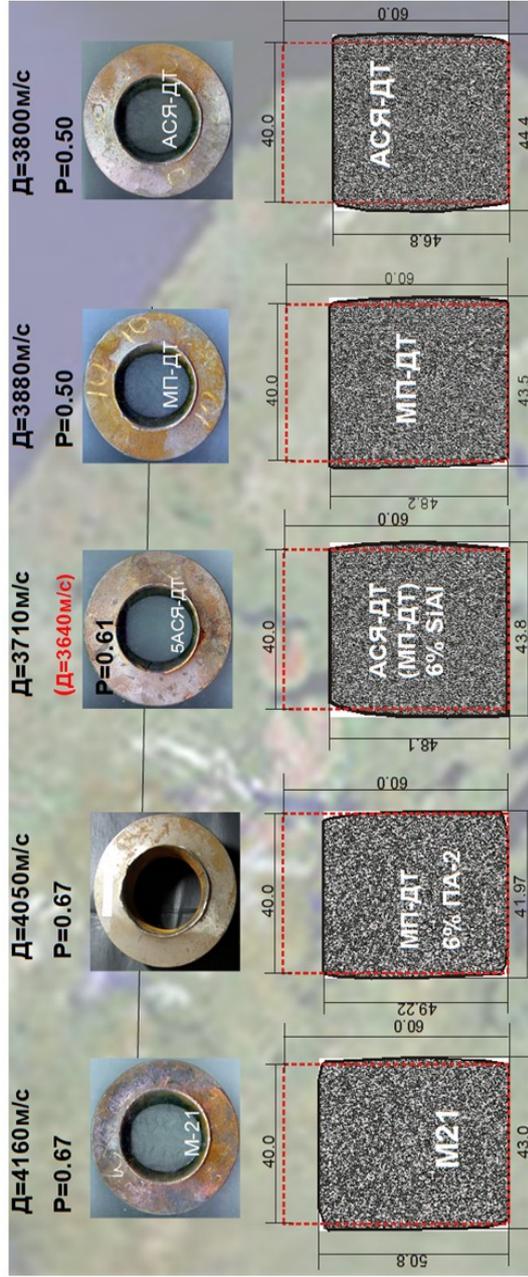
	Плотность заряжания, г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с	Относительная работоспособность		
			уменьшение высоты свинцового столбика $\Delta l$ , мм	увеличение диаметра свинцового столбика $\Delta d$ , мм	по методу стального кольца, относительно аммонита 6ЖВ
Состав 1	1,01	3856	10,78	1,97	0,67
Состав 2	1,00	3555	11,90	3,80	0,61
Граммонит М21	1,16	4167	9,20	3,00	0,67

Таким образом, проведенные эксперименты позволили ранжировать смесевые ВВ собственного изготовления по эффективности их действия. Эффективность действия в полигонных условиях оценивалась по трем параметрам: скорости детонации, степени расширения стального кольца (бризантное действие взрыва), деформированию свинцового столбика (фугасное действие взрыва). Оценивали составы заводского изготовления — граммонит М21, гранулиты с различными порошками алюминия как по составу, так и по дисперсности (гранулит с селитрой МП, 6 % порошка ПА-2; гранулит с селитрой Yara) и смеси АС-ДТ на селитре МП и Yara (рис. 26).

Составы, приготовленные на мелкогранулированной пористой селитре марки МП с использованием алюминиевого порошка ПА-2, по эффективности действия сопоставимы с тротилосодержащими ВВ заводского изготовления, в частности, с граммонитом М21.

Составы, приготовленные на мелкогранулированных пористых селитрах марки МП и Yara с использованием порошка силикоалюминия крупностью 150–300 мкм, несколько уступают первым двум составам как по скорости детонации, так и по работоспособности.

Составы, приготовленные на мелкогранулированных пористых селитрах марки МП и Yara без алюминиевых порошков, хотя и обладают высокой скоростью детонации, но по работоспособности сопоставимы с гранулитом марки 5МПГ (40 % пористой селитры марки МП, 60 % гранулированной селитры по ГОСТ 2-85 и 6 % силикоалюминия).



**Рис. 26.** Эффективность действия смесевых ВВ местного изготовления: Д — скорость детонации, м/с; Р — относительная работоспособность заряда отн. ед.; в нижней части приведены размеры свинцового столбика после взрыва

Добавление в эти составы металлического горючего (порошка силикоалюминия AlSi25 марки GRANAL85 по ТУ 1713-001-93350951-07) приводит к небольшому снижению скорости детонации и работоспособности (см. табл.16 образец 4 и 5), что делает их менее выгодными по сравнению с простыми смесями АС-ДТ.

С другой стороны, при использовании мелко гранулированной пористой селитры Yara с алюминиевыми порошками происходит плохое перемешивание компонентов. Из-за высокой впитывающей способности дизельного топлива на поверхности гранул практически не остается, и смесь получается «сухой». Поэтому при растаривании, перевозках и перегрузках составы расслаиваются, и не обеспечивается необходимое распределение компонентов. На рисунке 27 приведены фотографии смесей, приготовленных на селитрах марки МП и Yara.



**Рис. 27.** Распределение порошка алюминия в гранулитах при использовании селитр Yara и марки МП

Если для селитры марки МП имеет место более-менее равномерное распределение по объему, то для селитры Yara после встряхивания образца смесь расслаивается и порошок концентрируется в нижней части объема. В данном случае и при пневмозарядке добиться равномерного распределения компонентов по колонке заряда не представляется возможным. Поэтому для селитры Yara нет смысла без специальных добавок вводить алюминиевые порошки.

## **2.5. Совершенствование алюмосодержащих гранулитов с целью обеспечения их безопасности при пневмозаряжении**

Несмотря на то, что в мире сохраняется тенденция роста объемов применения водоустойчивых взрывчатых веществ, по-прежнему лидером в использовании остаются смесевые гранулированные ВВ, основной компонент которых гранулированная аммиачная селитра.

Приведенные выше данные по определению впитывающей способности гранул аммиачной селитры по отношению к дизельному топливу показали, что впитывающая способность марок современных гранулированных аммиачных селитр намного превышает необходимое значение для достижения нулевого кислородного баланса даже в смесях АС-ДТ. Такая высокая впитывающая способность селитры предъявляет более высокие требования к смесительному оборудованию, чтобы обеспечивать равномерное распределение дизельного топлива. Оборудование, применяемое для смешивания, должно обеспечивать равномерность и достаточность

перемешивания всего количества добавок. Плохое смешивание может привести к повышению риска недостаточного инициирования, уменьшению мощности взрывания, увеличению количества токсичных газов, выделяющихся при взрыве.

Приготовление смесевых гранулированных взрывчатых веществ происходит на установках либо поточного, либо циклического действия. Поточные технологии обычно применяются при изготовлении ВВ в смесительно-зарядных машинах на местах применения ВВ. Технологии циклического типа реализованы в различных смесительных установках. Смешивание на стационарных установках предпочтительнее смешивания в смесительно-зарядных машинах. В России для изготовления двух и трехкомпонентных смесевых ВВ, используемых в подземных условиях, Ростехнадзором к постоянному применению допущено не так много установок, одна из них — смесительная установка УИ-2 [78].

Технология приготовления трехкомпонентных гранулитов реализована следующим образом. Каждый мешок с аммиачной селитрой вскрывается и перегружается в скип установки УИ-2. Туда же через объемный дозатор поступает порошок алюминия. Включается привод скипового подъемника и скип с аммиачной селитрой и алюминиевым порошком поднимается вверх и выгружается в воронку смесительной установки. Включается привод смесителя. Из отделения хранения нефтепродукт насосом перекачивают в расходный бак емкостью 0,2 м<sup>3</sup>, расположенный на отметке 5,2 м (рис. 28). Дозирование жидкого нефтепродукта в смеситель установки УИ-2 производится объемным дозатором. Для подачи в смеситель порции нефтепродукта используется сжатый воздух, кран подачи которого выведен на пульт управления. Подача компонентов (аммиачной селитры с алюминиевым порошком и жидкого нефтепродукта из дозатора) в смесительную камеру происходит одновременно. После перемешивания компонентов в течении 30–40 с в технологическом режиме привод смесителя переключением ручки управления в положение «выгрузка» реверсируется, и готовый продукт подается в накопительный бункер установки. Расход жидкого нефтепродукта устанавливается в соответствии с возможными вариантами реализации, в зависимости от марки гранулита и марки используемой аммиачной селитры.

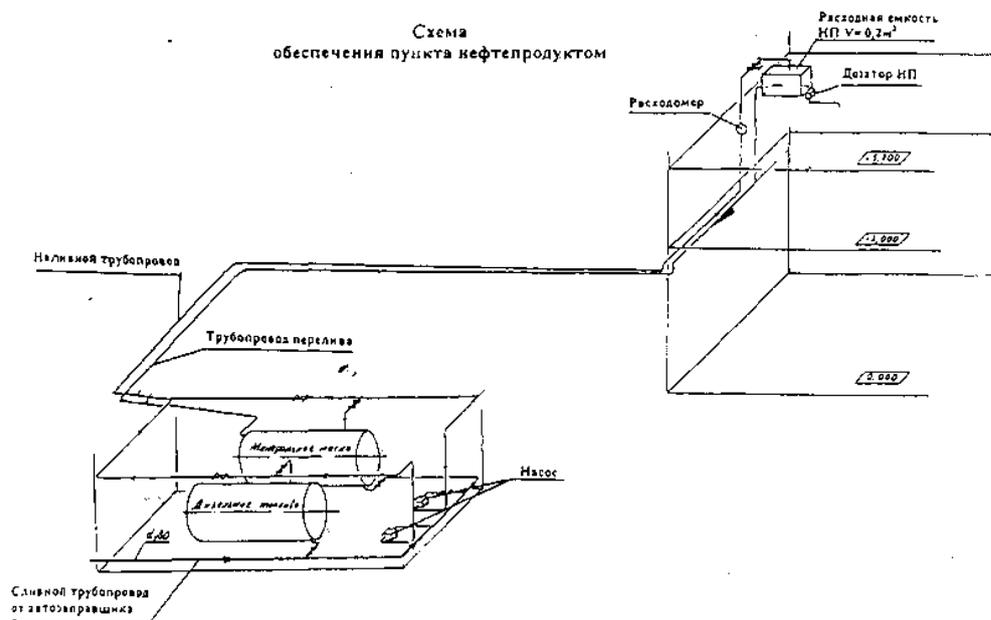


Рис. 28. Схема подготовки и дозирования жидкого нефтепродукта в смеситель установки УИ-2

В процессе эксплуатации пункта приготовления гранулированных взрывчатых веществ проявился недостаток используемой схемы подачи жидкого нефтепродукта в смеситель установки УИ-2: при одновременном начале подачи компонентов в смеситель установки аммиачная селитра с порошком алюминия из скипа практически мгновенно оказывается в воронке смесителя, а истечение порции жидкого нефтепродукта из расходного бака происходит за более длительный промежуток времени. В результате, при перемешивании компонентов в смесителе, продолжающемся в течение 30–40 с, не вся порция нефтепродукта поглощается аммиачной селитрой; истечение нефтепродукта в смеситель продолжается после окончания перемешивания и поступления готового продукта в накопительный бункер установки (рис. 29). Такой порядок приготовления неизбежно сказывался на качествеготавливаемых на установке взрывчатых смесей.



Подача дизельного топлива

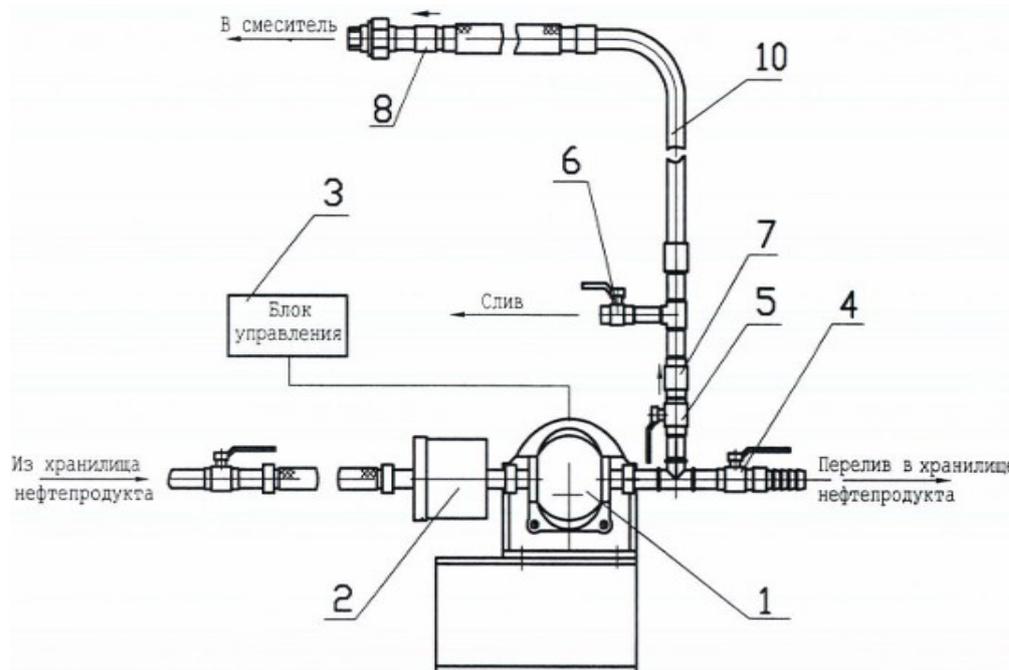
**Рис. 29.** Место подачи жидкого нефтепродукта в смеситель установки УИ-2

С целью синхронизации поступления компонентов на перемешивание и гарантии полного наличия их в смесителе при процессе перемешивания специалистами ОАО «Апатит» было предложено использовать систему объемного дозирования, схема которой приведена на рис. 30.

Предложенная система объемного дозирования включает в себя: агрегат насосный (поз. 1, рис. 30), электромагнитный клапан (поз. 2, рис. 30), блок управления (поз. 3, рис. 30), краны (поз. 4–6, рис. 30), обратный клапан (поз. 7, рис. 30) и соединительные части трубопроводов.

Всасывающий трубопровод системы дозирования соединяется с хранилищем нефтепродукта, при включенном насосном агрегате регулировкой кранов 4 и 5 и настройкой времени срабатывания реле времени (РВ) устанавливается требуемый по таблицам 11–15 Регламента [112] расход нефтепродукта на выходе из нагнетательного трубопровода, присоединенного к разбрызгивателю смесительной установки УИ-2. Объем выдаваемой дозы жидкого нефтепродукта — от 1 до 10 л, диапазон срабатывания РВ составляет от 0,3 до 60 с, что гарантирует одновременное

наличие всех компонентов в смесителе и тем самым более качественное перемешивание компонентов в смесительной камере установки УИ-2.



**Рис. 30.** Схема включения системы объемного дозирования жидкого нефтепродукта в смеситель установки УИ-2

При регулировании системы объемного дозирования жидкого нефтепродукта и настройки времени срабатывания реле времени, для получения требуемой порции нефтепродукта на выходе из нагнетательного трубопровода на установке УИ-2 были приготовлены партии смесей АС-ДТ.

Для допуска установленного оборудования в эксплуатацию был проведен количественный анализ образцов смесей, изготовленных на установке УИ-2, оборудованной предложенной системой дозирования жидкого компонента. Испытаниям были подвергнуты три образца.

Составы гранулит готовились с использованием пористой аммиачной селитры производства Yara в количестве 91 %, порошка силикоалюминия — 6 %, дизельное топливо — остальное (до 100 %). В составах Yara-ДТ содержание дизельного топлива — 5,7 %.

По внешнему виду все три образца представляли собой сыпучий продукт в виде смеси однородных гранул розового цвета, равномерно окрашенных по всему объему, имеющих запах дизельного топлива.

Определение массовой доли нефтепродукта ( $X_H$ ) в смеси производили по ГОСТ 14839.1-69 методом экстрагирования.

Посуда, материалы и оборудование, используемые при проведении анализа:

- шкаф сушильно-стерилизационный ШСС-80;
- весы лабораторные технические ВЛКТ-500;
- воронки стеклянные по ГОСТ 25336-82;
- фильтры бумажные обеззоленные ФМ по ГОСТ 2642-001-13927158-2003;
- стаканчики стеклянные по ГОСТ 25336-82;
- эксикатор по ГОСТ 23932-90 с силикагелем по ГОСТ 3956-76;
- ацетон по ГОСТ 2603-79 осушенный и перегнанный.

Порядок проведения анализа был следующий. Из образца брали навеску массой около 30 г ( $m$ ), записывая результат с точностью до второго десятичного знака, помещали в стеклянный стакан объемом 250 мл, в который заливали 150 мл ацетона и перемешивали содержимое стеклянной палочкой до полного растворения нефтепродукта. Через 10–15 мин содержимое снова перемешивали и количественно переносили на предварительно взвешенный фильтр ( $m_2$ ). Остаток на фильтре промывали ацетоном 3 раза порциями по 30 мл. Полноту растворения определяли по отсутствию масляного пятна на фильтровальной бумаге.

Обработанные фильтры с нерастворимым осадком выдерживали в вытяжном шкафу в течение 15–30 мин и сушили в сушильном шкафу при температуре 60 °С в течение 1 ч, после чего охлаждали в эксикаторе не менее 40 мин и взвешивали, записывая результат. Сушку производили несколько раз, до получения постоянной массы при взвешивании ( $m_1$ ).

Массовую долю нефтепродукта ( $X_H$ ) в % вычисляют по формуле:

$$X_H = 100\left(1 - \frac{m_1 - m_2}{m}\right), \quad (8)$$

где  $m_1$  — масса фильтра с остатком, г;  $m_2$  — масса фильтра, г;  $m$  — масса навески образца, г.

Было проведено по три параллельных определения, по результатам которых вычислено среднее арифметическое значение массовой доли жидкого нефтепродукта в испытуемых образцах.

В испытании получено:

- образец № 1 — 5,7 %;
- образец № 2 — 5,5 %;
- образец № 3 — 5,9 %.

При изготовлении образцов расчет компонентов смеси производился исходя из соотношения (в %): АС – ДТ = 94,5 ± 0,5 – 5,5 ± 0,5.

По результатам проведенного анализа видно, что получаемый продукт соответствует заданным компонентным характеристикам.

Таким образом, модернизация системы впрыска дизельного топлива гарантировала одновременное наличие всех компонентов в смесителе для их дальнейшего перемешивания в смесительной камере установки УИ-2, тем самым обеспечивая необходимое соотношение компонентов в изготавливаемых составах, при котором достигается наибольшее выделение энергии и минимального количества токсичных газов.

Полученные смеси с добавлением 4 % воды пневмозарядчиком РПЗ-0.6 через специальную насадку заряжали в трубы, которые взрывали. В качестве промежуточного детонатора использовали половину патрона аммонита БЖВ ( $d = 32$  мм). Результаты взрывов приведены в табл. 18.

Сравнительные эксперименты показали, гранулиты, приготовленные с использованием предложенной технологии дозирования жидкого топлива, обладают более высокой скоростью детонации. Относительная работоспособность смесей также выше, а газовая вредность уменьшается, что косвенно характеризует более полное протекание детонационного процесса.

Предложенная система объемного дозирования жидкого топлива при изготовлении аммиачно-селитренных ВВ, используемых в подземных условиях, позволяет синхронизировать поступление компонентов на перемешивание, что гарантирует расчетное наличие их в смесителе при процессе перемешивания смеси.

Таблица 18

## Экспериментальные показатели взрывчатых характеристик гранулитов

Показатель	Новый дозатор				Старая технология				Аммонит 6ЖВ
	гранулит	гранулит	Ура-ДТ	Ура-ДТ	гранулит	гранулит	Ура-ДТ	Ура-ДТ	
Плотность заряжания, г/см <sup>3</sup>	0,96	0,92	0,95	0,99	0,94	0,95	0,96	0,92	1,06
Скорость детонации, м/с	4098	3937	4144	4237	3905	3750	3836	3840	4950
Газовая вредность, л/кг	64	62	62	62	78	68	74	78	42
Работоспособность относительно аммонита 6ЖВ	0,47	0,48	0,50	0,50	0,37	0,31	0,42	0,40	1

Качественное перемешивание компонентов смеси приводит к получению конечного продукта с более высокими характеристиками, в том числе с пониженной газовой вредностью. Тем самым повышается безопасность применения аммиачно-селитренных ВВ в подземных условиях.

## **2.6. Сравнительная оценка уровня эффективности гранулитов в полигонных и натуральных условиях**

Эффективность работы горного предприятия существенно зависит от качества отбойки горной массы. Весьма важным в этом процессе является выбор типа взрывчатого вещества для обеспечения надлежащей работоспособности. С этой целью в условиях подземного испытательного полигона была проведена сравнительная оценка ВВ промышленного назначения, предназначенных для отбойки горной породы в подземных условиях.

Оценивались тротилсодержащие, алюминийсодержащие и гранулированные бестротиловые смеси — гранулиты.

Гранулиты, применяемые на горнорудных предприятиях ВВ для отбойки скальных пород, — это смеси на основе гранулированной аммиачной селитры, содержащие в качестве горючего дизельное топливо и алюминийсодержащие порошки. Такие взрывчатые составы принципиально отличаются от ранее исследованных ВВ. Здесь реализуется так называемый «смесевой механизм» развития процесса химической реакции взрывчатого превращения. От начального импульса реакции начинаются на поверхности гранулы селитры и протекают не в объеме смеси, а послойно — от гранулы к грануле. Поэтому расчетные параметры детонации взрывчатых смесей по известным механизмам не отражают реальной ситуации. И их прямое использование при проектировании буровзрывных работ может привести к ошибкам в расчетах параметров БВР. Для оценки уровня эффективности нами использован подход, основанный на сравнении эффективности применения исследуемых составов с эталонным ВВ. Полученные экспериментальные значения скорости детонации, работоспособности соотносятся с известными показателями ВВ, которые подтверждаются теоретическими расчетами и давно и широко используются в практике взрывного дела.

Оценивали взрывчатые характеристики гранулированного тротилсодержащего ВВ — граммонита М21 (ТУ 7276-039-07511608-2000) и гранулированных бестротилового смесей местного изготовления. Характеристики граммонита М21 представлены в табл. 19.

Составы гранулированных взрывчатых смесей готовились промышленным способом в условиях стационарного пункта.

Для приготовления гранулитов использовали:

- мелкогранулированную пористую аммиачную селитру марки МП по ТУ 2143-036-00203789-2003 производства ОАО «Акрон» (МП);
- аммиачную селитру пористую «Яра» техническую для изготовления промышленных взрывчатых веществ по ТУ 2143-005-86730570-2008 производства Yara-AB (Yara);
- порошки алюминиевые AlSi25 (Ecka и Granal 85) по ТУ 1713-001-93350951-07;
- топливо дизельное по ГОСТ 305-82 или масло соляровое по ОСТ 38157-74.

Все взрывчатые смеси для испытаний были изготовлены на подземном пункте приготовления гранулированных ВВ на смесительной установке УИ-2. Перечень приготовленных гранулитов и их компонентный состав приведены в табл. 20.

Таблица 19

## Нормируемые характеристики граммонита М21 [58]

Характеристики	Норма
Теплота взрыва, кДж/кг	4291
Объем газов, л/кг	895
Объем ядовитых газов в пересчете на СО, л/кг, не более	35–50
Кислородный баланс, %	+0,02
Тротильный эквивалент по теплоте взрыва ( $Q_T = 186$ кДж/кг)	1,02
Насыпная плотность, г/см <sup>3</sup>	0,8–0,9
Сохранение взрывчатых свойств при нахождении в полиэтиленовом мешке, месяц	12
Скорость детонации, км/с	3,2–3,5
Критическая плотность, г/см <sup>2</sup>	1,5
Фугасность по ГОСТ 4546, см <sup>3</sup>	360–370
Чувствительность к удару по ГОСТ 4545, нижний предел, мм	500
Чувствительность к трению на приборе (К-44-111), не менее кгс/см <sup>2</sup>	2450
Частота взрывов в приборе № 1, %	4–12
Температура вспышки при постоянной температуре при выдержке 60 с, °С, не менее	330–336

Таблица 20

## Компонентный состав приготавливаемых для испытаний гранулитов

Наименование взрывчатой смеси	Содержание компонентов, %			
	селитра марки МП	селитра марки Yara	порошок AlSi25	дизельное топливо
1. Гранулит-5МП	90,3	–	6	3,7
2. Гранулит-5Yara	–	90,3	6	3,7
3. Гранулит МП-ДТ	94,3	–	–	5,7
4. Гранулит Yara-ДТ	–	94,3	–	5,7

Заряды для испытаний формировались пневмозаряданием, зарядчиком РПЗ-0.6 с помощью специальной насадки. При зарядании в заряды добавляли 2 % воды.

Для каждого заряда производили определение фактической плотности заряжения, относительной работоспособности, измеряли скорость детонации и газовую вредность.

Поскольку работоспособность определяет способность заряда совершать работу разрушения и перемещения среды, то для более полной оценки энергии взрыва необходима оценка бризантного и фугасного действия взрыва зарядов. Бризантное действие взрыва оценивалось по степени расширения стального кольца относительно эталона — аммонита 6ЖВ. Сравнительную оценку фугасной работоспособности зарядов при взрыве производили по деформации свинцового столбика. Скорость детонации измеряли с использованием оптоволоконного измерителя скорости детонации [113] на базе 15 см, расположенной на расстоянии 5 калибров от инициатора. Инициатор — полпатрона аммонита 6ЖВ, масса — 100 г.

Результаты экспериментальных работ, проведенных на подземном полигоне, представлены в табл. 21.

Видно, что скорость детонации алюминийсодержащих смесей ниже, а газовая вредность больше. Относительная работоспособность, установленная по деформации свинцового столбика, также ниже для смесей с алюминием. Относительно марки селитры — лучшие показатели для составов на основе селитры Yara.

Таблица 21

Экспериментальные характеристики гранулитов местного изготовления

Тип ВВ	Плотность заряжения, г/см <sup>3</sup>	Скорость детонации, м/с	Газовая вредность, л/кг	Относительная работоспособность		
				по методу стального кольца	по методу свинцового столбика	
					уменьшение высоты (-Δh) столбика, %	увеличение диаметра (+Δd) столбика, %
Гранулит-5МП	0,90	3368	77	0,42	29	23
Гранулит-5Уага	0,96	4098	64	–	32	29
МП-ДТ	0,95	3968	63	0,47	29	26
Уага-ДТ	0,95	4144	63	0,50	29	25
Граммонит М21	1,10	3989	115	0,46	28	9

Для оценки реального энергетического потенциала алюминийсодержащих смесей были рассчитаны их характеристики в соответствии с работой [83]. Также в табл. 22 приведены расчетные характеристики смесей АС-ДТ и АС-ТНТ. Определение теплоты взрыва было проведено расчетным путем по закону Гесса с учетом структурно-химической формулы смеси.

Таблица 22

Расчетные характеристики смесей: АС-ДТ, гранулита и граммонита

ВВ (соотношение компонентов, %)	$\rho^*$ , г/см <sup>3</sup>	$Q$ , ккал/кг	$V$ , л/кг	$D$ , м/с	$P$ , Кбар	$u$ , км/с	$n$
АС-ДТ (94,5/5,5)	0,95	902	930	5387	91,8	1,795	2,001
АС-алюминий-ДТ (90,3/6/3,7)	0,95	985	917	5541	100,7	1,912	1,898
АС-ТНТ (79/21)	1,10	1030	893	6036	102,5	1,544	2,910

\* Экспериментальное значение.

По полученным экспериментальным данным была проведена оценка реализации потенциальной энергии зарядов ВВ во фронте детонационной волны (табл. 23). Оценка производилась на основе работы [83] с использованием соотношения  $D^2 \sim Q_{\text{взр.}}$ , из которого следует, что при детонации зарядов диаметром 48 мм (оболочка — сталь) выделяется более 50 % потенциальной энергии исследуемых составов.

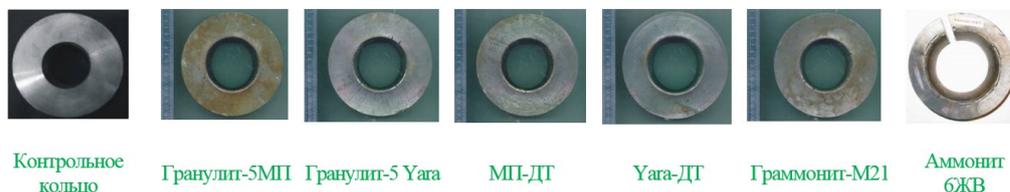
Таблица 23

Расчетные и экспериментальные характеристики смесей: АС-ДТ, гранулит и граммонит

ВВ (соотношение компонентов, %)	$\rho^{\text{эсп.}}$ , г/см <sup>3</sup>	$Q^{\text{расч.}}$ , ккал/кг	$D^{\text{расч.}}$ , м/с	$D^{\text{эсп.}}$ , м/с	$Q^{\text{факт.}}$ , ккал/кг	Степень реализации потенциальной энергии заряда
АС-ДТ (94,5/5,5)	0,95	902	5387	3968	534	0,59
АС-алюминий-ДТ (90,3/6/3,7)	0,95	985	5541	3886	539	0,55
АС-ТНТ (79/21)	1,10	1030	6036	3989	450	0,44

Полученные результаты согласуются с расчетными величинами степени завершения химических реакций, которая для гранулированных ВВ этого типа составляет 0,5–0,7 [114].

Для наглядности результаты испытаний в полигонных условиях для зарядов диаметром 48 мм в стальных трубах также представлены на рис. 31 и 32. Для сравнения на рис. 31 представлены снимки контрольного измерительного кольца (до испытаний) и кольца после взрыва аммонита 6ЖВ, на рис. 32 — макет свинцового столбика и внешний вид свинцовых столбиков после взрыва зарядов ВВ.



**Рис. 31.** Внешний вид стальных испытательных колец до и после взрыва зарядов ВВ в стальных трубах диаметром 60 мм



**Рис. 32.** Внешний вид свинцовых столбиков до и после взрыва зарядов ВВ

Замеры газов, выделившихся при взрыве зарядов, показали, что гранулиты, по сравнению с граммонитом М21, выделяют значительно меньшее количество токсичных газов (60–80 и 115 л/кг соответственно), что позволяет снизить потребность в свежем воздухе, необходимом для проветривания забоев, т. е. сократить время проветривания после проведения взрывных работ.

Основные характеристики порошков алюминия как добавки твердого горючего в составе гранулитов, которые могут оказать влияния на их взрывчатые свойства, — это содержание активного алюминия, однородность и размер гранул. По ним сравнивались порошки алюминия ЕСКА (производитель ЕСКА granules group Non ferrum Switzerland Швейцария) и GRANAL85 (производитель Chr. Otto Pape GmbH Германия). Алюминиевые порошки представляют собой мелкозернистую субстанцию серого цвета. При рассмотрении образцов под бинокулярной лупой с увеличением  $\times 14$  видно, что порошок ЕСКА состоит из трех разнородных компонентов, различных по цвету и прозрачности; порошок GRANAL85 состоит из двух компонентов, различных по цвету, частицы имеют иглообразные и полусферические формы. Фотография порошка GRANAL85 представлена на рис. 33. Интересующие физико-химические характеристики порошков приведены в табл. 24.

Первоначально оценивались взрывчатые характеристики зарядов гранулита-5МП, приготовленного с использованием разных порошков алюминия. Все составы готовились в условиях подземного стационарного пункта на смесительной установке УИ-2. Промежуточный детонатор — 100 г аммонита 6ЖВ. Результаты испытаний на подземном полигоне приведены в табл. 25.

На рис. 34 приведены фотографии испытательных колец после взрыва зарядов гранулита-5МП с 6 % порошка алюминия ЕСКА и GRANAL85.



**Рис. 33.** Порошок алюминия GRANAL85 производитель Chr. Otto Pape GmbH

*Таблица 24*

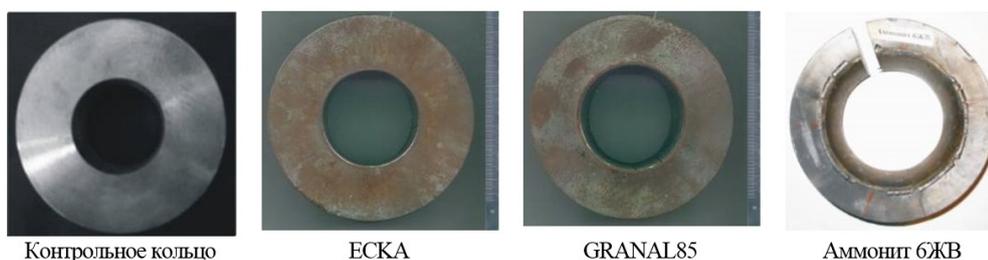
Физико-химические характеристики порошков алюминия

Наименование порошка	Фактическое содержание активного алюминия, %	Средний размер частиц, мкм	Объемная плотность, кг/м <sup>3</sup>	Содержание компонентов, %		
				Si, не более	технологические добавки, не более	активный Al
ЕСКА	75	175	500–1200	23–26	7,3	Остальное
GRANAL85	75	175	500–1200	1–15	3–14	Остальное

*Таблица 25*

Экспериментальные данные по взрывной эффективности гранулитов-МП, содержащих 6 % порошков алюминия

Характеристика	Гранулит-5МП с содержанием 6 % порошка алюминия	
	ЕСКА	GRANAL85
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	0,98	0,96
Скорость детонации, м/с	3580	3680
Работоспособность по методу кольца относительно аммонита 6ЖВ, отн. ед.	0,49	0,50

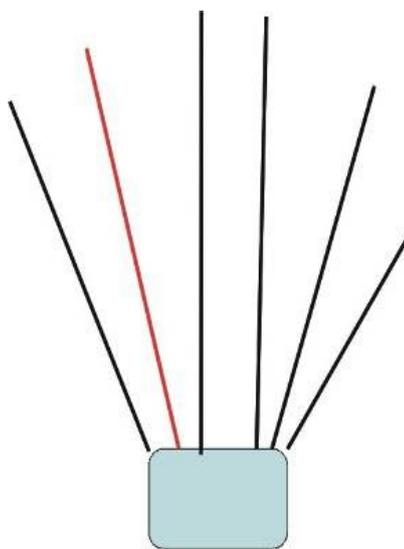


**Рис. 34.** Внешний вид стальных испытательных колец до и после взрыва зарядов гранулита-5МП с разными порошками алюминия

Из представленных результатов испытаний видно, что составы гранулита-МП, содержащие порошки алюминия, которые имеют сходные физико-химические характеристики, обладают примерно равной взрывной эффективностью. При равной

плотности составов скорость детонации примерно одинакова, то же самое и с работоспособностью относительно аммонита 6ЖВ.

Для рационального ведения взрывных работ, кроме энергетических, необходимо знать и детонационные характеристики. Скорость детонации измеряли в натуральных условиях Кировского рудника ОАО «Апатит». На рисунке 35 приведена схема эксперимента по измерению скорости детонации в скважине диаметром 102 мм в веере (выделена красным цветом). Инициирование — обратное с использованием системы СИНВ. Промежуточный детонатор — патрон аммонита 6ЖВ диаметром 90 мм и массой 3 кг.



**Рис. 35.** Схема эксперимента по измерению скорости детонации в скважине

Измерения скорости детонации выполнялись прибором HandiTrap II. Проверка в натуральных условиях состава гранулита-МП с 6 % порошка силикоалюминия показала, что при взрыве скважины в веере скорость детонации достигает значения 4050 м/с. Средняя скорость детонации для смесей Уага-ДТ составила 4161 м/с, для смеси МП-ДТ — 4106 м/с.

При переходе на алюмосодержащие гранулиты местного изготовления при отбойке руды глубокими скважинами выявлен ряд недостатков их применения — в некоторых случаях не достигнуто требуемое качество дробления руды при скважинной отбойке; ухудшились показатели выпуска; увеличились потери и разубоживание; в процессе заряжания зафиксированы случаи превышения в воздухе рабочих зон ПДК по концентрации паров нефтепродуктов.

После несанкционированного взрыва алюмосодержащего гранулита-АС8 в бункере зарядной машины комиссия, расследовавшая обстоятельства аварии, рекомендовала руководству ОАО «Апатит» запретить использование гранулита АС-8 для производства взрывных работ в подземных выработках при пневматическом заряжании [115–118]. В связи с этим остро встал вопрос замены и алюминийсодержащих ВВ.

Несмотря на наличие собственного пункта изготовления гранулитов и переоснащение его современным смесительным оборудованием, руководством ОАО «Апатит» были начаты работы по замене алюминийсодержащих гранулитов на эмульсионные составы.

### 3. ЭМУЛЬСИОННЫЕ ВЗРЫВЧАТЫЕ ВЕЩЕСТВА

Переход на технологию с применением эмульсионных взрывчатых веществ стал важным этапом в повышении безопасности взрывных работ и производительности труда. Это особенно актуально на подземных горных работах, т. к. все операции при производстве эмульсионной матрицы, приготовлении и зарядании взрывчатым веществом выполняются посредством насосов. В технологии с применением ЭВВ отсутствует наиболее опасный процесс — пневмозарядание, значительно сокращен объем ручного труда и нет необходимости хранения ВВ на складах взрывчатых материалов. Компоненты эмульсионных ВВ безопасны и при транспортировании, т. к. собственно взрывчатым веществом они становятся после смешения в процессе зарядания взрывной полости. Эмульсионные ВВ практически нерастворимы в воде, эта способность позволяет использовать их при зарядании скважин с любой степенью обводненности. При взрывании ЭВВ образуется малое количество вредных для окружающей среды окислов азота и углерода, поэтому возможно снижение времени и затрат на проветривание выработок после взрыва.

Более высокая энергия разрушения и бризантные свойства ЭВВ, по сравнению с гранулированными и патронированными, а также возможность регулирования плотности зарядания позволяют оптимизировать паспорта буровзрывных работ. Более качественное дробление позволяет снизить затраты на погрузочные работы и износ оборудования.

#### 3.1. Опыт применения эмульсионных взрывчатых веществ на горных работах в подземных условиях

В мировой практике применения ЭВВ при зарядании шпуров и скважин в подземных условиях накоплен определенный опыт.

Подземный рудник Tara Mines (Ирландия) разрабатывает месторождение свинцово-цинковых руд. Рудное тело находится на глубине от 50 до 900 м ниже поверхности. Породы устойчивые в разработке. Значительных проявлений горного давления не наблюдается. Скважины в основном сухие. Проходка основных выработок осуществляется шпурами диаметром 45 мм, длиной 5,35 м. Годовой объем проходки приблизительно 12 км. Проходка ведется только с применением ЭВВ в качестве основного заряда. Контурные скважины заряжаются ЭВВ по технологии, позволяющей заполнять шпур ЭВВ на полсечения. Основные горнотехнические характеристики рудника представлены в табл. 26.

Отбойка руды в камерах осуществляется полувеерами и круговыми веерами скважин. Проектное расстояние между веерами скважин — 2,3 м. Отбойные скважины диаметром 70 и 76 мм заряжаются только ЭВВ. Длина скважин — от 6 до 20 м. Иницирование обратное. Постановка боевиков в специальных пластиковых стаканах осуществляется в устье скважин вручную шомполом, далее боевик доводится до забоя зарядным шлангом, и автоматически начинается зарядка скважины ЭВВ. Несмотря на то, что заряд в скважине устойчиво держится, после зарядки основного заряда в скважину устанавливают специальный пластмассовый «парашют».

Технологией изготовления взрывчатого вещества владеет австралийская компания Orica [120]. Она же изготавливает и поставляет на рудник эмульсионную

матрицу и газогенерирующую добавку. Способ сенсibilизации эмульсии — газификация раствором нитрита натрия, которая происходит в шланге на выходе. Основные характеристики применяемого ЭВВ «Титан» приведены в табл. 27.

Таблица 26

Горнотехнические характеристики рудника Tara Mines [119]

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Удельный вес руды, т/м <sup>3</sup>	3
2	Температура массива, °С	>30
3	Обводненность массива	Практически сухой
4	Система разработки	Камерная с закладкой
5	Высота подэтажа, м	До 20
6	Сечение буродоставочных выработок, м	5,5×5,6
7	Расстояние между веерами, м	2,3
8	Плоскость наклона веера к обрушению, °	80
9	Основной диаметр скважин, мм	76
10	Предельная длина скважин, м	20

Таблица 27

Физико-химические и технические характеристики эмульсионного ВВ «Титан»

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Плотность эмульсии, г/см <sup>3</sup>	1,38
2	Плотность заряда эмульсионного ВВ, г/см <sup>3</sup>	1,05
3	Скорость детонации, м/с	5000
4	Удельный расход ВВ на отбойку, кг/т	0,3
5	Вместимость кг/л п.м	5,5

Рудник Kiruna (Швеция) обрабатывает месторождение железных руд. Руды плотные, малотрещиноватые (табл. 28).

Таблица 28

Горнотехнические характеристики рудника Kiruna (Швеция) [121]

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Удельный вес руды, т/м <sup>3</sup>	4,3–4,5
2	Трещиноватость массива	Малотрещиноватый
3	Обводненность массива	Низкая (менее 2 %)
4	Система разработки	Подэтажное обрушение
5	Высота между главными откаточными горизонтами, м	320
6	Высота подэтажа, м	До 30
7	Расстояние между буродоставочными выработками, м	18–20
8	Сечение буродоставочных выработок, м	6,5×5,0
9	Расстояние между веерами, м	3
10	Плоскость наклона веера к обрушению, °	80
11	Основной диаметр скважин, мм	115
12	Предельная длина скважин, м	54

Вертикальные скважины заряжаются только эмульсионным ВВ (табл. 29). Способ сенсibilизации эмульсии — микросферами. На заводе в процессе

приготовления ВВ микросферы загружают в эмульсионную матрицу и перемешивают. Готовое ВВ загружают в транспортную емкость и отвозят в подземный рудник, где перекачивают в емкость хранения, из которой по мере необходимости перегружают в зарядную машину и доставляют в забой выработки. Диаметр шланга для подачи эмульсии — 2 см, на конце которого установлена насадка диаметром 7 мм, предназначенная для разбрызгивания получаемого ЭВВ. Промежуточные детонаторы устанавливают в забой скважины и в середину скважины зарядным шлангом. Там же, на заводе фирмы «Кемит АБ», изготавливаются патроны ЭВВ «Кемилюкс», диаметром от 28 до 90 мм, которыми заряжают обводненные скважины.

Таблица 29

Физико-химические и технические характеристики ЭВВ «Кимит» [122]

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Плотность эмульсии, г/см <sup>3</sup>	1,38
2	Плотность заряда ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	1,05
3	Скорость детонации, м/с	5000
4	Удельный расход ВВ на отбойку, кг/т	0,3
5	Вместимость кг/1 п. м	12

Канадская компания Red Back Mining Inc., которой принадлежит рудник Chirano в Гане разрабатывает крутопадающее месторождение золотоносных кварцитов малой мощности (табл. 30).

Таблица 30

Горнотехнические характеристики рудника Chirano [123]

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Удельный вес руды, т/м <sup>3</sup>	2,75–2,78
2	Трещиноватость массива	Среднетрещиноватый
3	Обводненность массива	Высокая на подкарьерных горизонтах
4	Система разработки	Подэтажное обрушение
5	Высота подэтажа, м	25
6	Расстояние между буродоставочными выработками, м	20
7	Сечение буродоставочных выработок, м	5,5×5,0
8	Расстояние между веерами, м	2,8–3
9	Плоскость наклона веера к обрушению, °	70
10	Основной диаметр скважин, мм	102
11	Предельная длина скважин, м	30

Для отбойки руды используют ЭВВ «Риомекс АП» (табл. 31). Способ сенсibilизации эмульсии — газификация раствором нитрита натрия, которая происходит в шланге на выходе. Зарядное оборудование Palfinger.

Таблица 31

Физико-химические и технические характеристики ЭВВ «Риомекс АП» [124]

№ п/п	Характеристика	Показатель
1	Плотность эмульсии, г/см <sup>3</sup>	1,3
2	Плотность заряда ЭВВ, г/см <sup>3</sup>	0,95–1
3	Скорость детонации, м/с	5500
4	Удельный расход ВВ на отбойку, кг/т	0,34
5	Вместимость кг/1 п. м	10

Горнотехнические условия применения ЭВВ на зарубежных предприятиях отличаются от условий подземных рудников Мурманской области в первую

очередь по обводненности скважин. Технологией и оборудованием, которое можно применять для заряжания шпуров и скважин ЭВВ в сходных подземных условиях, обладают компании Kimit, Orica и Maxam.

Рассматривая ассортимент зарубежных ЭВВ, видно, что все они имеют высокие технические характеристики и могут использоваться для дробления весьма крепких пород, которые преобладают и на наших рудниках. Собственной технологии изготовления и заряжания скважин ЭВВ в подземных условиях на начало XXI в. в России не было.

В странах ближнего зарубежья был положительный опыт использования эмульсионных составов только в патронированном виде [125]. С 2002 г. в условиях Навоийского горно-металлургического комбината (НГМК) эксплуатировался завод по производству ЭВВ, которые изготавливали по технологической документации, разработанной и предоставленной поставщиком технологии и оборудования — фирмой Orica. В частности, изготавливали патронированные ЭВВ типа Nobelit 216Z, предназначенные для ведения взрывных работ на земной поверхности и в подземных работах по породам любой крепости, кроме шахт опасных по газу или пыли и горным ударам. При взрывании методом скважинных зарядов Nobelit 216Z применялся преимущественно в качестве промежуточного детонатора, инициирующего взрыв промышленного ВВ, составляющего основной заряд скважин. Заряжание шпуров Nobelit 216Z производили только ручным способом. По физико-химическим и взрывчатым показателям Nobelit 216Z соответствует нормам, указанным в табл. 32.

Таблица 32

Физико-химические и взрывчатые показатели ЭВВ Nobelit 216Z

№	Наименование характеристики	Значение характеристики	
Расчетные			
1	Теплота взрыва, кДж/кг	3191	
2	Объем газообразных продуктов взрыва, л/кг	929	
3	Кислородный баланс, %	-0,92	
4	Удельная энергия, кДж/кг	792	
Экспериментальные			
5	Плотность ВВ в патроне, г/см <sup>3</sup>	1,03–1,23	
6	Скорость детонации, км/с для патронов диаметром, мм:	36	3–4,5
		38	3,2–4,6
		70	3,5–5
		90	4–5,5
7	Критический диаметр детонации, мм	18	
8	Работоспособность, см <sup>3</sup>	–	
8	Бризантность (по Гессу), мм	>18	
9	Водоустойчивость	Не ограничена	
10	Критическая плотность, г/см <sup>3</sup>	1,36	
11	Чувствительность к удару, %	Нечувствителен	
12	Чувствительность к трению, кГс/см <sup>2</sup>	Нечувствителен	
13	Чувствительность к первичным средствам инициирования: КД, ЭД, ДШ, SP и LP детонаторы	Чувствителен	
14	Чувствительность к лучу огня от ОШ	Нечувствителен	

Патронированными ЭВВ предприятие обеспечивает не только подразделения НГМК, но и предприятия, ведущие взрывные работы по всей Республике Узбекистан.

В России первые попытки создания собственной технологии изготовления и заряжания эмульсионными составами шпуров и скважин выполнены в 2002 г. в ФГУП «ГосНИИ Кристалл». Было создано опытное зарядное устройство

для изготовления и заряжания смесового ЭВВ в подземных условиях. Технические характеристики зарядного устройства приведены в табл. 33.

Таблица 33

Технические характеристики смесительно-зарядного устройства (СЗУ)

Производительность СЗУ	До 5 кг/мин
Длина транспортирования ЭВВ	До 30 м
Диаметр заряжаемого шпура	Не менее 40 мм
1. Бункер для эмульсии, л	170
2. Бункер для гранулированной АС, л	65
3. Бак для ГГД, л	30
4. Бак для активатора, л	20
5. Бак для воды, л	30
Габаритные размеры СЗУ, мм, не более:	
длина;	2100
ширина;	1700
высота	1500
Характеристики изготавливаемого ЭВВ:	
плотность;	1,1–1,25 г/см <sup>3</sup>
вязкость;	Не более 105 мПа·с
водоустойчивость за 24 ч;	Не более 0,2 кг/м <sup>2</sup>
максимальное время сенсбилизации	Не более 90 мин
Шасси	ГАЗель или другое

В условиях Южно-Жезказганского рудника (корпорация «Казахмыс» Республика Казахстан) были проведены испытания устройства в производственных условиях [126].

Для отбойки камеры сечением 76 м<sup>2</sup> (9,5×8) с использованием зарядного устройства были заряжены шпуры диаметром 51 мм. Количество шпуров — 44, глубина шпура — 3,7 м, недозаряд — 1,5 м. Производительность установки составила не менее 5 кг/мин, давление при наполнении — не более 10 кг/см<sup>2</sup>, средний заряд на шпур — 6,15 кг. Техничко-экономические показатели опытного взрыва проведены в табл. 34.

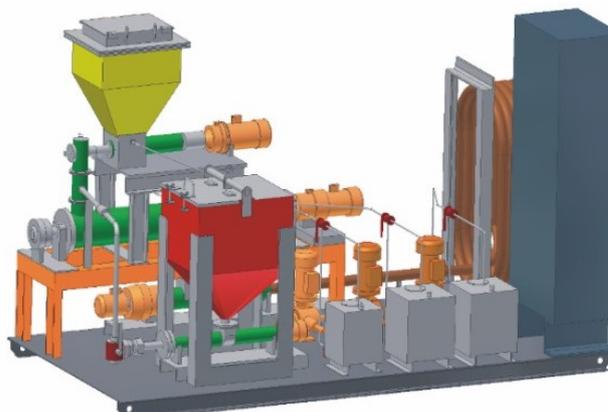
Таблица 34

Основные технико-экономические показатели взрыва смесового ЭВВ

№ п/п	Показатели	Марка ПВВ	
		ЭВВ	гранулит А6
1	Вариант отбойки	Шпуровой	
2	Размеры камеры, м	8×9,5	8×10
3	Площадь камеры, м <sup>2</sup>	76	80
4	Тип бурового оборудования	Аксера	
5	Длина буровой штанги, м	4,3	
6	Диаметр коронки, мм	51	
7	Средняя глубина, м	3,7	
8	Количество шпуров	44	49
9	Уход забоя за цикл, м	3,27	3,25
10	Объем отбойки, м <sup>3</sup>	248,5	260
11	Величина заряда на шпур, кг	6,15	5,2
12	Общий расход ВВ, кг	270,6	254,8
13	Способ инициирования	СИНВ-Ш	

Визуально было отмечено, что заряды во всех шпурах детонировали, подошва проработана полностью и глубина нескольких имеющихся стаканов не превысила плановой величины. Расход ВВ, по сравнению с гранулитом А6, увеличился на 10 % за счет более высокой плотности заряда. Общие результаты взрыва ЭВВ превысили показатели гранулита.

На основе положительного опыта применения исследуемого опытного образца при зарядании ЭВВ была разработана смесительно-зарядная установка для изготовления и зарядания ЭВВ [127], представленная на рис. 36.



**Рис. 36.** Смесительно-зарядная установка для изготовления и зарядания ЭВВ

Несмотря на положительные результаты испытаний, разработчики не реализовали технологию в промышленных масштабах. При зарядании восстающих скважин не смогли добиться устойчивого размещения эмульсионного ВВ в скважине, большая часть заряда «просыпалась» вниз. Просыпи составляли до 50 % заряда ВВ.

В ОАО «Апатит» с 2004 г. начали прорабатывать вопрос об уходе с гранулированных и смесевых ВВ при ведении взрывных работ в подземных условиях. В результате поиска потенциальных обладателей технологии и зарядной техники, позволяющих внедрить ЭВВ в подземных условиях, остановились на фирме «Дино Нобель Раша». И в 2007 г. в производственных условиях Кировского рудника ОАО «Апатит» были проведены предварительные испытания ЭВВ «Титан» тип 2.

Приготовление компонентов ЭВВ — раствора окислителя, масляной фазы и раствора газогенерирующей добавки производили на производственном объекте ЗАО «Дино Нобель Раша» на участке приготовления горячего раствора окислителя ОАО «Олкон» (г. Оленегорск) и стационарном пункте ОАО «Жильская ГМК» (г. Заполярный).

Доставку компонентов на площадку приготовления эмульсионной матрицы ЭВВ «Титан-2» производили в смесительно-зарядной машине SME. Отдельно доставляли ИВС-контейнеры с раствором ГГД. Смесительно-зарядная машина SME, загруженная компонентами, устанавливалась на территории промплощадки ОАО «Апатит» (тупиковый отвал в районе материальной штольни горизонта +410 м), и оператор, управляя смесительно-зарядной машиной, из компонентов производил эмульсионную матрицу, одновременно закачивая ее в пластиковый ИВС-контейнер.

Режим производства эмульсионной матрицы — периодический, производительность — 150 кг/мин. После заполнения контейнера его при помощи погрузочной машины доставляли в место временного хранения эмульсии. Рядом

хранились ИВС-контейнеры с раствором ГГД. Температура матрицы при изготовлении — 70 °С. В месте временного хранения контейнеры с эмульсионной матрицей хранились не менее 5 сут с целью снижения ее температуры до 20–25 °С.

Эмульсионное ВВ «Титан» тип 2 изготавливали по ТУ 7276-002-23308410-2006, держатель ЗАО «Дино Нобель Раша», основные физико-химические характеристики ЭВВ приведены в табл. 35.

Таблица 35

Характеристики ЭВВ «Титан-2»

Характеристики	Норма для ЭВВ «Титан-2»	
	марка 7000	марка 7100
1. Внешний вид	Густая однородная масса, насыщенная пузырьками газа	
Расчетные		
2. Кислородный баланс, %	-1,4	-1,2
3. Теплота взрыва, ккал/кг (кДж/кг)	793 (3328)	855 (3580)
4. Объемная концентрация энергии, ккал/дм <sup>3</sup>	634–911	855–1068
5. Объем газообразных продуктов взрыва, л/кг, в т. ч. ядовитых в пересчете на СО, л/кг	975 30	995 30
6. Тротильный эквивалент по теплоте взрыва (к гранулолу при насыпной плотности)	0,8	0,85
Экспериментальные		
7. Плотность состава, г/см <sup>3</sup> : до газификации, не менее; после газификации	1,39 0,8–1,15	1,40 1,0–1,25
8. Критический диаметр, мм, не более: открытого заряда; заряда в стальной трубе с толщиной стенки 3 мм	32 15	32 15
9. Скорость детонации в полиэтиленовой трубе диаметром 44 мм, м/с	4100	3980
10. Чувствительность к удару по ГОСТ 4545-88: нижний предел, мм; частота взрывов, %	450 0	450 0
11. Чувствительность к трению на копре К-44-III (максимальное давление прижатия), МПа	>400	>400
12. Чувствительность к нагреву (метод ДТА)	Отсутствие экзотермического разложения до температуры 170 °С; интенсивное экзотермическое разложение при температуре 200–220 °С	
13. Чувствительность к первичным СИ: импульс от ЭД-8, 2-х ниток ДША-12; луч огня от ОШ	Не чувствительны Не чувствительны	
14. Минимальный инициатор	1 патрон аммонита 6ЖВ-32-200	
15. Допустимое время нахождения в скважине до взрыва	Не более 1 месяца	

Изготовление ЭВВ «Титан-2» производили в смесительно-зарядной машине SSE. Компоненты ЭВВ (эмульсионная матрица и раствор ГГД) пневматическим насосом перекачивали из контейнеров хранения в емкости СЗМ. Объем бака эмульсионной матрицы — 2600 дм<sup>3</sup>, раствора ГГД — 100 дм<sup>3</sup>. Далее машина с загруженными компонентами двигалась к месту ведения взрывных работ. Смешение компонентов происходило в процессе зарядания скважин. Длина зарядного шланга — до 40 м. Производительность зарядания — 75 кг/мин.

В ходе испытаний сравнивалась взрывная и экономическая эффективность ЭВВ «Титан-2» при скважинной и шпуровой отбойке всех разновидностей пород и руд в условиях ОАО «Апатит», а также производилась экологическая оценка применения в сравнении с гранулированным ВВ граммонитом 79/21. Была

выполнена оценка взрывчатых характеристик ЭВВ в полигонных условиях. Испытывались заряды в стальных трубах диаметром 98 (толщина стенки — 6 мм) длиной 1 м. Результаты приведены в табл. 36.

Таблица 36

Результаты испытаний зарядов ЭВВ «Титан-2» в условиях полигона

Показатель	Заряд 1	Заряд 2	Заряд 3
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,26	1,28	1,32
Скорость детонации, м/с	4521	5050	3900
СО	6,17	10	10,1
NO	4,01	3,1	6,1
NO <sub>2</sub>	0,3	0,3	0,9
Газовая вредность, л/кг	34	32	55

Было установлено, что характеристики ЭВВ «Титан-2» соответствуют заявленным в технических условиях (см. табл. 35). Из данных табл. 36 видно, что при увеличении плотности заряжания возможно снижение скорости детонации. Также увеличивается количество токсичных газов в продуктах взрыва. Даже небольшое увеличение плотности заряда приводит к увеличению условной окиси углерода.

Всего в период испытаний было заряжено в скважины почти 50 т ЭВВ «Титан-2». Было выявлено, что удерживающая способность заряда ЭВВ в вертикальных скважинах не удовлетворительная. Были зафиксированы множественные случаи выпадения зарядов из скважин. Качество скважинной отбойки руды, в сравнении с граммонитом 79/21 и гранулитами собственного изготовления, оказалось лучше. В 2008 г. в одностороннем порядке компания Orica прекратила испытания по причине доработки рецептуры ЭВВ и конструкции зарядной машины.

Необходимо отметить, что масштабного опыта по заряданию ЭВВ в подземных условиях, а тем более схожих с условиями ОАО «Апатит» (температурный режим, обводненность, трещиноватость, восходящие скважины и пр.), на постсоветском пространстве ни у одного рудника (шахты), даже на стадии испытаний, не было. По оценкам специалистов, использование эмульсионных составов на подземных предприятиях России в то время было возможно только в патронированном виде при немеханизированном (ручном) зарядании [128].

Считалось, что одним из самых быстрых и эффективных вариантов применения ЭВВ является использование технологий и техники, приобретенных у мировых лидеров производства эмульсионных взрывчатых веществ с последующим переходом на разработку и использование собственных технологий получения ЭВВ на базе отечественного химического сырья и собственной зарядной техники. И именно такой путь избрало ОАО «Апатит». В качестве базового, в связи с отсутствием на то время отечественных технологий, для промышленных испытаний было принято ЭВВ австралийской компании ORICA MINING SERVICES производства ЗАО «Орика СиАйЭс», которое в наибольшей степени было отработано для применения в подземных условиях, в том числе и для зарядки восстающих скважин [129].

В ходе проведения полупромышленных испытаний выбранного ЭВВ в условиях обводненности и трещиноватости Хибинского массива было установлено, что качество отбойки было значительно ниже, чем заявленное в характеристиках. Поэтому начались работы по отработке технологии взрывных работ с использованием составов ЭВВ производства ЗАО «Орика СиАйЭс».

### 3.2. Экспериментальное исследование характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк»

На подземных рудниках ОАО «Апатит» в течение 2010–2011 гг. в рамках приемочных испытаний проводилось зарядание взрывных скважин ЭВВ «Сабтэк» производства ЗАО «Орика СиАйЭс» (г. Оленегорск). Испытания проводились с целью отработки параметров зарядания ЭВВ, способа их инициирования, выбора массы промежуточного детонатора и обоснования рациональных параметров буровзрывных работ.

Водоустойчивое эмульсионное взрывчатое вещество второго класса «Сабтэк» (ТУ 7276-002-23308410-2006) марки «Вэлкро» (ЭВВ «Сабтэк») [130] изготавливалось на местах применения в смесительно-зарядных машинах МСУ (РЭ 4826-007-23308410-2010) [131] и было предназначено для производства взрывных работ в подземных условиях рудников, в выработках, не опасных по выделению горючих газов и пыли, при отбойке сухих и обводненных горных пород с коэффициентом крепости по шкале М. М. Протодьяконова до 20, методом скважинных или шпуровых зарядов в температурном диапазоне окружающей среды от –50 до +50 °С. Производство ЭВВ «Сабтэк» осуществлялось в процессе зарядания скважин и шпуров путем смешивания эмульсионной матрицы «Сабтэк» и газогенерирующей добавки.

Приготовление компонентов ЭВВ «Сабтэк» (эмульсионной матрицы «Сабтэк» и газогенерирующей добавки) производилось на стационарном пункте приготовления невзрывчатых компонентов ЭВВ ЗАО «Орика СиАйЭс» (СПП НК ЭВВ) в г. Оленегорск.

Эмульсионная матрица «Сабтэк» относится к эмульсиям второго рода (обратная эмульсия), в которой водный раствор неорганического окислителя (дисперсная фаза) диспергирован в органической топливной фазе (дисперсионная среда). В качестве дисперсной фазы применяется водный раствор аммиачной селитры, а дисперсионной среды — минеральное масло. Для образования эмульсионной матрицы и повышения ее стабильности в топливную фазу к минеральному маслу вводят специальный эмульгатор, который обладает свойствами поверхностно-активного вещества, и, адсорбируясь на поверхности капелек раствора аммиачной селитры, препятствует их слиянию и придает системе агрегативную устойчивость.

Эмульсионная матрица является невзрывчатым и негорючим веществом, нечувствительна к механическим воздействиям.

Основные физико-химические показатели эмульсионной матрицы приведены в табл. 37.

Таблица 37

Технологические характеристики эмульсионной матрицы «Сабтэк»

Показатели	Норма
Внешний вид	Однородное пластичное полупрозрачное вещество от светло-желтого до темно-серого цвета
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1,34–1,4
Вязкость, сП, не менее	20000

Газогенерирующая добавка [132] представляет собой водный раствор нитрита натрия с различными добавками и является сенсibilизатором, повышающим восприимчивость ЭВВ «Сабтэк» к детонационному

импульсу. ГГД вводится в эмульсионную матрицу микширующим устройством смесительно-зарядной машины непосредственно при зарядании скважин или шпуров. Для скважинной и шпуровой отбойки использовалась ГГД марок UGS серийного ряда 400–410 (содержание нитрита натрия — от 2 до 10 %). Для контурного взрывания — UGS серийного ряда 700–710 (ряд 400–410 с дополнительным содержанием 5 % нитрата магния).

Доставка компонентов ЭВВ «Сабтэк» от СПП НК ЭВВ к пунктам хранения и перегрузки, расположенных в условиях Кировского и Расвумчоррского рудников ОАО «Апатит», производилась поверхностными доставщиками в контейнерах. Здесь же хранились и емкости с газогенерирующей добавкой.

Для изготовления эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк» применялись компоненты, перечисленные в табл. 38 в указанных соотношениях.

Таблица 38

Компонентный состав ЭВВ «Сабтэк»

Компонент	Количество, % масс.
Содержание эмульсионной матрицы марки «Вэлкро-200»	97,7±2,3
Содержание газогенерирующей добавки марки UGS	2,3±2

Расчетные и экспериментальные характеристики ЭВВ «Сабтэк» представлены в табл. 39.

Таблица 39

Характеристики ЭВВ «Сабтэк»

Наименование показателей	Норма для марки «Вэлкро-200»
1. Внешний вид	Густая однородная масса, насыщенная пузырьками газа
Расчетные	
2. Теплота взрыва, ккал/кг (кДж/кг)	855 (3580)
3. Объемная концентрация энергии, ккал/дм <sup>3</sup>	855–1068
4. Объем газообразных продуктов взрыва, л/кг В том числе ядовитых в пересчете на СО, л/кг	995 30
5. Троилловый эквивалент по теплоте взрыва (к гранулолиту при насыпной плотности)	0,95
Экспериментальные	
6. Плотность состава, г/см <sup>3</sup> : до газификации, не менее; после газификации	1,40 1,0–1,25
7. Критический диаметр, мм, не более: открытого заряда; заряда в стальной трубе с толщиной стенки 3 мм	32 15
8. Скорость детонации в полиэтиленовой трубе диаметром 44 мм, м/с	3980
9. Минимальный инициатор	1 патрон аммонита 6ЖВ-32-200

**3.2.1. Исследование температурных режимов газификации эмульсионной матрицы «Сабтэк»**

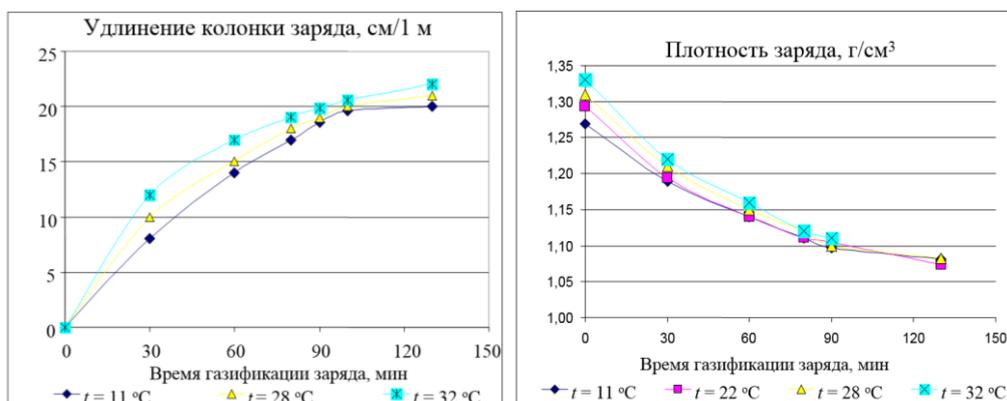
Согласно техническим условиям на ЭВВ «Сабтэк» температура эмульсионной матрицы должна находиться в пределах 15–30 °С. Доставляемая на рудник матрица обычно имеет температуру 40–60 °С. После двухсуточного хранения температура эмульсии опускается до 30–35 °С. При достижении данной температуры производится зарядка скважин. К окончанию зарядки температура эмульсии опускается до 20 °С. То есть возможна различная температура эмульсии при изготовлении ЭВВ. Поэтому

на первом этапе были проведены исследования по изучению влияния температуры эмульсионной матрицы на процесс газификации [133]. Для этих целей газифицированную эмульсию с помощью зарядной машины заряжали в макет скважины — полиэтиленовую трубу (диаметр — 103 мм, длина — 1000 мм) и оставляли макет до прохождения полной газификации заряда (рис. 37).



**Рис. 37.** Увеличение колонки заряда ЭВВ «Сабтэк» в процессе газификации

Использовали эмульсию с начальной температурой при зарядании от 11 до 32 °С. Зависимость изменения величины колонки заряда и плотности от начальной температуры эмульсии и времени газификации представлена на рис. 38.



**Рис. 38.** Зависимость изменения величины колонки заряда и плотности от температуры эмульсионной матрицы «Сабтэк» и времени ее газификации

Из представленных данных следует, что чем выше температура эмульсии, тем быстрее в первые 30 мин происходит газификация. Завершение процесса газификации и стабилизация плотности при температуре выше 20 °С происходит в одном временном интервале — в течение 90 мин. При начальной температуре эмульсии 11 °С нахождение процесса газификации необходимо большее

время — 130 мин. То есть низкая температура эмульсии удлиняет процесс образования запланированного заряда ВВ в скважине. Это обстоятельство необходимо учитывать при планировании времени взрыва.

Следует отметить, что сразу после выхода газифицированной эмульсии из зарядного шланга зафиксированная плотность изменяется в пределах от 1,27 до 1,33 г/см<sup>3</sup>. При применении обратного инициирования этому обстоятельству необходимо уделять очень серьезное внимание, т. к. при зарядании скважин длину колонки заряда определяют исходя из установленной величины недозаряда и начальной плотности эмульсии.

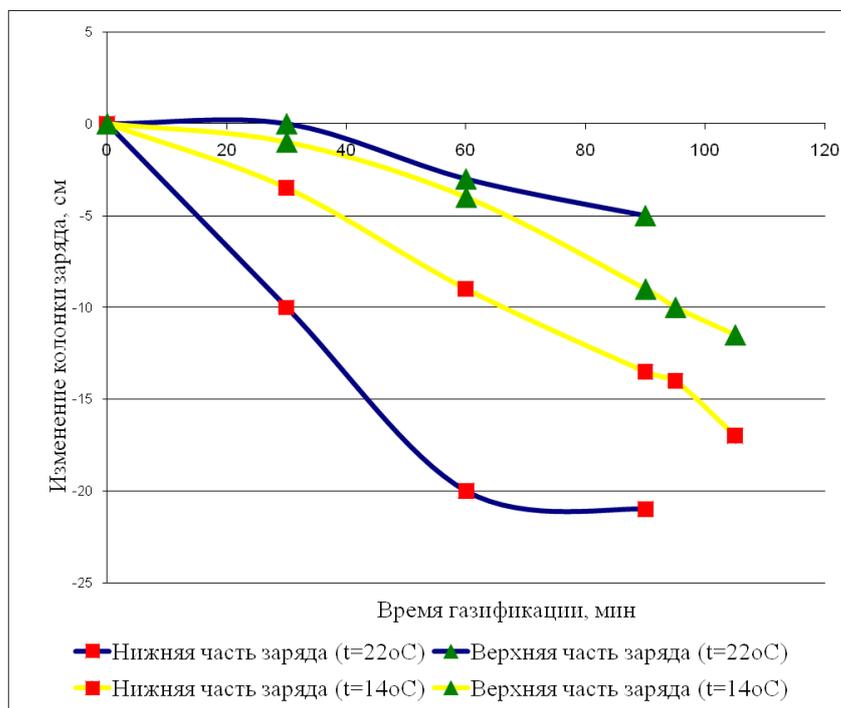
На существующем зарядном оборудовании порядок при зарядании скважин следующий: установка боевика посредством зарядного шланга в торец скважины; автоматическое отодвигание шланга от боевика на 1,3–1,7 м; и непосредственно зарядание. Предполагается, что в процессе газификации при увеличении объема газифицированной эмульсии заряд полностью заполнит свободный объем верхней части скважины, и произойдет рассчитанное заполнение объема скважины до уровня недозаряда в нижней части.

Для выявления процесса формирования заряда в условиях описанного выше порядка зарядания были проведены дополнительные эксперименты. Для этого использовали эмульсионную матрицу разной температуры (14 и 22 °С) в макетах скважины в виде полиэтиленовой трубы длиной 100 см диаметром 103 мм со съёмным дном. В макет с помощью зарядной машины нагнетали газифицированную эмульсию, подвешивали его в вертикальном положении дном вниз, удаляли съёмное дно. Первоначально заряд и в верхней, и в нижней частях макета располагался на уровне срезов. В нижней части макет удлиняли прозрачной вставкой. Результаты наблюдения за изменением колонки заряда в процессе газификации представлены на рис. 39.



**Рис. 39.** Характер протекания процесса газификации эмульсии в верхней и нижней частях макетного заряда

Зависимость изменения длины колонки заряда в макете от температуры эмульсии и времени газификации представлена на рис. 40.



**Рис. 40.** Зависимость изменения величины колонки заряда от температуры эмульсии и времени прохождения газификации

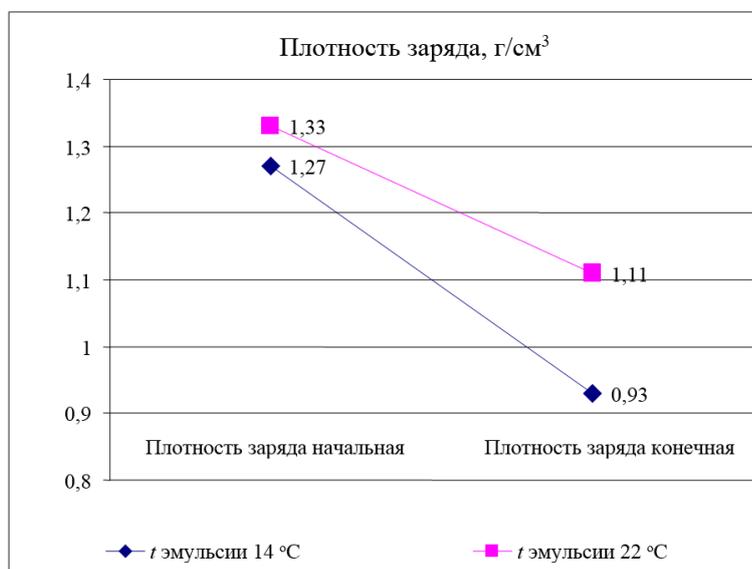
Из представленных данных следует, что, несмотря на наличие двух открытых поверхностей, удлинение колонки заряда в макете происходит только в нижней части заряда. В верхней части заряда изменение незначительное — заряд слегка «проседает», что можно объяснить действием сил тяжести. При наличии только одной свободной поверхности (см. рис. 37) заряд за счет уменьшения плотности в процессе газификации «растет вверх».

Измерения плотности заряда показали, что в целом достигается заданная по расчету газификация (рис. 41), но заряд ВВ полностью не заполняет объем в данном случае макета.

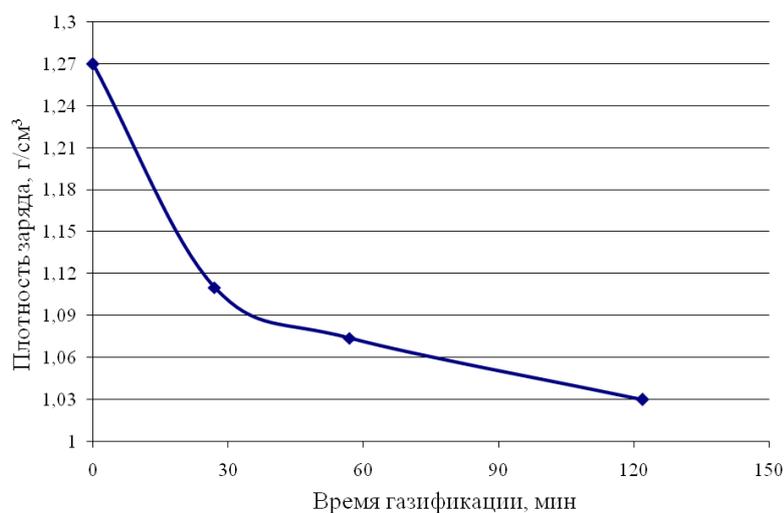
По литературным данным [134–136] в вертикальном скважинном заряде в зависимости от его протяженности плотность заряда эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного газогенерирующей добавкой по высоте заряда, может быть разной. Под действием столба заряда в скважине пузырьки газа могут сжиматься, и чем больше давление колонки заряда, тем больше. В таком случае в нашем исследовании было важно посмотреть и оценить, есть ли различие плотности в отдельных частях заряда ЭВВ по высоте.

Для решения поставленной задачи применили разборный макет скважины. Использовали полиэтиленовую трубу диаметром 103 мм. Четыре куска длиной по 500 мм соединили посредством стяжек в один макет скважины длиной 2 м. На заряжаемом блоке с помощью СЗМ в макет зарядили газифицированную

эмульсию, взвесили и вертикально поместили макет на укрепленную стойку. При зарядании использовали эмульсионную матрицу с температурой 16,8 °С. Характер изменения во времени плотности всего анализируемого заряда приведен на рис. 42.



**Рис. 41.** Изменение плотности заряда в течение 90 мин в макете скважины



**Рис. 42.** Изменение плотности ЭВВ в разборном макете заряда диаметром 103 мм

После выдержки вертикально подвешенного макета в течение 2 ч его разобрали на составные части так, чтобы не повредить заряд внутри частей. По отдельности взвесили составные части и вычислили массу ВВ в каждой. Масса пустых частей макета была известна заранее. Зная объем каждой части, рассчитали плотность заряда в ней. Полученные данные по плотности заряда в разрезе по частям представлены на рис. 43.

При длине заряда 2 м разница в плотности в отдельных его частях не существенная, тем не менее зафиксирована. Можно ожидать, что на удлиненных

вертикальных зарядах, а на практике применяют заряды 30 м и более, разница станет более ощутимой.



**Рис. 43.** Изменение плотности ЭВВ по колонке заряда в разборном макете (полиэтиленовая труба длиной 2 м)

Изменения в плотности связаны с изменением структуры заряда, она становится неоднородной. Это означает, что пористость заряда, которую обеспечивают газовые включения, в рассматриваемом случае уменьшается или за счет уменьшения их количества, или размеров. В условиях нашего эксперимента при химической сенсбилизации матрицы достоверно говорить об изменении количества газовых пузырей нельзя. Поэтому стоит учитывать только то, что геометрия газовых включений в объеме при давлении столба заряда, возможно, меняется. Вследствие этого будет изменяться только суммарная площадь «горячих точек», которые по общепринятому механизму детонации ЭВВ инициируют реакции взрывчатого превращения в эмульсионной матрице, но расстояние между ними должно оставаться тем же. С уменьшением удельной пористости стоит ожидать и уменьшения скорости тепловыделения, которое пропорционально поверхности реагирования. Приведенные ниже экспериментальные зависимости скорости детонации (см. рис. 53) подтверждают эти выводы.

В процессе приготовления ЭВВ «Сабтэк», в зависимости от условий применения для сенсбилизации эмульсионной матрицы, используют разные газогенерирующие добавки. Ранее поставленные эксперименты производились для ЭВВ с добавкой UGS серийного ряда 400–410 для скважинной отбойки. Шпуровые заряды, приготовленные с ГГД марки UGS серийного ряда 700–710, в экспериментах не участвовали.

Поэтому в производственных условиях подземного рудника при зарядании горизонтальных отбойных шпуров диаметром 43 мм, длиной до 4,5 м было проведено экспериментальное определение плотности заряжения ЭВВ «Сабтэк», приготовленного с газогенерирующими добавками UGS ряда 400 (ГГД № 1) и UGS ряда 700 (ГГД № 2).

Предварительно проводили определение плотности заряжения в стеклянном макете шпура. Для этого брали трубу из стекла близкого диаметра. С одной стороны труба была заткнута резиновой пробкой. Процесс газификации заряда происходил при горизонтальном размещении макета.

Эмульсионное ВВ «Сабтэк», сенсбилизированное ГГД № 1, в макет шпура подавали по зарядному шлангу диаметром 25 мм. Первоначальная длина заряда составила 1,55 м. Масса заряженного ВВ в этом объеме — 2110 г. По расчетам начальная плотность ВВ (с учетом начала процесса газификации в шланге) составила 1,28 г/см<sup>3</sup>. По окончанию процесса газификации (40 мин), после удаления части расширившегося заряда, масса составила 1640 г. Итоговая плотность заряда ЭВВ «Сабтэк» в макете — 0,97 г/см<sup>3</sup>.

Также предварительно в стеклянных макетах скважин производили определение плотности заряда с газогенерирующей добавкой для зарядания шпуров ГГД № 2. Результаты приведены в табл. 40.

Химический состав и соотношение компонентов в газогенерирующих добавках, используемых для сенсбилизации ЭВВ для скважинной отбойки и проходки

выработок, различен, а конечные результаты плотности готовых зарядов практически не отличаются. Возможно, так получилось вследствие того, что газификация зарядов происходила в относительно теплой выработке, и, кроме того, в коротких зарядах, что, видимо, создало особые условия протекания реакций газификации.

Таблица 40

Контролируемые и расчетные показатели зарядов ЭВВ «Сабтэк»  
с различными марками ГГД в макетах шпуров

Контролируемые и расчетные показатели заряда	ГГД № 1	ГГД № 2	
	макет № 1	макет № 2	макет № 3
Диаметр макета, мм	36,8	36	37
Длина макета, м	159	156	136
Длина заряда, м	159	156	136
Масса заряда, г	2110	2030	1835
Начальная плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,28	1,28	1,26
Плотность заряда через 60 мин газифицирования, г/см <sup>3</sup>	0,97	0,98	0,94
Увеличение длины заряда, %	32	31	34

Поэтому измерения плотности заряжения с использованием различных ГГД были проведены в натуральных условиях при заряжении технологических шпуров в выработке площадью сечения 21,4 м<sup>2</sup>.

Порядок измерений в шпурах был следующий. Сначала с использованием наращиваемых тарированных штанг производили измерение длины шпуров. Далее этими же штангами производили измерения величин недозарядов. Шпур № 1 длиной 4,4 м был заряжен газифицированной ГГД № 1 эмульсионной матрицей с недозарядом 1,9 м.

Второй шпур (№ 2) длиной 4,5 м был заполнен ВВ с недозарядом 0,65 м. Через час газификации величина недозаряда в шпуре № 1 составила 1,4 м. Из шпура № 2 заряд выдавило на 0,1 м. В первом случае удлинение составило 0,5 м, во втором — 0,75 м. За 60 мин газификации в равных условиях произошло одинаковое удлинение зарядов, примерно на 20 %. По сравнению с результатами в макете повышенного уменьшения плотности заряда (см. табл. 15) не произошло. Достигнутое значение плотности 1,07 г/см<sup>3</sup> соответствует расчетам, т. е. укладывается в технические характеристики данной марки ЭВВ.

Также производили определение плотности заряжения с газогенерирующей добавкой ГГД № 2. Результаты приведены в табл. 41. Перед каждым определением плотности зарядов в шпурах производили предварительное определение плотности в макетах (см. табл. 40).

Результаты измерений плотности зарядов в натуральных условиях в технологических шпурах в одинаковых условиях формирования зарядов практически не отличаются. Удлинение зарядов происходит на величину от 12 до 16 %. Общий характер изменения плотности заряда в макетах и шпурах приведен на рис. 44.

В шпурах заряды высокой плотности: 1,05–1,16 г/см<sup>3</sup>. Значит, для достижения заданной плотности, особенно в шпурах контурного ряда, надо либо жестко контролировать и увеличивать время газификации зарядов, либо изменять условия процесса газификации. Это возможно за счет изменения соотношения компонентов в ГГД или компонентного состава ЭВВ.

Таблица 41

Контролируемые и расчетные показатели зарядов ЭВВ «Сабтэк» с различными ГГД

Контролируемые и расчетные показатели заряда в шпуре	ГГД № 1 (для скважин)		ГГД № 2 (для шпуров)				
	№ шпура						
	1	2	3	4	5	6	7
Измеряемые							
Диаметр шпура, мм	43	43	43	43	43	43	43
Длина шпура, м	4,4	4,5	4,4	4,5	4,4	4,1	4,15
Начальная длина заряда, м	2,5	3,85	2,1	3,2	3	2,8	2,75
Начальный недозаряд, м	1,9	0,65	2,3	1,3	1,4	1,3	1,4
Длина заряда через 60 мин газифицирования, м	3	4,6	2,4	3,6	3,5	3,2	3,15
Недозаряд через 60 мин газифицирования, м	1,4	0	2	0,9	0,9	0,9	1
Удлинение заряда, м	0,5	0,75	0,3	0,4	0,5	0,4	0,4
Скорость детонации, м/с	4900		5180			5190	
Расчетные							
Начальная плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,28	1,28	1,28	1,28	1,28	1,33	1,35
Плотность заряда через 60 мин газифицирования, г/см <sup>3</sup>	1,07	1,07	1,05	1,05	1,05	1,16	1,18
Масса ВВ на 1 п. м, при соответствующей плотности, г	1550	1550	1500	1500	1500	1690	1720
Увеличение длины заряда, %	16,7	16,3	12,5	11,1	14,3	12,5	12,7

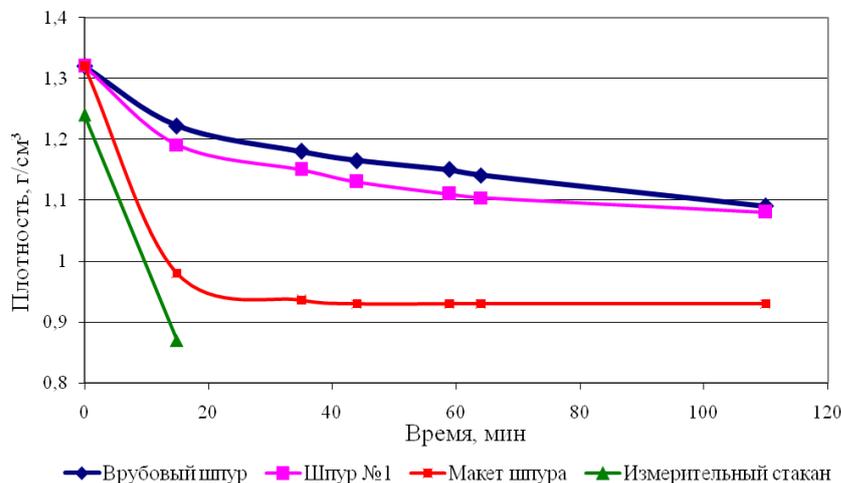


Рис. 44. Изменение плотности заряда ЭВВ «Сабтэк» в шпурах и макете шпура в процессе газификации зарядов

### 3.2.2. Контроль плотности получаемого заряда эмульсионного взрывчатого вещества

Не смотря на качественное приготовление в заводских условиях всех компонентов ЭВВ, в натуральных условиях в скважинах происходила неполная газификация эмульсионной матрицы, что связано в основном с несоблюдением температурных режимов применяемых компонентов. Температура эмульсионной матрицы в процессе зарядки изменялись от +11 до +25 °С, в то время как для обеспечения полноценной газификации в восходящих скважинах температура эмульсионной матрицы должна быть не ниже +25 °С. Особенно это важно для скважин глубиной более 20 м, когда газификация происходит в основном в нижней части заряда.

Эмульсионные взрывчатые вещества состоят из двух основных компонентов: эмульсионной матрицы и сенсibilизатора. В экзотермической реакции взрывчатого превращения участвует только эмульсионная матрица как

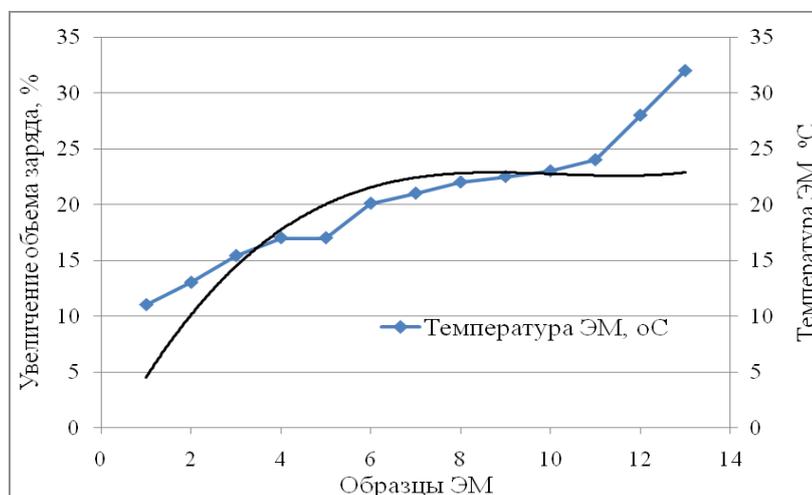
единственный энергетический компонент. Эмульсионная матрица не является взрывчатым веществом. Сенсibilизация придает ей способность к детонации от импульса средств инициирования. Эту способность ЭМ приобретает после создания в ней пористости и достижения определенного значения плотности. Пористость обеспечивается введением в ЭМ раствора ГГД.

Газовые включения азота, распределенные в ЭМ, под действием ударной волны от средств инициирования становятся «горячими точками», обеспечивая химическую реакцию и распространение детонации. Чем больше таких газовых пор в ЭМ и чем меньше их размеры, т. е. чем выше пористость (или ниже плотность), тем меньше критический диаметр зарядов ЭВВ и выше скорость детонации.

Факторами, которые определяют скорость газообразования в теле ЭМ и свойства получающегося ЭВВ, являются концентрация основного компонента в растворе ГГД, температура ЭМ и время выдержки. Чем больше поверхность контакта эмульсии и ГГД (степень диспергирования в теле ЭМ), чем выше температура ЭМ, тем быстрее происходит процесс газонасыщения.

Площадь поверхности контакта эмульсии и ГГД в рассматриваемых условиях взаимодействия остается примерно одинаковой (зависит от настроек системы смешения компонентов). А вот температура эмульсионной матрицы изменяется в некотором диапазоне. Известно, что скорость большинства реакций возрастает с повышением температуры. По правилу Вант-Гоффа при повышении температуры на каждые 10 °С скорость большинства реакций увеличивается в 2–4 раза. Время «созревания заряда», в течение которого происходит увеличение его объема до рассчитанного, составляет не более 2 ч. Поэтому в нашем случае важно, чтобы газообразование происходило более интенсивно и в расчетное время достигало расчетной величины.

Результаты многолетних наблюдений за процессом заряжания взрывных скважин, а также экспериментов, проведенных в лабораторных условиях, представлены на рис. 45.



**Рис. 45.** Увеличение объема заряда в зависимости от начальной температуры эмульсионной матрицы

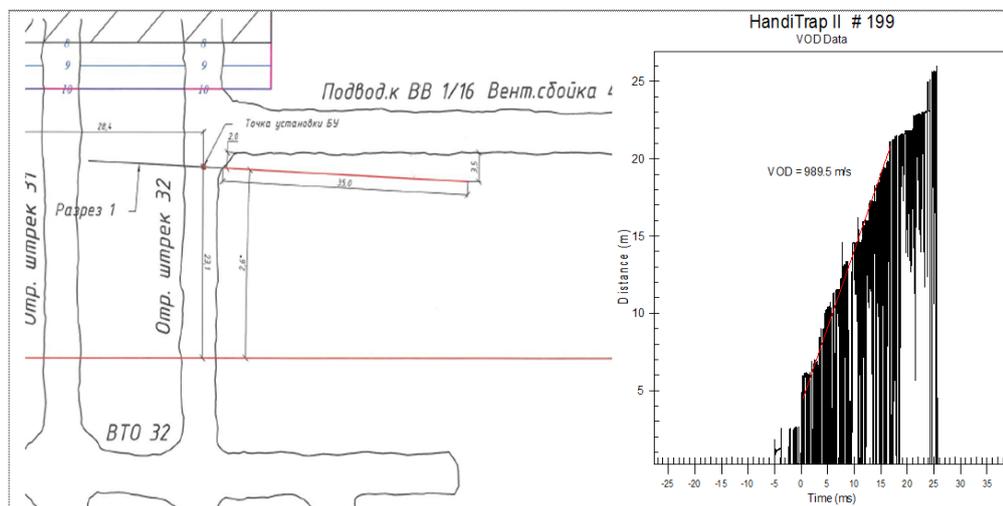
Эмульсионная матрица, поступающая на блок для заряжания скважин, характеризуется плотностью от 1,3 до 1,34 г/см<sup>3</sup>. Входной контроль качества ЭМ при подготовке ее к процессу изготовления ЭВВ не включает показатель

плотности. При зарядании скважин, согласно техническим рекомендациям АО «Орика СиАйЭс», происходит контроль правильности смешения компонентов ЭВВ. Для этого после настройки магистралей смешения СЗМ рекомендовано обязательно отбирать пробы ЭВВ в измерительную кружку для замера плотности.

В зависимости от условий применения ЭВВ (скважины, отбойные шпуров или контурные) определены ориентировочные значения плотности ЭВВ в измерительной кружке. Так, для условий применения ЭВВ в скважинах 102 мм плотность не должна превышать  $1,15 \text{ г/см}^3$ . Это значит, не менее 10–15 % увеличения объема заряда. Как видно из графика (см. рис. 11) необходимое увеличение объема за регламентированное время наблюдения 30 мин достигается при температуре ЭМ выше  $15 \text{ }^\circ\text{C}$ . Рост объема заряда происходит до температуры  $23 \text{ }^\circ\text{C}$ , затем зависимость увеличения объема от температуры выполаживается, и температура, видимо, оказывает меньшее влияние. Следовательно, для гарантированного увеличения объема заряда до необходимого значения температура эмульсионной матрицы должна быть не менее  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Установленное лимитирующее значение температуры эмульсионной матрицы при зарядке скважин нашло подтверждение при проведении натурных экспериментов.

Пример результата неполной газификации заряда и последовавшего отказа детонации приведен на рис. 46.



**Рис. 46.** Проект расположения скважины для оценки пробивного расстояния при взрыве скважины диаметром 102 мм и запись скорости детонации в горизонтальной скважине длиной 35 м

Температура заряжаемой в скважину эмульсии была  $13 \text{ }^\circ\text{C}$ . Увеличение длины заряда произошло на 0,9 м (2,5 %). По нашим расчетам удлинение колонки заряда должно составлять не менее 10 %. При таком малом удлинении (0,9 м) плотность заряда в скважине была примерно  $1,25 \text{ г/см}^3$ , что не позволило развиваться полноценному процессу детонации. Скорость процесса составила 989,5 м/с (см. рис. 46), что соответствует не детонации заряда, а его горению. Скорее всего, это связано с низкой температурой эмульсионной матрицы при зарядке скважин.

Поэтому нами было рекомендовано при зарядании восходящих скважин использовать эмульсионную матрицу с температурой не ниже  $+25 \text{ }^\circ\text{C}$ .

Проведенные в дальнейшем эксперименты в указанных температурных допусках зарядания позволили получить конечную плотность заряда

1,01 г/см<sup>3</sup>. Скорость детонации такого заряда составила 5290 м/с (рис. 47), что соответствует значениям, приведенным в ТУ.

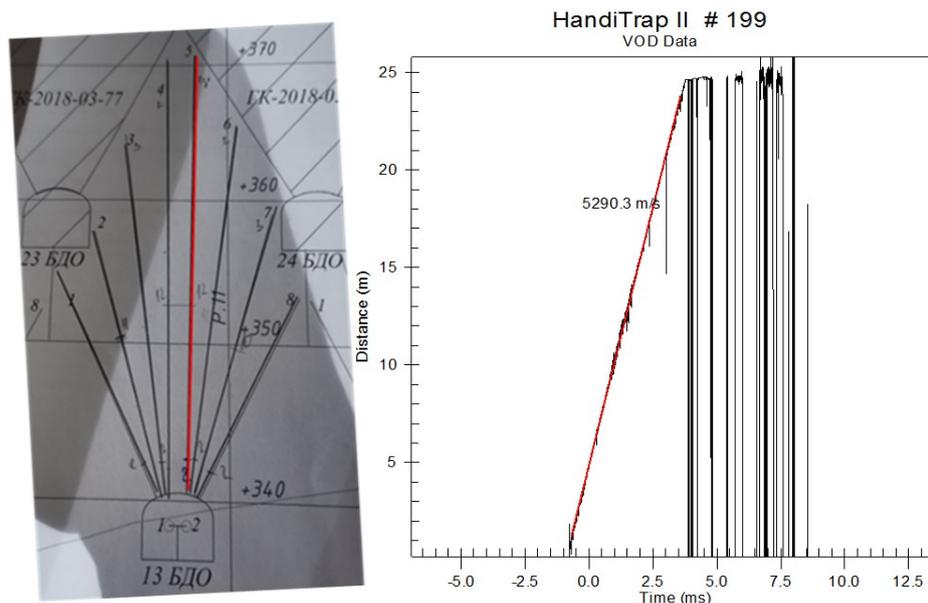


Рис. 47. Запись скорости детонации заряда в скважине (выделена красным цветом) веера 13БДО

### 3.2.3. Оценка взрывчатых характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк» в условиях испытательного полигона

При экспериментальных измерениях основное внимание было уделено изучению зависимости скорости детонации от плотности зарядов, которая менялась в зависимости от качественного и объемного содержания ГГД.

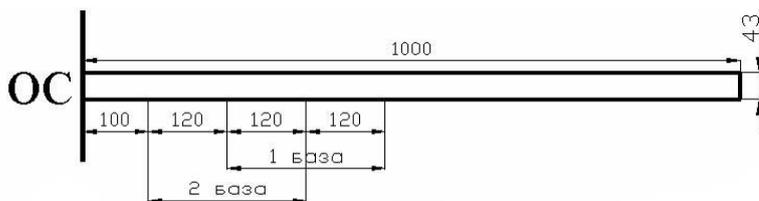
Оценка взрывчатых характеристик ЭВВ «Сабтэк» производилась на подземном испытательном полигоне ОАО «Апатит». Для этих целей на блоках при зарядании технологических скважин производили зарядание ЭВВ в макеты зарядов — стальные трубы. Эксперименты проводились в основном на зарядах в трубах с толщиной стенки 6 мм диаметром 48 мм и длиной 500 мм, которые после выдерживания в условиях подземного рудника в течение 1–4 сут взрывали на полигоне. После выдерживания зарядов в атмосфере подземной выработки процесс их газификации проходил полностью. Характеристики зарядов ВВ и размеры макетов приведены в табл. 42.

Таблица 42

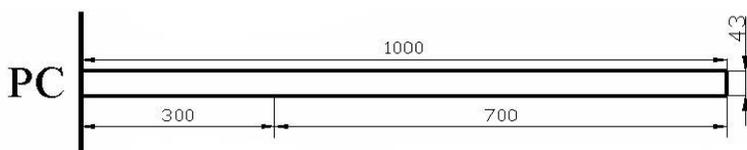
Характеристики зарядов ЭВВ «Сабтэк» для испытаний

№ п/п	Характеристика заряда	Масса заряда, кг		Длина заряда, мм	Диаметр заряда, мм
		начальная	конечная		
1	ЭВВ для отбойных шпуров	0,920	0,825	500	48
2	ЭВВ для контурных шпуров	0,795	0,755	500	48
3	ЭВВ для контурных шпуров (без ГГД, с водой)	1,840	1,840	1000	43
4	ЭВВ для контурных шпуров	1,180	1,100	1000	43

Скорость детонации определяли двумя способами: оптоволоконным ОС на базе измерения 12 и 24 см (рис. 48) и реостатным способом РС (рис. 49).



**Рис.48.** Схема расположения баз измерения скорости детонации оптоволоконным способом (длина заряда — 1000 мм)



**Рис.49.** Схема расположения баз измерения скорости детонации реостатным способом (длина заряда — 1000 мм)

При взрывах зарядов в качестве промежуточного детонатора использовали  $\frac{1}{2}$  патрона аммонита 6ЖВ-32-200. Результаты испытаний приведены в табл. 43.

Таблица 43

Экспериментальные характеристики опытных зарядов ЭВВ «Сабтэк»

№ п/п	Характеристика заряда (см. табл. 42)	Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	Способ измерения скорости детонации	База измерения скорости, см	Скорость детонации, м/с
1	ЭВВ для отбойных шпуров	0,92	ОС	150	5725
2	ЭВВ для контурных шпуров	0,83	ОС	150	3979
3	ЭВВ для контурных шпуров (без ГГД, с водой)	1,38	ОС	240	Нет записи
			РС	240	
4	ЭВВ для контурных шпуров	0,86	ОС	240	4969
				240	4218
			РС	700	5080
				300	4100

Заряд № 1 (отбойный шпур) — детонация в штатном режиме: плотность заряда и скорость детонации соответствуют марке ЭВВ.

Заряд № 2 (контурный шпур) — детонация в штатном режиме: плотность заряда и скорость детонации соответствуют марке ЭВВ.

Заряд № 3 (контурный шпур без ГГД). Плотность заряда — 1,38 г/см<sup>3</sup>. Записи скорости детонации нет. На фотографии (рис. 50) видно, что сработал только промежуточный детонатор, трубу в месте расположения боевика «развернуло». Токсичных газов в атмосфере выработки не зафиксировано. Можно сделать вывод, что 1,38 г/см<sup>3</sup> — это критическая плотность для диаметра 43 мм в стальной оболочке.



**Рис. 50.** Остатки после взрыва заряда № 3 (см. табл. 42)

Заряд № 4 (контурный шпур), это то же, что и заряд № 2, только длиной 1000 мм. Плотность зарядов близкая (0,83 и 0,86). В продуктах взрыва зафиксировано высокое содержание токсичных газов для ВВ данного типа, особенно много окислов азота. Скорость детонации выше, чем в сходном заряде № 2 длиной 500 мм. При рассмотрении результатов записи скорости детонации заряда № 4, выполненной реостатным способом, видны признаки затухания процесса (рис. 51).

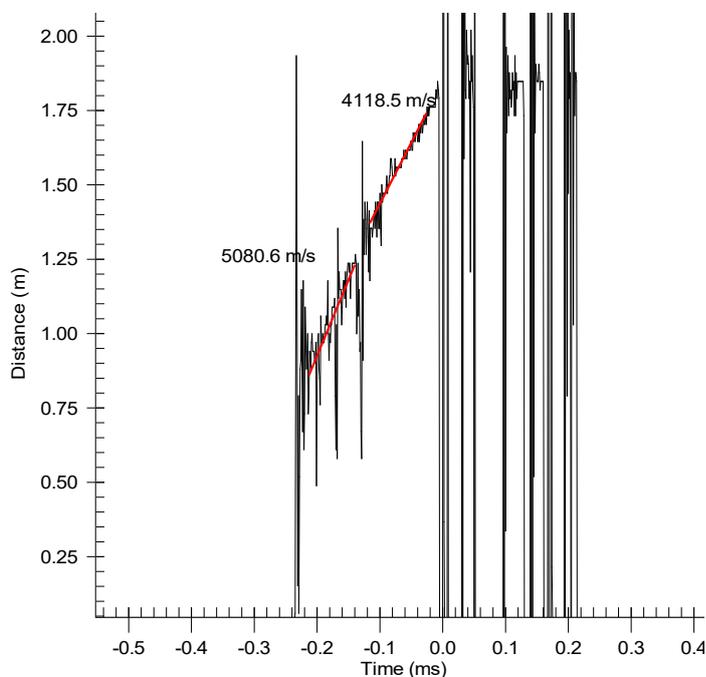


Рис. 51. Фрагмент записи скорости детонации заряда № 4 (см. табл. 17)

Скорость детонации, при равной плотности зарядов 0,83–0,86 г/см<sup>3</sup>, изменяется от 3979 до 4969 м/с. Что подтверждает влияние структурной неоднородности в малых диаметрах на работу заряда в большей степени.

Все полученные экспериментальные характеристики зарядов представлены в табл. 44.

Таблица 44

Экспериментальные характеристики зарядов ЭВВ «Сабтэк» с различной плотностью

Измеряемая характеристика	Значения, полученные в ранее проведенных экспериментах для зарядов в стальных трубах 48×6 мм, длиной 500 мм						Параметры зарядов указаны в табл. 17 и 18			
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4
Скорость детонации, м/с	5156	5857	5725	5245	5500	4650	5725	3979	–	4969
Плотность ВВ, г/см <sup>3</sup>	1,12	1,16	1,17	1,18	1,14	1,06	0,92	0,83	1,38	0,86
Газовая вредность, л/кг	17	14	39	23	–	–	–	–	–	–

Плотность зарядов после газификации находится в широком диапазоне — 0,83–1,18 г/см<sup>3</sup>, в соответствии с условиями применения каждой марки ЭВВ «Сабтэк». Что особенно важно для обеспечения гарантированности

расположения боевика в заряде ЭВВ в условиях обратного инициирования в скважинных зарядах.

Наилучшие характеристики взрывания обеспечиваются при плотностях заряжания в диапазоне 1,14–1,17 г/см<sup>3</sup>, что соответствует и максимальной скорости детонации. Наименьшим разрушающим действием обладают заряды с плотностью меньше 0,9 г/см<sup>3</sup>. Увеличение плотности заряжания более 1,20 г/см<sup>3</sup>, хотя и приводит к уменьшению скорости детонации, но за счет роста объемной концентрации энергии в заряде, увеличивает бризантное действие взрыва (рис. 52).



Рис. 52. Бризантность ЭВВ «Сабтэк» в зависимости от скорости детонации и плотности заряжания

Обобщенные данные скорости детонации от плотности заряжания ЭВВ «Сабтэк» приведены на рис. 53.

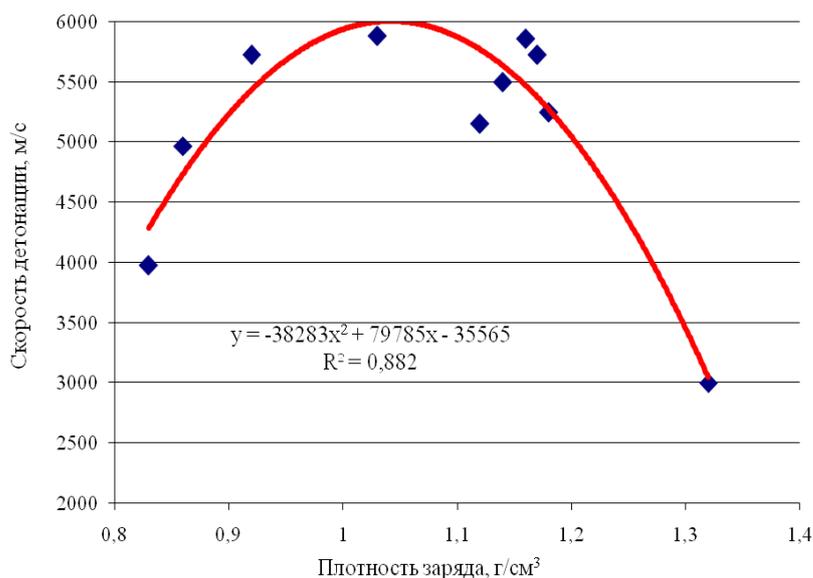


Рис. 53. Зависимость скорости детонации от плотности заряжания ЭВВ «Сабтэк»

Измерение скорости детонации было проведено и для составов ЭВВ «Сабтэк», используемых на проходке, в том числе и при взрывании контурных шпуров. В заряде, предназначенном для отбойных шпуров, скорость детонации составила 5725 м/с при плотности заряда 0,92 г/см<sup>3</sup>. Для контурного заряда скорость детонации — 3979 м/с при плотности 0,83 г/см<sup>3</sup>. Плотность зарядов для проходки выработок ниже, чем для зарядов на скважинной отбойке. Это соответствует условиям применения ЭВВ.

Газовая вредность по условной окиси углерода составила в среднем чуть более 20 л/кг и является самой низкой из всех применяемых промышленных ВВ.

### 3.2.4. Определение детонационных и энергетических характеристик эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк»

Для определения скорости детонации в природных условиях измерения проводились непосредственно в скважинах веера. Диаметр скважин — 102 мм. Промежуточный детонатор — ПДП-300. Тип заряда — тротил/ТЭН 50/50, масса — 300 г, длина — 120 мм, диаметр — 50 мм.

В условиях эксперимента (длина скважины — 25 м) скорость детонации составила 5440 м/с. Также в скважине веера было произведено еще одно измерение скорости детонации. В заряде длиной 17,5 м скорость — 5457 м/с.

В условиях натурального эксперимента сложно оценить достигаемую при газификации ЭВВ плотность заряда. По полученным значениям скорости детонации, в сравнении со значениями, полученными для зарядов в стальных трубах диаметром 48 мм (см. табл. 19), можно предположить, что плотность зарядов, получаемых в скважине, также находится в указанном выше интервале.

По результатам экспериментальных взрывов шпуровых зарядов ЭВВ «Сабтэк» полученные значения скорости детонации несколько ниже: от 4600 до 5200 м/с. По условиям технологии измерения производились во врубовом шпуре диаметром 43 мм, длиной 4,5 м. Заряжание ЭВВ производили с использованием ГД-733. Длина заряда изменялась от 2 до 3,5 м. Прирост длины заряда в процессе газификации был 14 %.

На рисунке 54 приведены обобщенные данные по изменению скорости детонации для зарядов разного диаметра. Значения приведены для зарядов в сходных по свойствам оболочках (толстостенная стальная труба моделирует условия горного массива). Дополнительно использованы значения, полученные в скважинах 250 мм на земной поверхности, тип ВВ схожий, ЭВВ — «Порэмит». Значительного увеличения скорости в больших диаметрах не произошло. В равных диаметрах заметен разброс значений скорости. Так, для диаметра 48 мм скорость изменяется от 4600 до 5857 м/с (разброс — 12 %). Для диаметра 102 мм скорость меняется в меньшем диапазоне от 5451 до 5900 м/с (разброс — 8 %), для диаметра 250 мм разброс составляет только 2,5 %. Что еще раз подтверждает влияние возможных неоднородностей структуры зарядов на их взрывчатые характеристики.

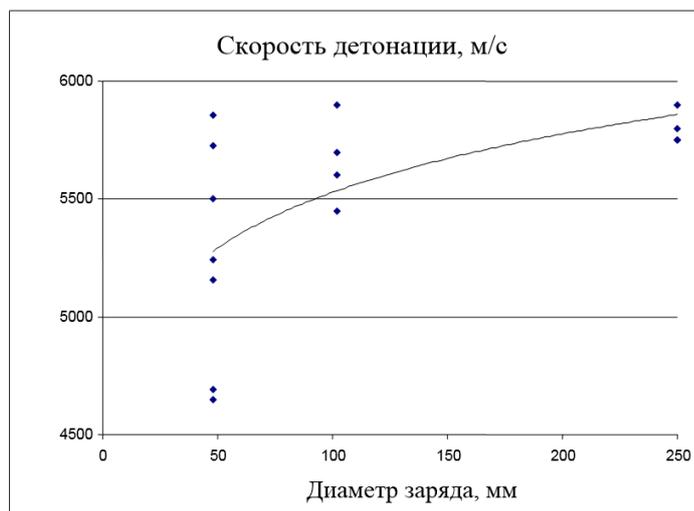


Рис. 54. Изменение скорости детонации ЭВВ в зависимости от диаметра зарядов с плотностью в диапазоне от 0,95 до 1,20 г/см<sup>3</sup>

Это обстоятельство обязательно должно учитываться для строгого соблюдения регламента процесса заряжания. Структура сформированного заряда должна обеспечивать надежную детонацию заряда в частях, имеющих как максимальную, так и минимальную плотность.

На основе полученных данных произведена сравнительная оценка расчетных и экспериментальных энергетических и детонационных характеристик рассматриваемых ВВ (табл. 45).

Таблица 45

Расчетные и экспериментальные энергетические и детонационные характеристики ВВ

Тип ВВ	Расчетная теплота взрыва, ккал/кг	Расчетный объем газообразных продуктов детонации, л/кг	Расчетная скорость детонации, м/с	Экспериментальная скорость детонации, м/с	Расчетная степень завершенности химических реакций	Фактическая теплота взрыва, ккал/кг
Граммонит М21	1030	890	5487	4150	0,58	600
Гранулит 5МП	1050	880	5436	4000	0,54	570
ЭВВ «Сабтэк»	793	975	5960	5860	0,98	766

Исходя из условия, что теплота взрыва пропорциональна квадрату скорости детонации ( $D^2 \approx Q_{\text{взр.}}$ ), определена степень завершенности химических реакций на фронте детонационной волны, которые составили для граммонита М21 — 0,58, алюмосодержащих гранулитов 5МП — 0,54, а для ЭВВ «Сабтэк» — 0,92–0,98. В соответствии с этим на эти величины уменьшается и фактическая теплота взрыва. Фактически наибольшей теплотой взрыва обладает ЭВВ «Сабтэк».

Зависимость скорости детонации ЭВВ носит немонотонный характер (рис. 53), максимум скоростей достигается в диапазоне плотностей 1,05–1,17 г/см<sup>3</sup>.

### 3.2.5. Определение оптимальных параметров детонации эмульсионных взрывчатых веществ в шпуровых и скважинных зарядах для обеспечения максимального эффекта воздействия на разрушаемую среду

В связи с тем, что в технических условиях предлагаемых к производству и применению составов ВВ указываются только усредненные параметры или пределы детонационных и взрывчатых характеристик, которые, как правило, не совпадают с оптимальными значениями, потребовалась оценка их взрывчатых свойств для обоснования области их рационального применения.

При расчете параметров буровзрывных работ из всех характеристик взрывчатых веществ используют в основном теплоту взрыва и плотность заряжания.

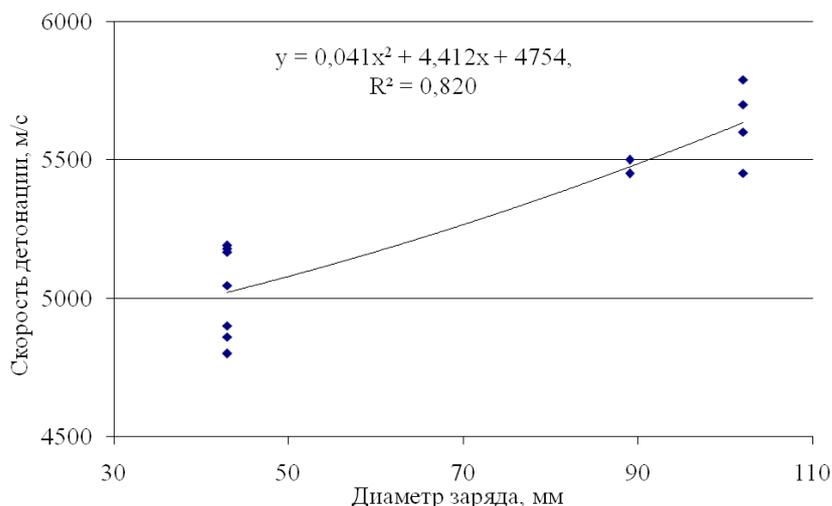
Реальные взрывчатые характеристики ЭВВ «Сабтэк», при установленных оптимальных плотностях заряжания, были определены в специальных экспериментах в натуральных условиях.

В таблице представлены результаты измерений скорости детонации в скважинах диаметром 89 и 102 мм, а также в шпурах диаметром 43 мм, на основе которых определены фактическая теплота взрыва, полнота тепловыделения и детонационное давление (табл. 46).

Видно, что с увеличением диаметра заряда увеличивается скорость детонации (рис. 55) и, соответственно, теплота взрыва и степень реализации потенциальной энергии взрыва.

Сравнение расчетных и экспериментальных характеристик ЭВВ «Сабтэк»

№	Теплота взрыва $Q_{\text{взр.}}$ по ТУ, ккал/кг	Диаметр заряда, мм	Экспериментальная скорость детонации, м/с	Фактическая теплота взрыва $Q_{\text{факт.}}$ , ккал/кг	Детонационное давление, ГПа	Полнота тепловыделения
1	793	43	4900	634	8,5	0,80
2			5180	666	9,3	0,84
3			5190	674	9,5	0,85
4			4800	619	8,1	0,78
5			5167	666	9,3	0,84
6			4860	626	8,3	0,79
7			5046	650	8,9	0,82
8			4720	611	8,0	0,77
		Среднее значение для шпуров 43 мм	4983	643	8,7	0,81
9		89	5450	735	11,4	0,93
10			5442	742	11,6	0,94
11			5349	734	11,4	0,93
12			5500	721	11,0	0,91
13			5245	707	10,5	0,89
			Среднее значение для скважин 89 мм	5397	728	11,2
14		102	5700	769	12,5	0,97
15			5600	755	12,0	0,95
16			5550	748	11,8	0,94
17	5451		735	11,4	0,93	
18	5327		718	10,9	0,91	
	Среднее значение для скважин 102 мм	5526	745	11,7	0,94	



**Рис. 55.** Экспериментальные значения скорости детонации эмульсионного ВВ «Сабтэк» в зарядах разного диаметра

Проведенные исследования доказывают, что при расчете параметров буровзрывных работ руководствоваться теплотой взрыва, приведенной в технических условиях не всегда верно. Наиболее точные результаты параметров БВР могут быть получены, если руководствоваться теплотой взрыва заряда, рассчитанной с учетом его диаметра [137].

### 3.3. Оценка качества приготовления эмульсионного взрывчатого вещества «Сабтэк»

Компонентный состав применяемых в настоящее время ЭВВ принципиально ничем не отличается: эмульсионная матрица и сенсibilизатор. Имеющиеся различия в компонентном составе обусловлены условиями применения ЭВВ — либо в подземных условиях (со всеми ограничениями применения), либо для открытых горных работ, а также применением по породам и рудам, содержащим сульфиды.

Количественное содержание компонентов эмульсионной матрицы также примерно одинаково: аммиачная селитра — 73–80 %; вода — 10–20 %; топливная фаза — 2–10 % и небольшое количество других добавок — до 0,4 % в зависимости от специфики условий применения.

Основным компонентом раствора окислителя является аммиачная селитра, которая имеет высокую растворимость, удовлетворительный кислородный баланс, в процессе ее взрывчатого разложения не образуется твердых окислов. Кроме того, при повышении температуры аммиачная селитра разлагается с выделением тепла, которое повышает чувствительность ЭВВ к инициирующему импульсу.

Ряд авторов [138–140] указывает на термодинамическую нестойкость аммиачной селитры, вследствие образования при гидролизе раствора окислителя азотной кислоты, являющейся сильнейшим окислителем. Что, по их мнению, обуславливает высокую опасность при работе с горячими растворами аммиачной селитры (повышенная чувствительность к удару, трению и т. п.). Повышать термодинамическую стойкость аммиачной селитры они предлагают добавками

других селитр (в таком случае раствор окислителя называют «бинарным»). Применение бинарного раствора окислителя обеспечивает не только стабилизацию системы и повышение безопасности при обращении с раствором, но и снижение температуры кристаллизации раствора окислителя.

Другие авторы [141, 142] приводят расчеты, показывающие, что наилучшие взрывчатые характеристики имеют ЭВВ с окислительной фазой на базе только аммиачной селитры (так называемый «монораствор»).

Качество эмульсионной матрицы также зависит от эмульгаторов, которые обеспечивают стабильность и водостойкость высококонцентрированных обратных эмульсий, содержимое дисперсной фазы которых достигает 90 %. Вопрос применения эмульгаторов для изготовления эмульсионной матрицы также широко рассмотрен и описан в научной литературе. Основные требования к эмульгаторам стабильных эмульсий изложены в работах [142–144].

Требования к жидкому горючему как компоненту эмульсионной матрицы обусловлены прежде всего ее теплотворной способностью и реологическими характеристиками. Кроме того, жидкое горючее должно иметь температуру вспышки не ниже 70 °С, невысокую стоимость и быть доступным.

На этом требования к качеству компонентов ЭМ заканчиваются.

По определению эмульсия — это механическая смесь двух не смешивающихся при обычных условиях жидкостей обычно неорганического и органического происхождения, стабилизированная добавкой эмульгатора [143, 144]. Чтобы приготовить стабильную эмульсию для изготовления взрывчатой композиции, все компоненты смеси должны находиться в жидком состоянии. В нашем случае это горячий раствор окислителя и подогретая топливная фаза. У технологов, изготовителей ЭМ, смесь жидкого нефтепродукта (дизельное топливо, индустриальное масло и т. п.) и эмульгатора принято называть «топливной фазой», несмотря на то, что эта смесь образует «дисперсную среду» эмульсии. Эмульгатор для стабилизации эмульсии находится в топливной фазе, т. к. у нас «обратная эмульсия» или «вода в масле». В процессе приготовления эмульсии в смесителе температура компонентов падает, поэтому изначально они берутся с более высокой температурой, обеспечивающей жидкое состояние. С топливной фазой при падении температуры фазовых изменений не происходит. Все проблемы возникают с неорганическим компонентом. При охлаждении насыщенного раствора аммиачной селитры неизбежно начинается процесс кристаллизации — образования твердой фазы. В таком случае приготовить эмульсию становится невозможно. Даже только приготовить, не говоря о получаемом качестве эмульсии. Поэтому важно, чтобы компонент эмульсии — аммиачная селитра — был чист, не имел примесей и характеристики его отвечали заявленным. Иначе возникают проблемы и при изготовлении эмульсии, и при хранении, и при применении.

При производстве эмульсионной матрицы для изготовления ЭВВ существуют требования технических условий по качеству применяемых для их изготовления компонентов. Показатели качества эмульсионной матрицы следующие: внешний вид; температура и динамическая вязкость. Значение вязкости тесно связано с качеством приготовления раствора окислителя. В первую очередь он должен быть однородным и иметь, возможно низкую??? температуру выпадения кристаллов. Кристаллические включения (содержащиеся в компонентах раствора окислителя или появляющиеся в процессе приготовления раствора по определенным причинам) будут отрицательно сказываться на устойчивости и эмульсионной матрицы, и взрывчатого вещества

в дальнейшем. Однородность раствора будет обеспечена требованием растворимости компонентов в применяемом количестве воды для растворения. Температура раствора окислителя, поступающего на эмульгирование, должна быть значительно выше температуры кристаллизации составляющих его компонентов при данном содержании воды. Содержание воды лимитируется, т. к., в свою очередь, оказывает влияние на длительность хранения эмульсионной матрицы, устойчивость будущего ВВ, его плотность и детонационные свойства.

С начала изготовления и применения ЭВВ «Сабтэк» в подземных условиях КФ АО «Апатит» периодически возникали проблемы с прохождением газификации в процессе заряжания скважин, было отмечено расслоение матрицы и выпадение колонки заряда из скважин, что приводило к некачественной отбойке массива горных пород. Одной из возможных причин некачественного дробления при отбойке и случаев «прострела скважин» могут быть особенности компонентного состава взрывчатой смеси, не регламентированные в ТУ.

Все взрывчатые материалы, если возникает сомнение в их доброкачественности при осмотре или неудовлетворительных результатах в процессе взрывных работ, подвергаются испытаниям независимо от срока хранения. Для проверки соответствия компонентов эмульсионного взрывчатого вещества требованиям нормативного документа (ТУ) устанавливаются приемо-сдаточные испытания, которым должна подвергаться каждая партия компонентов. При загрузке емкостей для транспортировки и хранения ЭМ из аппарата эмульгирования объем партии соответствует количеству ЭМ, изготавливаемой за один прием в аппарате эмульгирования.

При приемо-сдаточных испытаниях ЭМ «Сабтэк» проверяют:

- внешний вид;
- температуру;
- динамическую вязкость.

Определение температуры и динамической вязкости ЭМ «Сабтэк» проводят ежемесячно в соответствии с технической документацией АО «Орика СиАйЭс» в процессе изготовления каждой партии эмульсионной матрицы в аппарате эмульгирования. Отбор проб ЭМ «Сабтэк» для проведения испытаний проводят из пробоотборного крана установки эмульгирования в процессе изготовления эмульсионной матрицы.

Входной контроль качества ЭМ «Сабтэк» осуществляют при подготовке к процессу изготовления ЭВВ «Сабтэк» при заряжании скважин согласно технической документации, разработанной АО «Орика СиАйЭс».

Внешний вид ЭМ «Сабтэк» определяют визуально, в процессе изготовления, перед загрузкой матрицы в емкость смесительно-зарядной машины и при подготовке к заряжанию скважин. Температуру ЭМ определяют термометром. Определение вязкости проводят в соответствии с методикой, разработанной АО «Орика СиАйЭс».

При получении неудовлетворительных результатов испытаний по проверке показателей качества ЭМ «Сабтэк» проводят повторное определение по конкретному показателю в удвоенном количестве испытаний. При получении и в этом случае неудовлетворительного результата вся партия ЭМ «Сабтэк» подлежит сливу в емкость для хранения некондиционной эмульсии. Некондиционная эмульсия подлежит утилизации в соответствии с технической документацией.

При приемо-сдаточных испытаниях газогенерирующей добавки объем партии соответствует количеству ГГД, изготавливаемой за один прием в одном аппарате растворения. Отбор проб для проведения испытаний проводят из аппарата

растворения в процессе изготовления ГГД. Внешний вид ГГД определяют визуально в процессе изготовления. Также проверяют температуру и плотность раствора. Определение температуры и плотности ГГД проводят ежемесячно.

Все компоненты ЭВВ изготавливаются в заводских условиях с постоянным контролем приготовления компонентов. Качество их приготовления гарантируется технологическим процессом.

В производственных условиях КФ АО «Апатит» при приготовлении раствора окислителя с использованием аммиачной селитры АО «ФосАгро-Череповец» происходит образование осадка. При использовании аммиачной селитры других производителей промышленный осадок не образуется. Образование осадка происходит именно в процессе приготовления раствора окислителя, который содержит не только аммиачную селитру. Поэтому для выяснения причины образования осадка анализировались все сырьевые компоненты.

В состав окислителя эмульсионной матрицы [145], кроме аммиачной селитры (77,4 %), входят: тиомочевина (0,2 %), регулятор pH (0,2 %) и вода (22,2 %). Сначала были проанализированы нормативные документы сырьевых компонентов, применяемых при изготовлении ЭМ «Сабтэк», указанные в табл. 47.

Таблица 47

Компонентно-ингредиентный состав эмульсионной матрицы «Сабтэк Вэлкро-200»

	Компоненты	Содержание компонента, масс. %
1	Нитрат аммония	72,4±10,0
2	Топливная фаза	6,5±5,0
3	Регулятор pH	0,2±0,2
4	Тиомочевина	0,2±0,2
5	Вода	20,7±10,0

В качестве нитрата аммония используют гранулированную аммиачную селитру по ГОСТ 2-2013 [146].

В качестве топливной фазы используют готовый комбинированный продукт (смесь эмульгаторов, стабилизаторов и жидкого нефтепродукта).

В качестве регулятора pH используется кислота (лимонная или уксусная, или основание (карбонат натрия), добавляемые сверх 100 % в раствор окислителя в количестве, необходимом для стабилизации pH раствора окислителя на уровне 2,0–5,0 ед. pH).

Для придания эмульсионной матрице взрывчатых свойств применяется газогенерирующая добавка (ТУ 7276-002-23308410-2006).

Для газификации эмульсионной матрицы в скважинах применялась добавка UGS серии 703, в шпурах — UGS серии 710.

Компонентный состав ЭВВ «Сабтэк»: 97,7 % эмульсионной матрицы и 2,3 % газогенерирующей добавки.

Компонентный состав ГГД: 703 серия — 2,5–3,5 % нитрита натрия и 96,5–97,5 % воды; 710 серия — 9,5–10,5 % нитрита натрия и 89,5–90,5 % воды. Кроме того, составы дополнительно содержат нитрат магния в количестве 1–15 %.

Температура эмульсионной матрицы должна находиться в пределах 15÷30 °С. Температура применяемой ГГД не контролируется.

### 3.3.1. Анализ образцов гранулированной аммиачной селитры различных заводов-изготовителей

Анализ компонентов начинали с аммиачной селитры как самого массового компонента в эмульсионной матрице. Для анализа были взяты следующие образцы:

- образец № 1 — аммиачная селитра производства АО «Объединенная химическая компания “Уралхим”» по ГОСТ 2-2013, марка А;
- образцы № 2 и 3 — аммиачная селитра производства АО «ФосАгро-Череповец» по ГОСТ 2-2013, марка Б.

В материалах, размещенных на сайте [www.phosagro.ru](http://www.phosagro.ru), указано, что АО «ФосАгро-Череповец» производит минеральное удобрение — аммиачную селитру. АО «Объединенная химическая компания “Уралхим”» ([www.uralchem.ru](http://www.uralchem.ru)) производит химическую продукцию — аммиачную селитру.

Селитра аммиачная (нитрат аммония) с 1 июля 2014 г. выпускается по ГОСТ 2-2013 [146]. В зависимости от назначения селитру выпускают двух марок: А — для промышленности; Б — для сельского хозяйства. Также в стандарте [146] (п. 3.2) указано, что допускается применение для промышленных целей селитры марки Б. По физико-химическим свойствам селитра должна соответствовать требованиям и нормам, указанным в табл. 48.

Таблица 48

Выдержка из стандарта ГОСТ 2-2013. Селитра аммиачная. Технические условия

Наименование показателя	Норма для марки	
	А	Б, сорт высший
1. Внешний вид	Гранулы белого цвета или слегка окрашенные без механических примесей	
2. Суммарная массовая доля нитратного и аммонийного азота в пересчете на: $\text{NH}_4\text{NO}_3$ в сухом веществе, %, не менее; азот в сухом веществе, %, не менее	98	34,4
3. Массовая доля воды, %, не более:		
гигроскопической:		
с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками;	0,2	0,2
с добавками нитратов кальция и магния;	0,3	0,3
общей:		
с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками;	0,5	0,5
с добавками нитратов кальция и магния	0,6	0,6
4. pH водного раствора с массовой долей 10 %, не менее:		
с добавкой нитратов кальция и магния;	5,0	5,0
с сульфатно-фосфатной добавкой;	4,5	4,5
с сульфатной добавкой	4,0	4,0
6. Гранулометрический состав:		
массовая доля гранул размером от 1 до 3 мм, %, не менее;	93	Н/н
массовая доля гранул размером от 1 до 4 мм, %, не менее.	Н/н	95
В том числе гранул размером от 2 до 4 мм, %, не менее:	Н/н	80
массовая доля гранул размером менее 1 мм, %, не более;	4	3
массовая доля гранул размером более 6 мм, %	0	0
7. Статическая прочность гранул, МПа ( $\text{кгс}/\text{см}^2$ , не менее или в пересчете на гранулу, Н ( $\text{кгс}$ ) не менее:		
с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками;	5 (0,5)	16,3
с добавками нитратов кальция и магния		10 (1,0)
		8 (0,8)

В соответствии со стандартом ГОСТ 2-2013 п. 3.3.4 для обеспечения сохранности товарных свойств продукции при транспортировании и хранении селитру марок А и Б выпускают с применением стабилизирующих добавок,

содержащих кальций в виде нитрата кальция, магний в виде нитрата магния, сульфат или сульфат в сумме с фосфатом.

Селитру марок А и Б с сульфатной и сульфатно-фосфатной добавками выпускают только с применением поверхностно-активных антислеживающих добавок.

Содержание соответствующей стабилизирующей добавки в селитре должно составлять:

- для магнийсодержащей добавки массовая доля нитратов кальция и магния в пересчете на MgO — от 0,2 до 0,5 %;
- для сульфатной добавки — массовая доля сульфата аммония — от 0,3 до 0,7 %;
- для сульфатно-фосфатной добавки — массовая доля сульфата аммония в сумме с фосфатом аммония — от 0,3 до 0,7 %.

На первом этапе проводили химический анализ образцов с определением: суммарной массовой доли нитратного и аммонийного азота в пересчете на  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  в сухом веществе; массовую долю нитратов кальция и магния в пересчете на MgO; массовую долю сульфата аммония  $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$  и массовую долю фосфата аммония  $(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ . Результаты анализа приведены в табл. 49.

Таблица 49

Результаты химического анализа образцов аммиачной селитры

Анализируемый компонент в аммиачной селитре	Содержание анализируемого компонента в аммиачной селитре		
	образец № 1 АО «ОХК Уралхим»	образец № 2 АО «ФосАгро-Череповец»	ГОСТ 2-2013 (марки А и Б)
$\Sigma \text{NH}_4^+; \text{NO}_3^-$ :			
$\text{NH}_4\text{NO}_3$ в сухом веществе, %;	99,2	Н/н	Не менее 98
азот в сухом веществе, %	Н/н	34,8	Не менее 34,4
MgO, %	0,44	0,42	0,2–0,5
$(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ , %	Н/о	Н/о	0,3–0,7
$(\text{NH}_4)_3\text{PO}_4$ , %	Н/о	Н/о	0,3–0,7

Примечание. Н/н — не нормируется; н/о — не обнаружено.

Эти данные были подтверждены результатами спектрального анализа образцов аммиачной селитры (табл. 50).

Таблица 50

Результаты спектрального анализа образцов аммиачной селитры\*

Определяемый элемент	№ 1	№ 2	№ 3
Mg	0,3–1,0	0,3–1,0	0,3–1,0
Al	–	$\geq 0,0001$	$\geq 0,0001$
Fe	$\leq 0,001$	0,001	0,001
Ca	0,1	0,1	0,1
Si	–	0,01	0,003

\* № 1 — АО «ОХК Уралхим»; № 2 и 3 — АО «ФосАгро-Череповец». Содержание элемента приведено в %.

Все образцы содержат магний и кальций (см. табл. 50), а также железо в очень небольшом количестве. Образцы № 2 и 3 содержат также 0,01 и 0,003 % кремния соответственно и следовые количества алюминия.

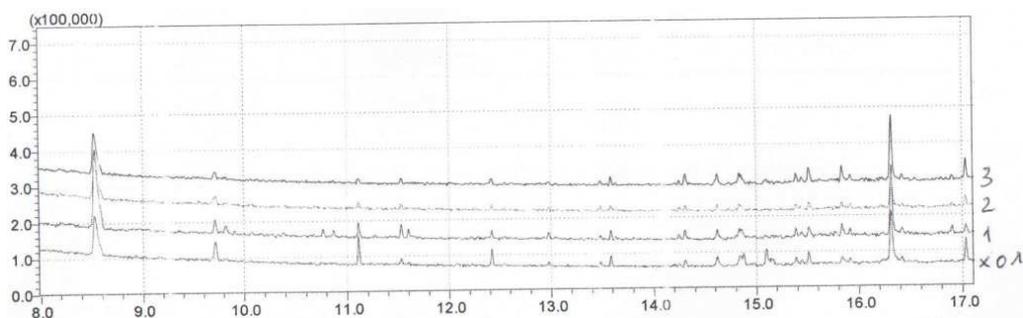
По результатам анализа был сделан вывод, что в качестве стабилизирующей добавки образцы содержат добавку нитратов кальция и магния. В этом случае они не должны содержать поверхностно-активных антислеживающих добавок.

Отсутствие в образцах поверхностно-активных добавок устанавливали методом хромато-масс-спектрометрии.

Определение основано на выделении органических соединений из образцов экстракцией дихлорметаном и исследовании с помощью хромато-масс-спектрометра GCMS-QP2010 фирмы SHIMADZU с программным обеспечением для обработки

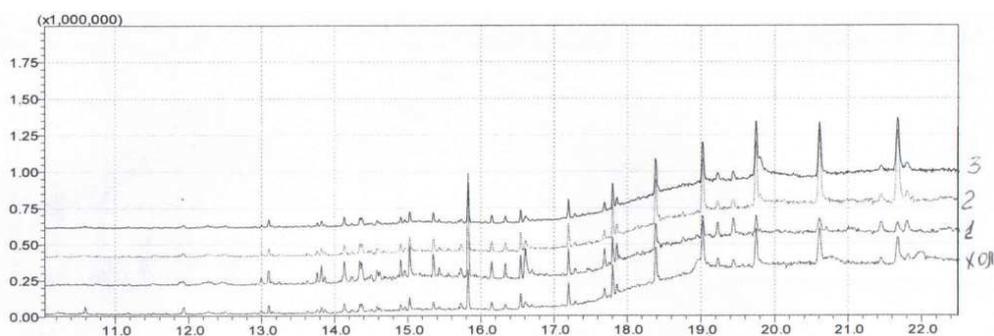
данных. Идентификацию органических соединений проводили путем сравнения полученных масс-спектров со спектрами, содержащимися в компьютерной библиотеке баз данных NIST 27.

Пробы готовили ультразвуковой экстракцией из сухих образцов и экстракцией из водных растворов образцов аммиачной селитры. Разделение производили хроматографическим способом на капиллярной колонке HP-5MS длиной 30 м с температурной программой: 40°/мин (5 мин) – 20°/мин – 300°/мин (5 мин). Температура инжектора — 300 °С, температура детектора — 290 °С. Хроматограмма проб ультразвуковой экстракции из сухих образцов представлена на рис. 56.



**Рис. 56.** Общая хроматограмма проб ультразвуковой экстракции из сухих образцов аммиачной селитры № 1–3 и пробы сравнения «хол»

Из рисунка видно, что хроматограммы всех трех образцов одинаково сходны с хроматограммой холостой пробы сравнения. Органических соединений в пробах образцов № 1–3 нет. То же самое можно сказать и о пробах, полученных экстракцией из водных растворов образцов № 1–3. Хроматограмма приведена на рис. 57.



**Рис. 57.** Общая хроматограмма проб экстракцией из водных растворов образцов аммиачной селитры № 1–3 и пробы сравнения

Для качественного анализа неорганических соединений ценным аналитическим методом служит инфракрасная спектроскопия. ИК-спектр нитрата аммония характеризуется наличием характерных полос колебаний ионов аммония в области  $\nu = 3335\text{--}3030\text{ см}^{-1}$  и  $\delta = 1485\text{--}1390\text{ см}^{-1}$  и нитрат иона в области  $\nu = 1410\text{--}1340\text{ см}^{-1}$  и  $\delta = 860\text{--}800\text{ см}^{-1}$  (рис. 58 и 59).

Спектр (рис. 59) взят из библиотеки National Institute of Standards and Technology (<http://nist.gov/cgi>) для химически чистого (х. ч.) нитрата аммония.

Для качественного сравнения полученных в лаборатории ИК-спектров образцов аммиачной селитры (рис. 60) на рис. 61 приведен ИК-спектр нитрата кальция.

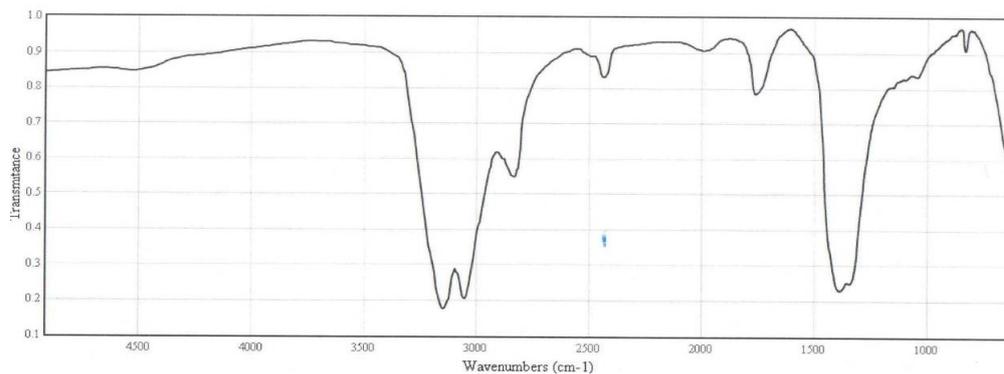


Рис. 58. ИК-спектр нитрата аммония (х. ч.)

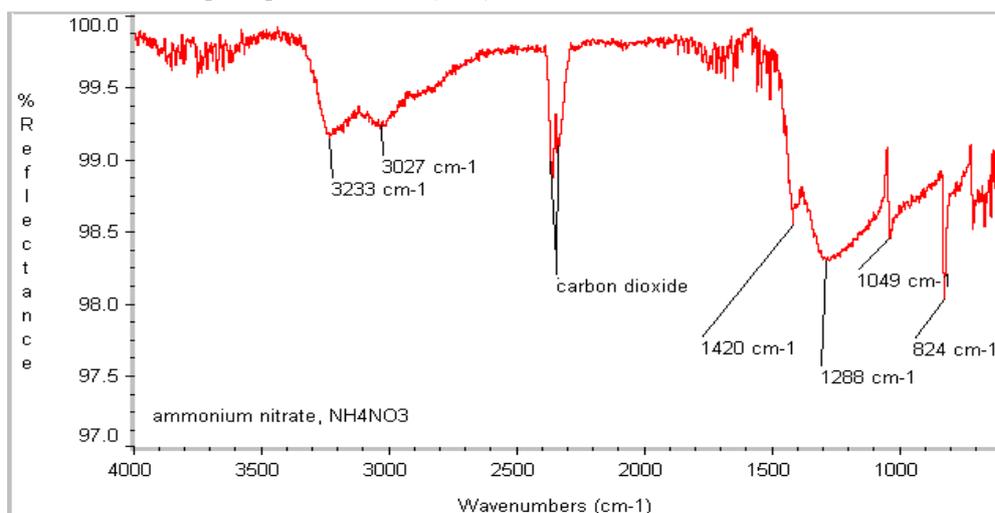


Рис. 59. ИК-спектр нитрата аммония (химическая продукция)

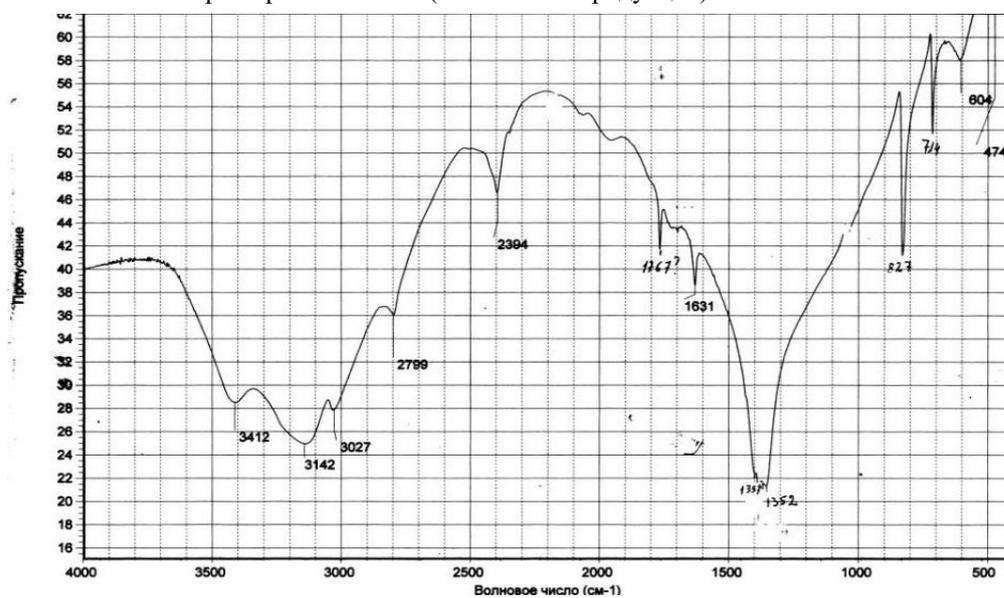


Рис. 60. ИК-спектр образца аммиачной селитры № 1

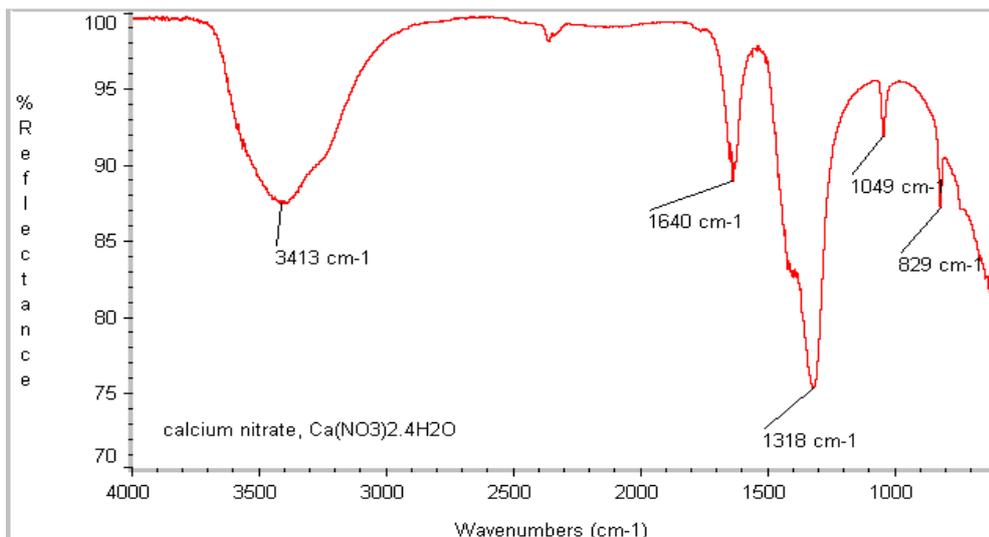


Рис. 61. ИК-спектр нитрата кальция

В ИК-спектрах образцов аммиачной селитры присутствуют указанные выше полосы, характерные ионам аммония и нитрат-ионам. Также в спектре присутствуют характеристичные колебания  $\text{OH}^-$ -групп.

Присутствия фосфат-иона ( $\nu = 1100\text{--}950 \text{ cm}^{-1}$ ) и сульфат-ионов ( $\nu = 1130\text{--}1080 \text{ cm}^{-1}$ ) не обнаружено, что подтверждается картинками ИК-спектров веществ, содержащих сульфат-ион и ионы фосфата (рис. 62 и 63).

Проведенный различными методами количественный и качественный анализ образцов аммиачной селитры позволяет сделать вывод, что по химическому составу образцы аммиачной селитры соответствуют ГОСТ 2-2013. В качестве стабилизирующей добавки образцы содержат нитраты кальция и магния. Поверхностно-активных добавок не обнаружено.

Далее проводили анализ содержания компонентов, которые не регламентируются ГОСТ 2-2013.

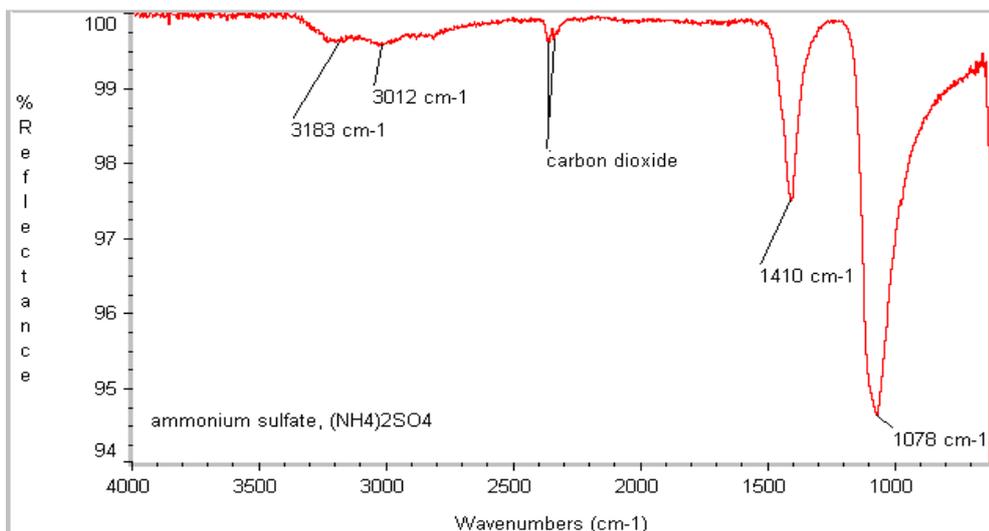
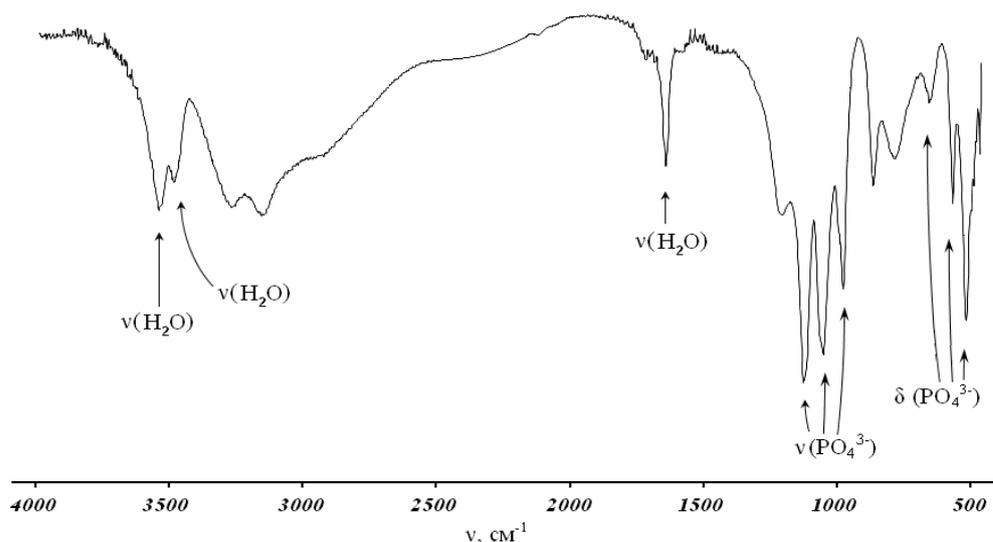


Рис. 62. ИК-спектр сульфата аммония



**Рис. 63.** ИК-спектр брусита ( $\text{CaHPO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

В действующем стандарте (ГОСТ 2-2013) содержание нерастворимых примесей в аммиачной селитре не нормируется. В более ранних стандартах (ГОСТ 2-75) указывалось, что содержание нерастворимых примесей в селитре марки А не должно составлять более 0,2 %. Согласно «ГОСТ 29238-91 Нитрат аммония технический. Метод определения содержания вещества, не растворимого в воде (гравиметрический)» [147] было проведено определение нерастворимых примесей в аммиачной селитре. 100 г сухого вещества растворяли в литровом стакане водой объемом 500 мл при температуре 22 °С. После полного растворения вещества раствор фильтровали на предварительно обработанный и высушенный до постоянной температуры фильтр. Дополнительно тщательно промывали стенки стакана и фильтр небольшими порциями воды той же температуры. Фильтр сушили в печи при температуре  $110 \pm 5$  °С в течение 1 ч и далее по указанной методике. На рисунке 64 приведена фотография, выполненная в процессе растворения 100 г аммиачной селитры. Слева — образец № 1, справа — № 2. При растворении различных образцов селитры растворы окрашиваются не одинаково. Раствор образца № 1 (АО «ОХК «Уралхим»») — бесцветный и прозрачный. Раствор образца № 2 (АО «ФосАгро-Череповец») — окрашен и мутный.



**Рис. 64.** Растворение образцов аммиачной селитры

После отстаивания в течение суток раствор № 2 также становится прозрачным, окрашенная муть выпадает в гелеобразный осадок, что видно на фотографии (рис. 65 слева). Осадок раствора № 2 собирается на фильтре (рис. 65 справа).



**Рис. 65.** Растворы после отстаивания в течение суток (слева) и различие в осадках на фильтре образцов № 1 и 2 (справа)

После процедуры высушивания фильтра с осадком определяли содержания вещества, не растворимого в воде. Для образца № 1 все перешло в раствор, нерастворимого содержания нет. Для образца № 2 содержание высушенного нерастворимого осадка составило 0,01 %.

Похожий эксперимент провели с навеской аммиачной селитры большей массы. Навеску селитры 600 г поместили в стакан большого объема и небольшими порциями приливали горячую воду (температура — 80–90 °С). Раствор перемешивали, давали время отстояться, декантировали на предварительно подготовленный фильтр. Такие действия производили до полного растворения аммиачной селитры в стакане. Содержимое на фильтре также промывали небольшими порциями горячей воды до отсутствия на фильтре характерного кристаллической аммиачной селитре «оснежения» по краю фильтра. Затем фильтр сушили в печи при температуре  $110 \pm 5$  °С в течение 1 ч и далее по указанной выше методике. После процедуры высушивания определяли содержания вещества, не растворимого в воде. Для образца № 1 все перешло в раствор, нерастворимого содержания нет. Для образца № 2 содержание нерастворимого составило те же самые 0,01 %.

На рисунке 66 слева приведена фотография осадка, выпадающего при охлаждении раствора окислителя, содержащего аммиачную селитру (образец № 2). При растворении аммиачной селитры из образца № 1 после кристаллизации осадка вообще не образуется (рис. 66 справа).



**Рис. 66.** Осадок, выпадающий при кристаллизации раствора окислителя, приготовленного с использованием образца селитры № 2 и вид закристаллизовавшегося раствора окислителя, приготовленного с использованием образца селитры № 1

Анализируя вышесказанное по компонентному и количественному составу используемого сырья, следует вывод, что возможное суммарное количество нерастворимого осадка при приготовлении, например, 20 т раствора окислителя составит не более 5 кг в пересчете на сухое вещество. Тем не менее, как уже указывалось выше, при использовании аммиачной селитры в некоторых случаях происходит образование большего количества осадка, поэтому исследование было продолжено. Был сделан химический анализа производственного осадка раствора окислителя после манипуляций с выделением нерастворимой его части. С учетом количества сухого остатка содержание кремния в промышленном осадке составляет 2,5 %; железа — 0,75 %; алюминия — 0,25 %. По результатам проведенного спектрального элементного анализа образцов аммиачной селитры и различия в образовании осадка при растворении образцов аммиачной селитры № 2 можно сделать следующие выводы. Кремний, железо и алюминий могут образовывать оксигидраты, которые при определенных условиях (рН раствора, повышенная температура) образуют коллоидные растворы, способные к гелеобразованию [148].

Единого адекватного описания процессов образования гелей, начиная со стадии активации, образования гидроксиаквакомплексов, их полимеризации, образования коллоидного раствора и затем геля еще не существует, но следует учитывать вероятностный характер полимеризационных процессов, развивающихся в геле.

Гели характеризуются наличием пространственной структуры. Структура «рыхлая» и пустоты заполнены растворами или, как возможно в рассматриваемом случае, — выпавшими в осадок при понижении температуры кристаллами. Кроме того, коллоиды характеризуются адсорбционными способностями, которые обеспечиваются физическими поверхностными силами взаимодействия частичек.

При дегидратации гелей в процессе сушки гидратная вода теряется, т. е., если продукт высушить при температуре выше 100 °С, то образуется продукт значительно меньшего объема.

Таким образом, аммиачная селитра производства АО «ФосАгро-Череповец» содержит кремний и железо, которые при приготовлении раствора окислителя способны образовывать нерастворимые гелеобразные осадки большого объема. В аммиачной селитре производства АО «Объединенная химическая компания “Уралхим”» по ГОСТ 2-2013, марка А эти примеси отсутствуют. Поэтому она в большей степени пригодна для изготовления эмульсионной матрицы.

### 3.3.2. Анализ образцов газогенерирующей добавки и ее компонентов

Для установления соответствия нитрита натрия стандарту было проведено определение показателей, указанных в ГОСТ 19906-74 [149]. Технический нитрит натрия, в зависимости от сорта, должен соответствовать нормам, приведенным в табл. 51.

Таблица 51  
Физико-химические показатели нитрита натрия (п. 1.2. ГОСТ 19906-74)

№	Наименование показателя	Норма, сорт		
		высший	первый	второй
1	Внешний вид	Белые кристаллы с сероватым или желтоватым оттенком		
2	Массовая доля нитрита натрия, %, не менее	99,0	98,5	97,0
3	Массовая доля нитрата натрия, %, не более	0,8	1,0	—
4	Массовая доля хлористого натрия, %, не более	0,10	0,17	—
5	Массовая доля нерастворимого в воде прокаленного остатка, %, не более	0,03	0,03	0,07
6	Массовая доля воды, %, не более	0,3	1,4	2,5

На первом этапе проводили химический анализ образца с определением указанных в табл. 51 показателей. Результаты анализа приведены в табл. 52.

Таблица 52

## Результаты химического анализа образца нитрита натрия

№ п/п	Наименование показателя	Нитрит натрия
1	Внешний вид	Белые кристаллы с серо-желтоватым оттенком
2	Массовая доля нитрита натрия, %	99,10
3	Массовая доля нитрата натрия, %	Н/о
4	Массовая доля хлористого натрия, %	Н/о
5	Массовая доля нерастворимого в воде прокаленного остатка, %	0,05
6	Массовая доля воды, %	0,3

Примечание. Н/о — не обнаружено.

По результатам химического анализа отклонений от стандарта в показателях нитрита натрия не зафиксировано. По химическому составу образец нитрита натрия соответствует ГОСТ 19906-74.

Кроме определения нормируемых стандартом показателей масс-спектрометрическим методом (с индуктивно связанной плазмой — МС ИСП), в приготовленных водных растворах образцов проведено определение большого ряда элементов. Список элементов с содержанием ниже пределов обнаружения: Li; Be; K; Sc; Ti; V; Mn; Co; Ni; Cu; Ga; Ge; As; Se; Rb; Y; Zr; Nb; Mo; Cd; In; Sn; Sb; Te; Cs; Ba; Ta; W; Re; Tl; Pb; Bi; Th; U. Список определенных элементов приведен в табл. 53.

Таблица 53

## Результаты масс-спектрометрического определения элементов в образцах нитрита натрия

Определяемый в образце элемент	Содержание элемента в образце аммиачной селитры, %
Mg	0,0016
Al	0,00029
Si	0,0013
Ca	0,00113
Cr	0,0006
Zn	0,0007
Fe	<0,001

Содержание магния, и кальция очень низкое, что не должно влиять на свойства нитрита натрия как газогенерирующего агента.

Чистоту образца (отсутствие ненормируемых примесей) устанавливали методом ИК-спектроскопии. ИК-спектр химически чистого нитрита натрия характеризуется наличием характерных полос колебаний нитрит иона в области 1400–1300 см<sup>-1</sup>; 1250–1230 см<sup>-1</sup> и 840–800 см<sup>-1</sup> [150]. На рисунке 67 приведена спектрограмма образца нитрита натрия в сравнении с литературными данными о нем.

В ИК-спектрах присутствуют указанные выше полосы, характерные нитрит-ионам. Спектр полностью соответствует химически чистому нитриту натрия. В образце нитрита натрия не регламентированных ГОСТ 19906-74 добавок не обнаружено.

Для установления соответствия нитрата магния стандарту было проведено определение показателей, указанных в ГОСТ 11088-75 [151]. Реактив нитрат

магния, в зависимости от чистоты («ч. д. а. — чистый для анализа»; «ч. — чистый»), должен соответствовать нормам, приведенным в табл. 54.

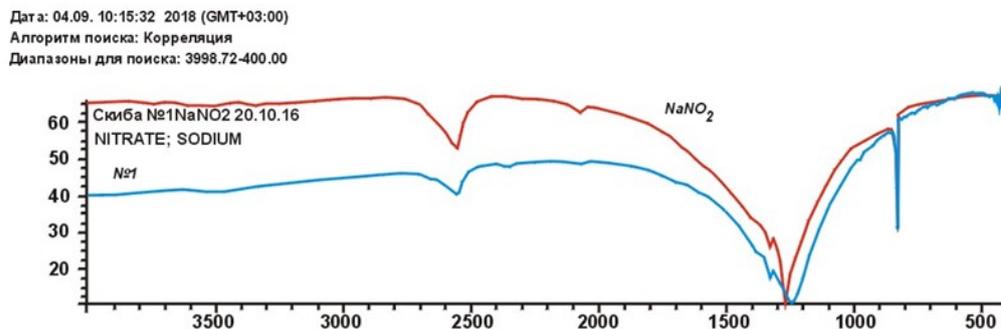


Рис. 67. ИК-спектр образца нитрита натрия

Таблица 54

Физико-химические показатели нитрата магния (п. 1.1. ГОСТ 11088-75)

№ п/п	Наименование показателя	Норма	
		ч. д. а.	ч.
1	Азотнокислый магний $[Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ , %, не менее	99	98
2	Сульфаты ( $SO_4$ ), %, не более	0,005	0,01
3	Фосфаты ( $PO_4$ ), %, не более	0,0005	0,002
4	Хлориды (Cl), %, не более	0,005	0,001
5	Аммонийные соли ( $NH_4$ ), %, не более	0,01	—
6	Барий (Ba), %, не более	0,002	0,01
7	Железо (Fe), %, не более	0,002	0,001
8	Калий и натрий (K + Na), %, не более	0,01	0,1
9	Кальций (Ca) %, не более	0,01	0,05
10	Мышьяк (As) %, не более	0,00005	0,002
11	Тяжелые металлы (Pb), %, не более	0,0005	0,002

Результаты химического анализа образца по показателям табл. 54 приведены в табл. 55.

Таблица 55

Химический анализ образца нитрата магния

№ п/п	Наименование показателя	Значение анализируемого показателя
1	Азотнокислый магний $[Mg(NO_3)_2 \cdot 6H_2O]$ , %	99,3
2	Сульфаты ( $SO_4$ ), %	0,031
3	Фосфаты ( $PO_4$ ), %	Н/о
4	Хлориды (Cl), %	Н/о
5	Аммонийные соли ( $NH_4$ ), %	Н/о
6	Барий (Ba), %	0,0005
7	Железо (Fe), %	0,0002
8	Калий и натрий (K + Na), %	0,005
9	Кальций (Ca) %	0,005
10	Мышьяк (As) %	Н/о
11	Тяжелые металлы (Pb), %	Н/о

По результатам химического анализа отклонений от стандарта в показателях нитрата магния не зафиксировано. По химическому составу образец нитрата магния соответствует ГОСТ 11088-75.

Анализировались образцы газогенерирующей добавки из емкостей смесительно-зарядных машин Кировского рудника. Содержание нитрита натрия и нитрата магния приведено в табл. 56.

Таблица 56

Результаты анализа образцов газогенерирующих добавок, используемых на Кировском руднике

№	Время отбора образца ГГД, год	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание нитрита натрия, %	Содержание нитрата магния, %
1	2018	1,042	3,0	2,5
2		1,036	2,7	1,9
3		1,040	3,1	2,3
4		1,039	3,0	2,1
5		1,038	3,0	1,3
6	2019	1,038	3,2	2,5
7		1,038	3,4	2,4
8		1,038	3,4	2,6
9		1,038	2,9	2,3
10	2020	1,039	3,5	2,6

Во всех исследуемых образцах содержание компонентов (нитрит натрия и нитрат магния) находится примерно на одном и том же уровне, что говорит о необходимом качестве исходных компонентов и соблюдении режима приготовления раствора ГГД. Все образцы ГГД соответствуют ТУ.

### 3.3.3. Анализ образцов эмульсионной матрицы

Образцы на анализ брались из емкостей эмульсионной матрицы зарядных машин. Кроме определения внешнего вида и плотности, было выполнено количественное определение содержания воды и топливной фазы (суммарно жидкий нефтепродукт и эмульгатор) образцов.

Определение воды производили стандартным методом по ГОСТ 14870-77 «Методы определения содержания воды в неорганических и органических реактивах» [152].

Количество топливной фазы в эмульсионной матрице определяли экстрагированием оставшегося после определения воды раствора органическим растворителем. Растворитель — этиловый эфир.

Согласно ТУ2241-003-23308410-2006 содержание воды в эмульсионной матрице составляет от 10,7 до 30,7 %; содержание топливной фазы — от 1,5 до 11,5 %. Плотность матрицы не нормируется. Показатель плотности используется при контроле в процессе приготовления взрывчатого вещества. В таблице 57 приведены результаты анализа образцов.

Внешний вид образцов ЭМ соответствует требованиям — однородное вещество светло-кремового оттенка. Плотность образцов ЭМ — 1,32–1,34 г/см<sup>3</sup>.

Образцы эмульсионной матрицы имеют допустимые содержания воды и топливной фазы (суммарно), находятся примерно на одном и том же уровне и соответствуют ТУ, что говорит о соблюдении режима приготовления.

Результаты осмотра внешнего вида образцов эмульсионной матрицы,  
определения плотности и компонентного состава

№ образца	Внешний вид/место отбора образца	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Содержание, %	
			вода	топливная фаза
1	Однородное вещество светло-кремового цвета/ЭМ из емкости на поверхностном перегрузочном пункте	1,32	17,7	6,1
2	Однородное вещество светло-кремового цвета/ЭМ из емкости на поверхностном перегрузочном пункте НК ЭВВ Расвумчоррского рудника КФ АО «Апатит»	1,32	17,6	6,1
3	Однородное вещество светло-кремового цвета/ЭМ из емкости СЗМ на заряжаемом блоке Кировского рудника КФ АО «Апатит»	1,33	17,4	6,1
4		1,34	18,4	6,0
5		1,34	15,8	6,5
6		1,34	18,6	6,2
7		1,33	18,8	6,2

### 3.4. Влияние динамических нагрузок на взрывчатые характеристики газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ

Согласно общепринятой схеме детонации ЭВВ в зарядах диаметром больше критического за фронтом проходящей ударной волны происходит разрушение оболочек микросфер или пузырьков азота. Газовые пузырьки, после разрушения микросфер или пузырьки азота при их газовой сенсбилизации, адиабатически сжимаются, и в финале стадии сжатия внутри них возникают очень высокие давления, плотности и температуры. Так они становятся «горячими точками», обеспечивая химическую реакцию и распространение детонации в заряде ВВ. Чем меньше размеры пузырьков и чем их больше в заряде, т. е. чем ниже плотность (выше пористость), тем меньше критический диаметр и выше скорость детонации [143, 153, 154].

Применение ЭВВ в подземных условиях для проходки горных выработок и очистной выемки при последовательном, с замедлением взрывании зарядов в группах оказывает существенное динамическое нагружение на еще не детонировавшие заряды ЭВВ в соседних шпурах. Напряжения на фронте волны могут достигать нескольких десятков МПа, что приводит к уменьшению размеров газовых пузырьков (при этом их термодинамические параметры не достигают уровня начала детонации) и, соответственно, к увеличению плотности заряда, что при последующем инициировании таких зарядов не обеспечивает полноту химической реакции и распространение нормальной детонации.

Это явление было подтверждено лабораторией США для тестирования взрывчатых веществ в Южном Канзасе [155]. В частности, было исследовано отрицательное влияние динамической ударной волны на ЭВВ, сенсбилизированные стеклянными микросферами и термопластиковыми микросферами Expancel®. Эксперименты проводились в бассейне с водой, в котором первоначально взрывался донорский заряд, а затем с замедлением испытуемый с измерением скорости детонации в заряде ВВ (рис. 68).

При проведении экспериментов оценивалось давление на фронте ударной волны (рис. 69).

По результатам экспериментов было установлено, что при воздействии динамических нагрузок на ЭВВ со стеклянными микросферами уменьшается

объемное их содержание в заряде в силу разрушения при воздействии динамических ударных волн, достигающих силы, способной разрушить стеклянные микросферы. При расстоянии 3,048 м между донорским зарядом и испытуемым, при давлении на фронте волны в 10 720 кПа потеря объема составляет приблизительно 78 %, и заряды не детонировали при помощи электрических детонаторов после задержки между 0,002 и 0,100 с. На меньших расстояниях потеря объема микросфер достигала 100 %, и заряды также не детонировали.

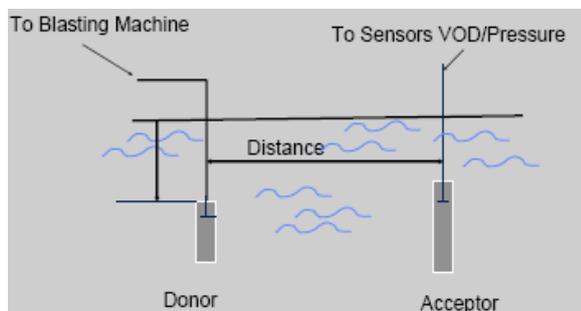


Рис. 68. Схема эксперимента по оценке влияния динамической ударной волны на ЭВВ [149]

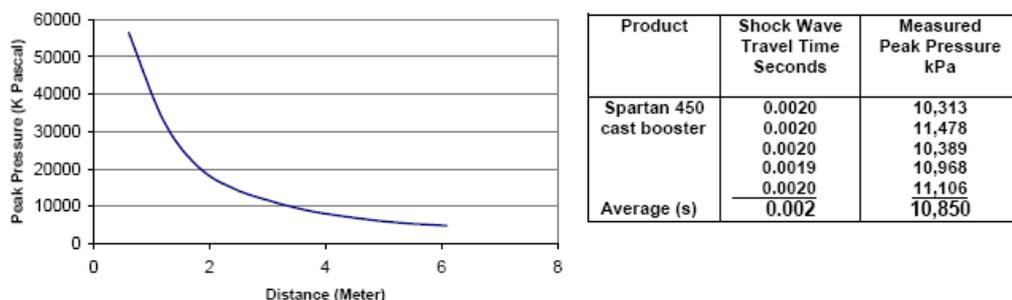


Рис. 69. Изменение давления на фронте волны в зависимости от расстояния [149]

Поэтому было рекомендовано в качестве сенсibilизаторов в ЭВВ использовать термопластиковые микросферы. При таком же расстоянии между донором и испытуемым зарядом с пластиковыми микросферами в качестве активаторов они сжимаются и восстанавливаются после приблизительно 0,004 с, после которых заряды детонируют с помощью электрических детонаторов с задержкой между 0,006 и 0,100 с. Плотность, измеренная в восстановленном заряде с пластиковыми микросферами, предварительно подверженном удару на расстоянии 3,048 м, не показала потери объема пластиковых микросфер. Пластиковые микросферы восстанавливаются после воздействия динамической ударной волны при исчезновении этого воздействия. При замедлениях меньше 0,004 с эмульсионный заряд отказывал в детонации.

Для ЭВВ с газовой сенсibilизацией таких экспериментов не производилось. В работе [156] были сделаны попытки оценить влияние воздействия упругой волны сжатия на изменение детонационных характеристик шпуровых зарядов, патронированных эмульсионных взрывчатых веществ, и показано, что воздействие упругой волны сжатия вызывает в заряде ЭВВ изменение плотности массы за счет объемной деформации сжатия и последующей разгрузки. Деформация сжатия в заряде протекает с постепенным увеличением плотности ЭВВ. В заряде ЭВВ диаметром 32 мм процесс деформирования, вызванный воздействием упругой волны, ограничен временем до 12 мс. Период нарастания деформации до максимума имеет одинаковую продолжительность во времени и уменьшается с удалением

от источника колебаний более 0,6 м. После снятия нагрузки наступает фаза, которая сопровождается постепенным восстановлением плотности ЭВВ и на различных расстояниях от источника возмущений протекает по-разному.

Поэтому выявление основных закономерностей детонации в заряде ЭВВ после сильных динамических воздействий каждого взрываемого ряда на последующие ряды скважин является весьма актуальной задачей.

Было рассмотрено, какие давления развиваются на фронте волны при ее подходе к следующему ряду скважин и шпуров.

Максимальную амплитуду радиальной составляющей волны напряжения для цилиндрического заряда при  $r \geq 12 r_z$ , можно определить по зависимости [157]:

$$\sigma_r = \rho_{п.с.п} \cdot \frac{545}{r_{пр}^{1,1}}, \text{ Па.} \quad (9)$$

Тогда для скважин диаметром 102 мм для ЭВВ «Сабтэк» при ЛНС = 2,8 м:

$$\sigma_r = \rho_{п.с.п} \cdot \frac{545}{r_{пр}^{1,1}} = 2800 \cdot 5000 \cdot 545 / (2,8 / 0,051)^{1,1} = 93000 \text{ КПа; для шпуров}$$

диаметром 43 мм для ЭВВ «Сабтэк»:  $\sigma_r = 2800 \cdot 5000 \cdot 545 / (0,7 / 0,021)^{1,1} = 161200 \text{ КПа.}$

Из расчетов следует, что на колонку заряда в скважине действует давление, равное 93000 КПа, а на колонку заряда в шпурах — 161200 КПа, что почти в два раза выше, чем на скважину.

Как следует из данных лаборатории для тестирования взрывчатых веществ в Южном Канзасе при давлении, равном 10 720 кПа, практически полностью разрушались все микросферы заряда и происходил отказ детонации. Поэтому при действующих напряжениях на колонку заряда в шпурах и скважинах возможно нарушение и газовых включений.

Изучить поведение газовых включений при динамических нагрузках в натуральных условиях является весьма сложной задачей. Поэтому нами для оценки этого явления был выбран путь измерения скорости детонации заряда после воздействия на него динамической нагрузки. Эмульсионное ВВ заряжали в стальную трубу (рис. 70). С наружной части трубы вдоль нее привязывали детонирующий шнур (ДШ) и производили детонацию шнура. После последовательных воздействий (детонации одной нитки, одновременной детонации двух и трех ниток ДШ) производили взрыв зарядов с измерением скорости детонации и оценкой их работоспособности. Для сравнения был взорван контрольный заряд без динамических воздействий.



**Рис. 70.** Общий вид установки при испытаниях динамического воздействия взрыва на заряд ЭВВ

Результаты исследований представлены в табл. 58 и на рис. 71, из которых следует, что чем больше циклов динамического воздействия на заряд, тем больше снижается скорость детонации этого заряда. Так, после трех воздействий скорость детонации составила 4460 м/с, в то время как без динамического воздействия скорость детонации заряда была 4983 м/с.

Таблица 58

Результаты испытаний влияния динамического воздействия на заряд ЭВВ

№ взрыва	1	2	3	4	5
	линейное инициирование с помощью ДШ	без динамического воздействия	динамическое воздействие на заряд ЭВВ		
			1 нитка ДШ	2 нитки ДШ	3 нитки ДШ
Масса ВВ, г	880	895	840	840	765
Плотность заряда, г/см <sup>3</sup>	1,09	1,02	0,94	0,93	0,96
Скорость детонации, м/с	6198	4983	4934	4587	4464
Относительная работоспособность	0,23	0,77	0,72	0,53	0,49



Рис. 71. Характер деформирования стальных колец при взрывании труб при различных условиях динамического нагружения

При уменьшении скорости детонации снижается и бризантное действие взрыва (см. рис. 71, табл. 58). Так, после трех воздействий относительная работоспособность составила 0,49 от БЖВ, в то время как без динамического воздействия — 0,77 от БЖВ.

Для оценки влияния взрывного воздействия непосредственно на заряд ЭВВ внутри него была проложена нитка ДШ в качестве инициатора и произведено его взрывание (взрыв № 1). Скорость детонации, замеренная по свечению фронта детонационной волны, составила 6198 м/с, что соответствует скорости детонации детонирующего шнура, но, если судить по разрушающему действию, то измерительное кольцо практически не расширилось, что говорит о низкой скорости детонации основного заряда, вызванной схлопыванием газовых пузырьков и снижением количества горячих точек.

Если при проведении испытаний в полигонных условиях не наблюдалось отказов зарядов, то при проходке выработок имели место отказы в контурных шпурах. В частности, на Оленегорском подземном руднике во время испытаний ЭВВ «Сабтэк» при проходке горных выработок отказы происходили довольно часто (рис. 72).

Такая же картина наблюдалась и на подземных рудниках ОАО «Апатит» при проходке горных выработок. В отдельных случаях фиксировались отказы приустьевых частей шпуровых зарядов. Инициирование отказавших зарядов патронированным ВВ не приводило к их детонации, что говорит о достижении критической плотности в контурных зарядах после динамических воздействий основных комплектов шпуров.

Для оценки степени динамического уплотнения газифицированных ЭВВ под действием опережающего взрыва соседнего заряда выполнено аналитическое обоснование, суть которого заключается в следующем.



**Рис. 72.** Остатки ЭВВ на стенках контурных шпуров на Оленегорском подземном руднике

Для случая осевой симметрии (скважинный или шпуровой заряд) относительная объемная деформация породы вокруг заряда ( $\varepsilon_V = \Delta V/V_0$ , ед.) определяется по формуле:

$$\varepsilon_V = \frac{R_{\text{кп}}^2 - r_0^2}{R^2 - r_0^2}, \quad (10)$$

где  $r_0$  — радиус линейного (скважинного или шпурового) заряда, м;  $R_{\text{кп}}$  — текущий радиус котловой полости, формируемой продуктами детонации линейного заряда, м;  $R$  — текущее расстояние, на которое распространяется возмущающее воздействие, м.

При этом:

$$R_{\text{кп}} = \sqrt{R_{\text{max}}^2 - \left( \sqrt{R_{\text{max}}^2 - r_0^2} - \frac{t}{a} \right)^2}, \quad (11)$$

$$R = r_0 + c_p \cdot t, \quad (12)$$

$$a = \sqrt{\frac{\gamma_{\text{п}(0)}}{g \cdot \sigma_{\text{сж}}}}, \quad (13)$$

$$R_{\text{max}} = r_0 \cdot \sqrt{\frac{\eta_{\text{кп}} \cdot \gamma_{\text{вв}} \cdot U_{\text{уд}}}{2 \cdot \sigma_{\text{сж}}}}, \quad (14)$$

$$\eta_{\text{кп}} = \frac{\gamma_0 - 1}{k - 1} \cdot \left( \frac{373}{\gamma_{\text{вв}}} \right)^k, \quad (15)$$

$$\gamma_0 = \sqrt{1 + (k^2 - 1) \cdot \left( \frac{\gamma_{\text{вв}}}{373} \right)^{k+1}}, \quad (16)$$

где  $R_{\max}$  — максимальный радиус расширения котловой полости, м;  $t$  — текущее время, с;  $\gamma_{п(0)}$  — плотность породы в начальном состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $g$  — ускорение силы тяжести, м/с<sup>2</sup>;  $c_p$  — скорость распространения упругих волн в породе, м/с;  $\sigma_{сж}$  — предел прочности породы на одноосное сжатие, кг/м<sup>2</sup>;  $\eta_{кп}$  — часть начальной энергии взрыва, затрачиваемая на расширение котловой полости, ед.;  $\gamma_{вв}$  — плотность ЭВВ после газификации, кг/м<sup>3</sup>;  $U_{уд}$  — удельная энергия ВВ ( $U_{уд} = 427 \cdot Q_t$ , где  $Q_t$  — удельная теплота взрыва, ккал/кг; 427 — механический эквивалент тепловой энергии, кгм/ккал), кгм/кг;  $\gamma_0$  — начальный показатель адиабаты расширения высокоплотных продуктов детонации, ед.;  $k$  — показатель адиабаты равновесной части продуктов детонации в рамках модели идеального газа ( $k = 1,4$ ), ед.

Напряжение в сжатом породном объеме (объемное напряжение  $\sigma_V$ , кг/м<sup>2</sup>), обусловленное перераспределением удельной упругой энергии из объема деформации в сжатый объем, определяется по формуле:

$$\sigma_V = \frac{\gamma_{п(0)}}{g} \cdot c_p^2 \cdot \frac{\varepsilon_V}{1 - \varepsilon_V}. \quad (17)$$

Соответственно, удельная потенциальная энергия сжатого породного объема ( $W_V$ , кгм/м<sup>3</sup>), определяемая в общем виде как  $A_V = 0,5 \cdot \sigma_V \cdot \varepsilon_V$ , равна:

$$W_V = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{п(0)}}{g} \cdot c_p^2 \cdot \frac{\varepsilon_V^2}{1 - \varepsilon_V}. \quad (18)$$

С другой стороны, удельная кинетическая энергия сжатого породного объема ( $E_V$ , кгм/м<sup>3</sup>) равна:

$$E_V = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{п}}{g} \cdot v_R^2 \quad (19)$$

где  $\gamma_{п}$  — плотность породы в сжатом состоянии, кг/м<sup>3</sup>;  $v_R$  — скорость смещения сжатой породы, м/с.

При этом плотность породы в сжатом состоянии определяется как:

$$\gamma_{п} = \frac{\gamma_{п(0)}}{1 - \varepsilon_V}. \quad (20)$$

Из равенства  $E_V = W_V$  получаем величину скорости смещения сжатой породы:

$$v_R = \varepsilon_V \cdot c_p. \quad (21)$$

Эмульсионное взрывчатое вещество, находящееся в зарядной полости (скважине, шпуре), как и любая масса, обладает инерционностью. Поэтому

смещение зарядной полости со скоростью  $u_R$  может рассматриваться как смещение (в противоположную сторону) эмульсионного взрывчатого вещества с той же скоростью  $u_R$  относительно неподвижной зарядной полости. При этом удельная кинетическая энергия эмульсии ( $e_{V(\text{эм})}$ , кгм/м<sup>3</sup>), обусловленная скоростным напором, составляет:

$$e_{V(\text{эм})} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{\text{эм}}}{g} \cdot u_R^2, \quad (22)$$

где  $\gamma_{\text{эм}}$  — плотность не газифицированной эмульсии, кг/м<sup>3</sup>.

Общий объем газовых микропузырьков в начальном, динамически не нагруженном состоянии ( $V_{r(0)}$ , м<sup>3</sup>) составляет:

$$V_{r(0)} = V_2 - V_0, \quad (23)$$

где  $V_0$  — объем заряда до начала газификации, м<sup>3</sup>;  $V_2$  — объем заряда после полной газификации, м<sup>3</sup>.

Удельная работа сжатия газовых микропузырьков ( $e_{V(r)} = -A_r/V_r$ , кгм/м<sup>3</sup>) под действием скоростного напора эмульсии равна:

$$e_{V(r)} = \frac{P_{r(0)}}{k-1} \cdot \left[ \left( \frac{V_{r(0)}}{V_r} \right)^k - \frac{V_{r(0)}}{V_r} \right], \quad (24)$$

где  $P_{r(0)}$  — начальное давление в газовых микропузырьках, кг/м<sup>2</sup>;  $V_r$  — общий объем сжатых газовых микропузырьков, м<sup>3</sup>.

Из условия равенства левых частей формул (22) и (24) получаем уравнение для определения степени сжатия газовых микропузырьков ( $V_{r(0)}/V_r$ , ед.):

$$\left( \frac{V_{r(0)}}{V_r} \right)^k - \frac{V_{r(0)}}{V_r} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_{\text{эм}}}{g} \cdot u_R^2 \cdot \frac{k-1}{P_{r(0)}}. \quad (25)$$

Соответственно, плотность динамически сжатого газифицированного ЭЭВ определяется равной:

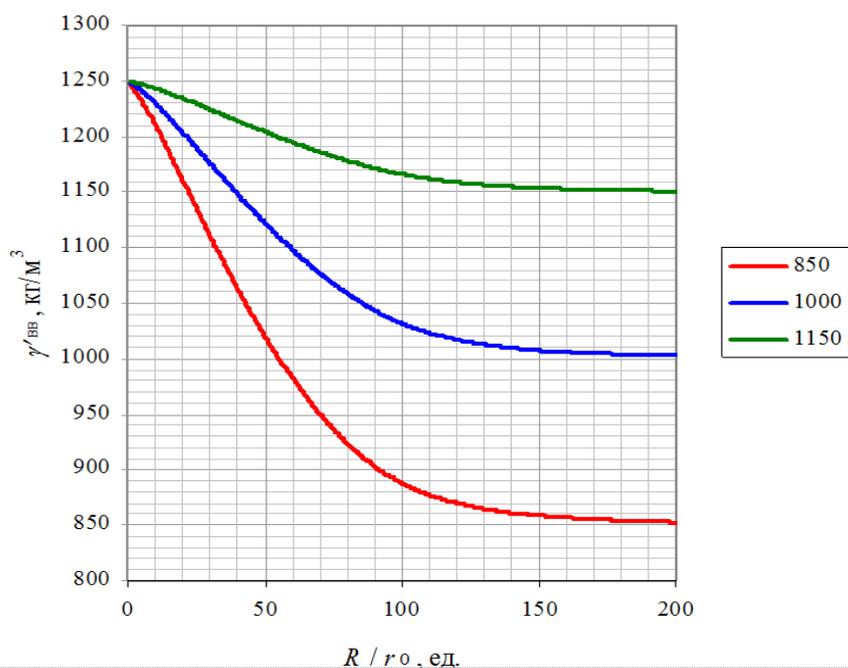
$$\gamma'_{\text{вв}} = \gamma_{\text{вв}} \cdot \frac{V_2}{(V_2 - V_0) \cdot \frac{V_r}{V_{r(0)}} + V_0}. \quad (26)$$

В качестве иллюстрации на рис. 73 приведены графики изменения степени сжатия газовых микропузырьков и плотности заряда в зависимости от приведенного расстояния при разной плотности заряда (850, 1000 и 1150 кг/м<sup>3</sup>) после полной газификации.

Начальные условия: эмульсионное взрывчатое вещество — «Сабтэк Вэлкро» с начальной плотностью эмульсии  $\gamma_{эм} = 1250 \text{ кг/м}^3$ ;  $Q_T = 855 \text{ ккал/кг}$ ; порода — рихсчоррит:  $\gamma_{п(0)} = 2740 \text{ кг/м}^3$ ,  $c_p = 5300 \text{ м/с}$ ,  $\sigma_{сж} = 10,2 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^2$ ; при  $0 \leq t \leq t_{\max}$  значение  $R_{кп}$  рассчитывалось по формуле (11), при  $t > t_{\max}$  принималось условие  $R_{кп} = R_{\max}$ .

Как видим, достаточно близкое размещение зарядов, взрывааемых короткозамедленно или замедленно, приводит к их уплотнению. Степень уплотнения зависит от расстояния между активным и пассивным зарядами.

Вместе с тем известно, что газифицированные ЭВВ обладают такой особенностью как немонотонность зависимости скорости детонации от плотности заряда [153, 154, 158]. Исходя из этого, зарядание скважин или шпуров, как правило, производится таким образом, чтобы конечная плотность полностью газифицированного заряда соответствовала плотности, при которой обеспечивается максимальная скорость детонации. Максимум скорости детонации ассоциируется с максимальной эффективностью взрыва скважинного или шпурового заряда. Однако если действие опережающей динамической нагрузки от взрыва скважинного или шпурового заряда предыдущей ступени взрывания приводит к увеличению плотности заряда последующей ступени замедления, то скорость его детонации может не соответствовать своему максимальному значению.



**Рис. 73.** Графики изменения плотности заряда при динамическом воздействии в зависимости от приведенного расстояния

Динамические воздействия на заряды ЭВВ газовой сенсibilизации приводят к снижению скорости детонации, а в отдельных случаях и к их отказам за счет снижения количества горячих точек в заряде ВВ, что косвенно отражает увеличение плотности в заряде ЭВВ при динамических

воздействиях. Наиболее существенное влияние динамические нагрузки оказывают на расстояниях до 100 радиусов заряда.

В процессе заряжания скважин или шпуров целесообразно несколько уменьшать конечную плотность заряда с тем, чтобы после динамического уплотнения плотность пассивного заряда была бы близка к плотности, при которой достигается максимальная скорость детонации такого заряда. Степень снижения начальной плотности зарядов определяется условиями и особенностями их размещения и обеспечивается регулировкой подачи газогенерирующей добавки [159].

### **3.5. Исследование и оптимизация процесса заряжания вертикальных скважин эмульсионным взрывчатым веществом «Сабтэк»**

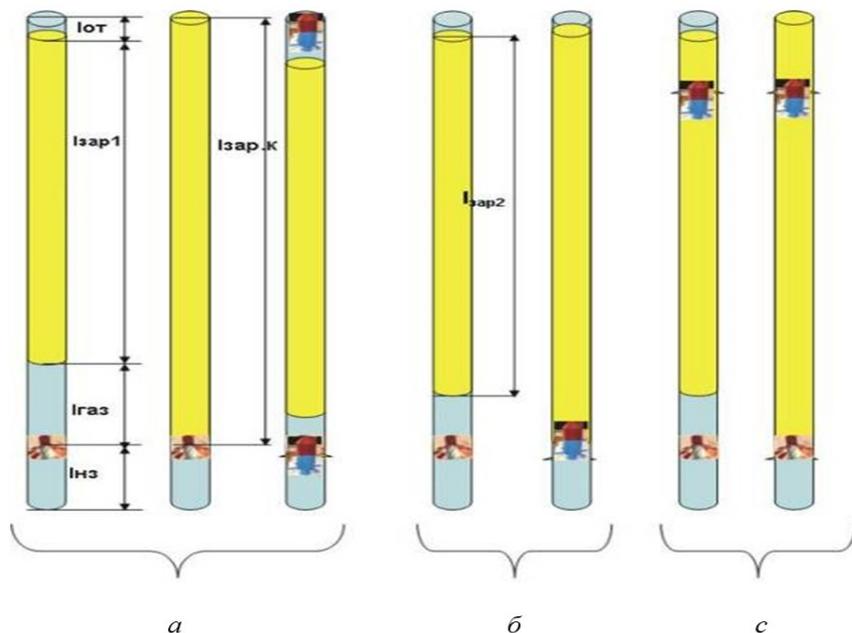
При использовании существующих зарядных машин, после установки боевика в торце скважины и перед началом заряжания происходит автоматическое отодвигание зарядного шланга от боевика на 1,3–1,7 м. На рисунке 74а слева схематически показано отодвигание шланга «лот». В связи с тем, что удлинение колонки заряда происходит только в нижней части заряда «lгаз», а в верхней части происходит ее оседание (что объясняется действием сил тяжести в колонке заряда), то возможно, что при установке боевика в торец скважины, колонка заряда «lзар1» может опуститься ниже боевика и не произойдет ее инициирование, а в условиях прямого инициирования при неполной газификации колонка заряда может и не дойти до боевика, что также приведет к отказу (рис. 74а справа).

Случаи отказа взрыва скважинного заряда имели место при проведении экспериментальных работ. Для устранения этого недостатка рекомендуется при заряжании скважин увеличивать расчетную колонку заряда «lзар2» (для рассматриваемых условий) на 1 м (рис. 74б), что достигается корректировкой величины недозаряда «lnз» в бортовом компьютере зарядной машины. Запирающий парашют нужно устанавливать на первоначальную величину недозаряда, определяемую из условий качественной проработки предконтурной части массива вблизи буровой выработки и исключения подбоя последующих вееров. Это позволит колонке заряда в более короткое время достичь запирающего парашюта, что замедлит ее опускание, а тормозящее действие парашюта приведет к удлинению колонки в верхней части заряда.

При прямом иницировании ЭВВ вследствие протяженности периода газификации установка боевиков и взрывание производятся не менее чем через 1,5 ч после заряжания. Причем установка боевиков производится вручную в непосредственной близости от обрушения, что опасно для взрывника. Поэтому более предпочтительным является обратное инициирование, что дает возможность производить механизированную досылку боевика в скважину. Но, как указывалось выше, при расположении боевика в торце скважины в отдельных случаях возможно опускание колонки заряда, что приведет к отказам при взрывании. Поэтому было рекомендовано производить двухэтапное заряжание. Первоначально в торце скважины формируется колонка заряда длиной 2–3 м, затем в нижнюю часть сформированной колонки досылается боевик и заряжается оставшаяся часть скважины (рис. 74с).

Эксперименты по замеру скорости детонации производились как при расположении боевика непосредственно в торце скважины, так и при двухэтапном заряжании. В обоих случаях произошла полная детонация

по длине колонки заряда, но в случае расположения боевика непосредственно в колонке заряда (3 м от торца) скорость детонации составляет 5780 м/с, что на 100 м/с выше, чем при его расположении в торце скважины. Данное положение подтверждено и при проведении последующих экспериментов.



**Рис. 74.** Формирование колонки заряда во времени при прохождении газификации при наличии двух открытых поверхностей

Таким образом, при отработанных параметрах заряжания обеспечивается формирование полноценной колонки заряда, надежное инициирование при использовании обратного инициирования и более полное протекание процесса детонации по всей длине колонки заряда. При этом обеспечивается полностью механизированная доставка боевика в скважину [160].

### 3.6. Экспериментальное определение оптимальных параметров буровзрывных работ для различных разновидностей руд Хибинского массива

Расчет параметров БВР для ЭВВ «Сабтэк» выполнялся по методике Горного института КНЦ РАН [161]. В таблице 59 приведены расчетные значения величины ЛНС для различных разновидностей руд хибинского массива для условий использования скважин диаметром 89 и 102 мм.

Для определения возможности их применения на нижележащих горизонтах были выполнены эксперименты по оценке пробивного расстояния при взрыве скважин диаметром 102 мм (рис. 75).

Скважины бурились под углом к буровой выработке, чтобы обеспечить переменную величину ЛНС, которая изменялась от 1,4 до 3,4–4,6 м. Длина скважин составила 36 м. При заряжании температура эмульсионной матрицы составила +27,5 °С. После процесса газификации произошло увеличение длины заряда на 2 м. Измерение скорости детонации производилось в скважине № 2. Скорость детонации заряда — 5742,4 м/с (рис. 76).

Таблица 59

Расчетные значения величины ЛНС для различных типов руд для ЭВВ «Сабтэк» для скважин диаметром 89 и 102 мм

Характеристика руд	Группы пород	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Коэфф. Пуассона	Модуль Юнга, МПа	Пределы прочности, МПа		Коэффициент динамичности		Величина ЛНС для ЭВВ «Сабтэк», м	
					на сжатие	на растяжение	на сжатие	на растяжение	d 89 мм	d 102 мм
<i>Богатые апатит-нефелиновые руды:</i> пятнистые, пятнисто-полосчатые, сфено-апатитовые, богатая брекчия (содержание апатита — >16 %)	А	2970	0,28	2400	120	6,4	1,5	2,43	<b>2,3</b>	<b>2,6</b>
<i>Апатит-нефелиновые руды:</i> линзовидно-полосчатые, полосчатые, блоковые (содержание апатита — 10–16 %)	В	2900	0,25	62500	140	7,0	1,5	2,14	<b>2,5</b>	<b>2,9</b>
<i>Руды бедной зоны:</i> линзовидно-полосчатые, сетчатая, апатитовая, брекчия, уртит с апатитом, ийолит с апатитом (содержание апатита — <10 %)	С	2750	0,21	64000	160	7,5	1,5	2,10	<b>2,5</b>	<b>2,85</b>
<b>Средние значения ЛНС</b>									<b>2,4</b>	<b>2,8</b>

План 1 БДГ +280м

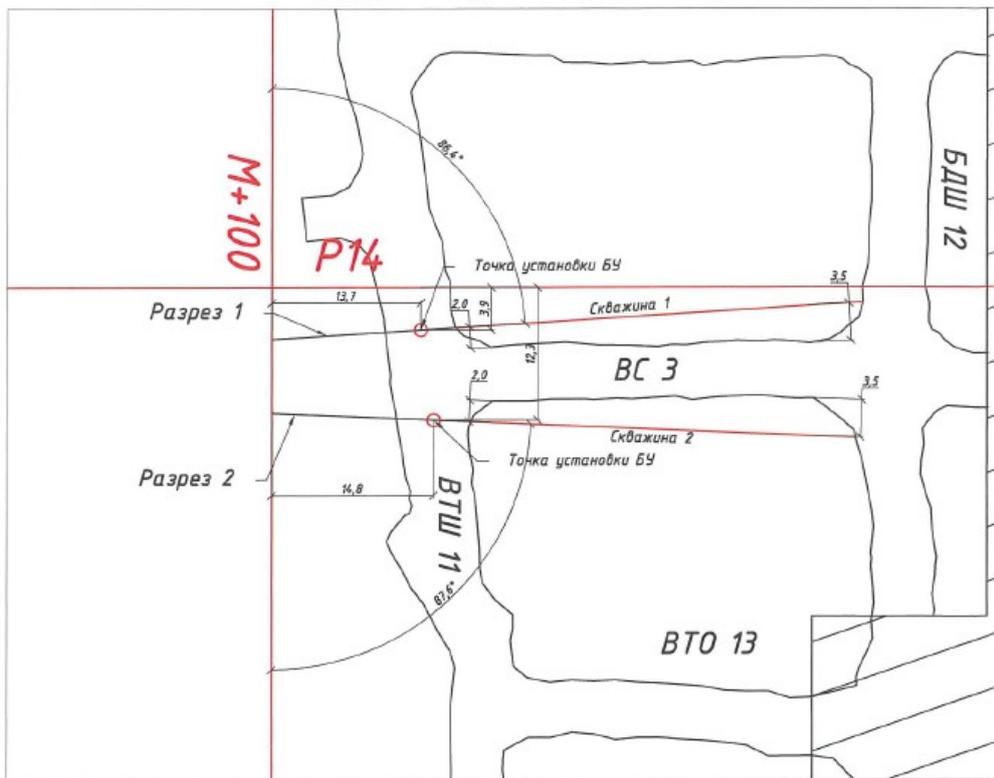


Рис. 75. Проект расположения скважин для оценки пробивного расстояния при взрыве скважины диаметром 102 мм

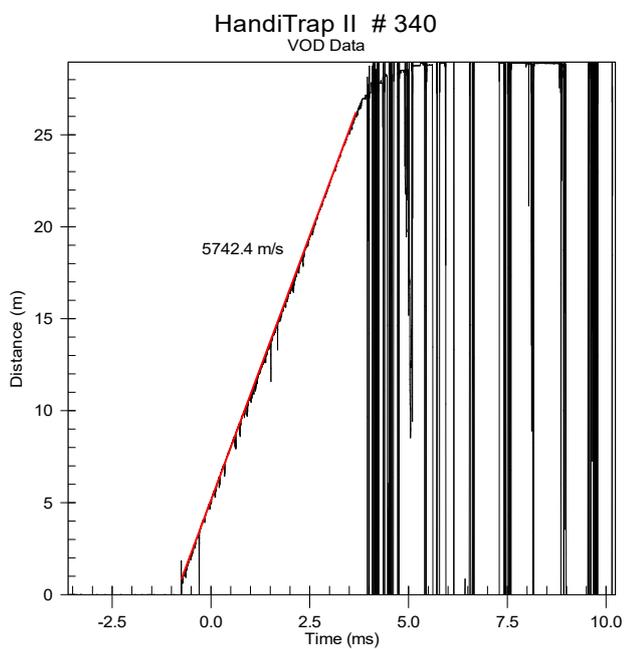
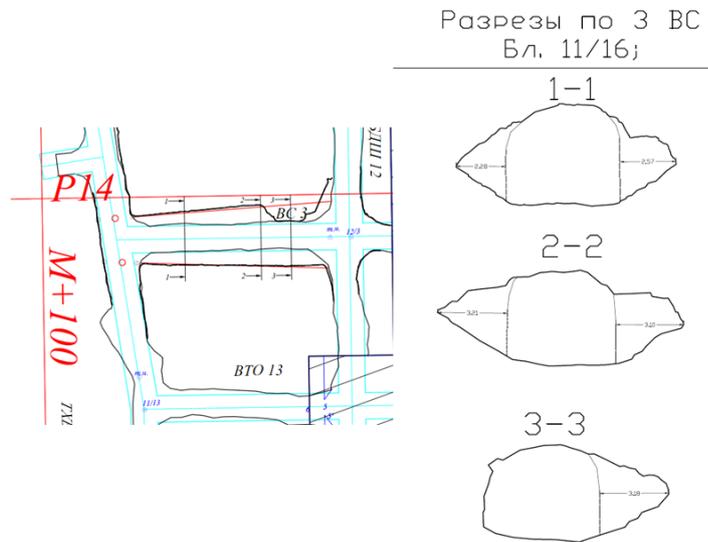


Рис. 76. Запись скорости детонации в скважине № 2

Конечные результаты по оценке пробивного расстояния заряда ЭВВ представлены на рис. 77.



**Рис. 77.** Пробивное расстояние и формирование воронки выброса по длине заряда

Максимальное пробивное расстояние для обеих скважин составило 3,2 м, что говорит о хорошей работоспособности зарядов ЭВВ. Но следует отметить, что в диапазоне расстояний 2,8–3,2 м степень дробления была несколько хуже, чем при ЛНС меньше 2,8 м с преобладанием крупнокусковых фракций размером более 0,5 м. На основании этого для скважин диаметром 102 мм была рекомендована величина ЛНС равная 2,8 м, что соответствует расчетным значениям.

В процессе работы, несмотря на использование рекомендованных параметров заряжения и взрывания, в отдельных случаях не обеспечивалось качественное дробление горной массы.

Проведенный аудит паспортов БВР на рудниках показал, что во всех рассмотренных проектах фактические длины скважин и массы зарядов в скважинах не соответствовали проектным значениям. Также в большинстве случаев не выдерживались необходимые величины недозарядов в веерах, что не позволяло обеспечить качественное дробление горной массы и приводило к запрессовке отбитой руды и не полноценному ее выпуску.

Основным условием успешного применения системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды для обеспечения высоких показателей извлечения руды является расположение буро-доставочных выработок в блоке строго в шахматном порядке и равномерное дробление руды в плоскости отбиваемого слоя. Отступление от шахматной схемы даже на незначительную величину и преобладание в отбитой горной массе негабаритных фракций ведет к повышению потерь и разубоживания руды, а, следовательно, — к снижению эффективности системы в целом.

Проведенные ранее исследования [162] показали, что по условиям повреждения скважин при взрывном воздействии, отклонений при бурении и по условиям заряжения их глубина должна быть не более 20–25 м, что и определяет

верхнюю границу контура отбойки. Исходя из этих положений, было необходимо уменьшить высоту гребней максимум до половины высоты подэтажа, что требовало расположения крайних скважин в веере под углом  $55-60^\circ$  (рис. 78), несмотря на то, что истечение руды происходит под углом  $70-75^\circ$ .

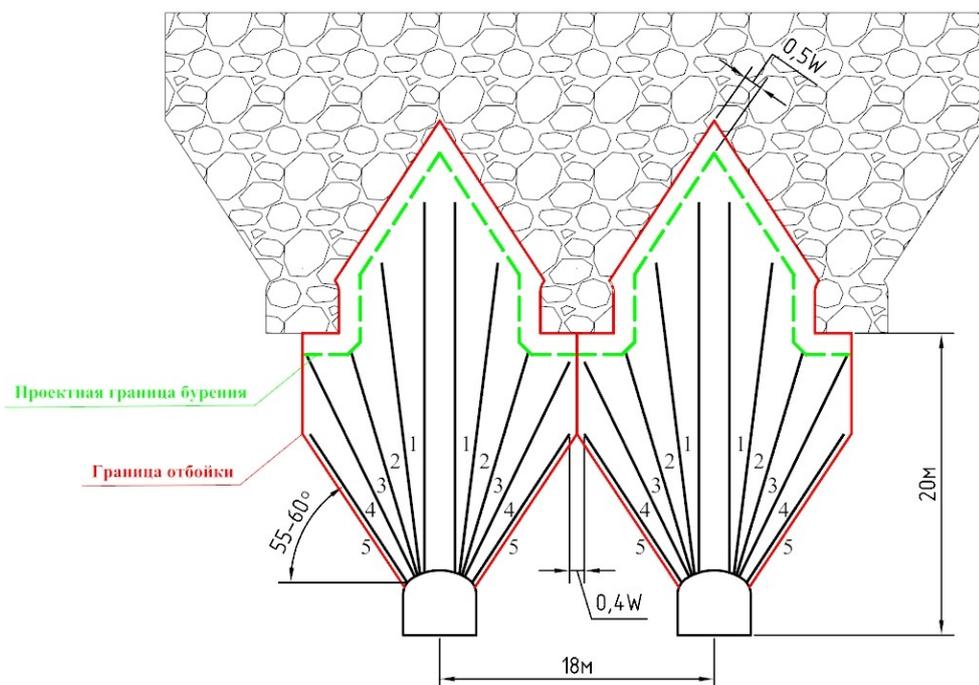


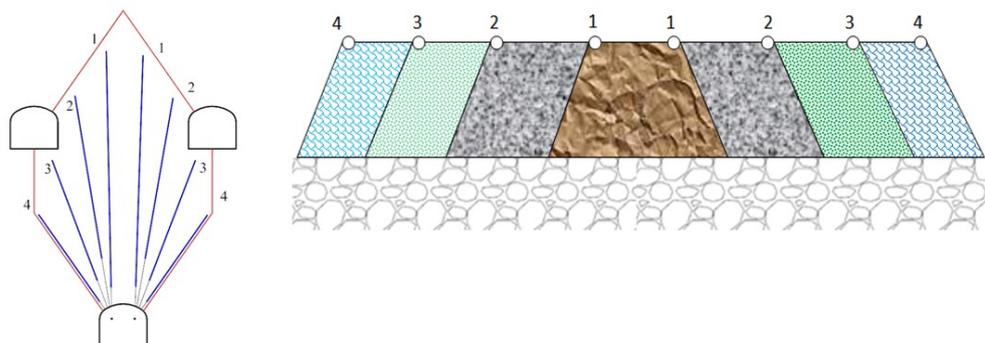
Рис. 78. Рекомендуемая схема обуривания массива

### 3.7. Обоснование оптимального интервала замедления между скважинами при их разновременном взрывании в ряду

Применение рекомендованных схем обуривания (рис. 78) требует особого подхода к выбору схем взрывания. В основном на руднике применяется одновременное взрывание всех скважин в веере или с замедлениями между группами скважин от 50 мс и более. Если использовать одновременное взрывание скважин в веере, то, кроме увеличенного сейсмического действия на скважины последующего веера, с каждым взрывом на зажатую среду происходит переуплотнение руды при взрывании крайних скважин, и при определенных расстояниях от границы отбойки взрывание будет происходить в условиях камуфлета [163, 164].

Поэтому в данных условиях необходимо производить разновременное взрывание при оптимальном интервале замедления между группами скважин в веере. Наиболее предпочтительной является следующая последовательность взрывания скважин в веере (рис. 79): две центральные скважины (1–1) необходимо взрывать на одно замедление для создания врубовой полости; остальные скважины в веере необходимо взрывать разновременно по отношению к врубовым и предыдущим скважинам, но одновременно друг с другом (2–2); (3–3); (4–4). Такая последовательность позволит улучшить качество дробления из-за взрыва на две свободные поверхности

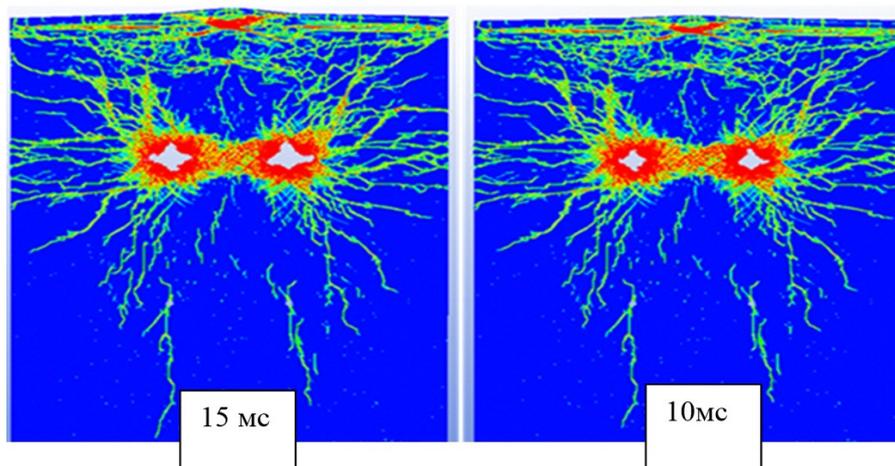
(на поверхность, созданную врубом, и поверхность по ЛНС), благодаря чему снизится вероятность пробоя между скважинами по сравнению с одновременным взрыванием.



**Рис. 79.** Схема обуривания массива и очередность взрывания скважин в веере при разновременном взрывании групп скважин

По определению оптимального интервала замедления между скважинами при их разновременном взрывании в ряду до настоящего времени единого мнения нет [165–168]. Для оценки этого взаимодействия было выполнено моделирование разрушения от двух скважинных зарядов на объемной модели в программном продукте Ansys Autodyn [169] при различных интервалах замедления и было показано, что по условиям максимального эффективного взаимодействия полей напряжений и степени дробления массива между зарядами приходится на интервал замедления в 15 мс [170]. Это объясняется тем, что ударная волна последующего заряда оказывает дополнительное воздействие на зону трещинообразования от предыдущего заряда и обеспечиваются условия многократного воздействия на зону трещинообразования. Дальнейшее увеличение интервала замедления не приводит к интенсификации дробления.

При моделировании взрыва на свободную поверхность выявлено, что вспучивание свободной поверхности при одновременном взрыве двух врубовых скважин начинается через 10–15 мс после начала инициирования, и в это время создаются благоприятные условия для взрыва следующей серии зарядов. Таким образом, с точки зрения дробления наиболее оптимальным является интервал замедления между группами скважин в 15 мс (рис. 80).



**Рис. 80.** Развитие трещин и вспучивание свободной поверхности при одновременном взрыве двух зарядов через 10 и 15 мс после инициирования

Данные интервалы замедлений рекомендованы для одновременного взрывания скважин в веерах для системы разработки с поэтажным обрушением и торцевым выпуском руды на подземных рудниках КФ АО «Апатит» [171].

### 3.8. Экспериментальная оценка оптимального интервала замедления при одновременном взрывании скважин в веере

Для инициирования скважинных зарядов на подземных рудниках КФ АО «Апатит» применялась неэлектрическая система инициирования (НСИ) «Эксел» [172]. Минимальный интервал замедления этих устройств составляет 25 мс. В последующих ступенях: LP 100–600 интервал замедления между ступенями составляет 50 мс; LP 600–1200 — 100 мс; LP 1200–2000 — 200 мс. Обеспечить рекомендуемый интервал замедления (п. 3.2.7) не представляется возможным. Поэтому при испытаниях были использованы электронные инициирующие устройства «Искра-Т», специально изготовленные НПО «Искра» по заявке КФ АО «Апатит». Произведена оценка точности их срабатывания и показано, что отклонение по сравнению с заявленными значениями 1,0 мс практически соблюдается. Была выполнена оценка эффективности применения электронных инициирующих устройств «Искра-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов с выдачей рекомендаций по интервалам замедлений при торцевой отбойке.

Для выявления влияния интервала замедления между скважинами в веере на степень дробления и времени срабатывания устройств «Искра-Т» были проведены эксперименты со следующими замедлениями — 10, 15 и 20 мс как наиболее приемлемыми с точки зрения дробления массива. В экспериментах оценивалось сейсмическое действие и качество отбойки по результатам выпуска руды.

#### *Взрывание с интервалом замедления между группами скважин 10 мс*

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 81.



**Рис. 81.** Сейсмограмма колебаний при взрывании веера с интервалом замедления между группами скважин 10 мс

Из сейсмограммы следует, что все скважины в веере взрывались с интервалом 9–13 мс, что практически соответствует заявленным значениям, но нет четкого разделения ступеней, а их совместное взаимодействие приводит

к увеличению сейсмического воздействия на горные выработки. По результатам выпуска следует отметить хорошее дробление. Выход негабарита составил менее 10 шт. на весь объем выпуска (рис. 82).



Рис. 82. Фракционный состав горной массы после выпуска 805 т руды

***Взрывание вееров с интервалом замедления между скважинами 15 мс***

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 83.

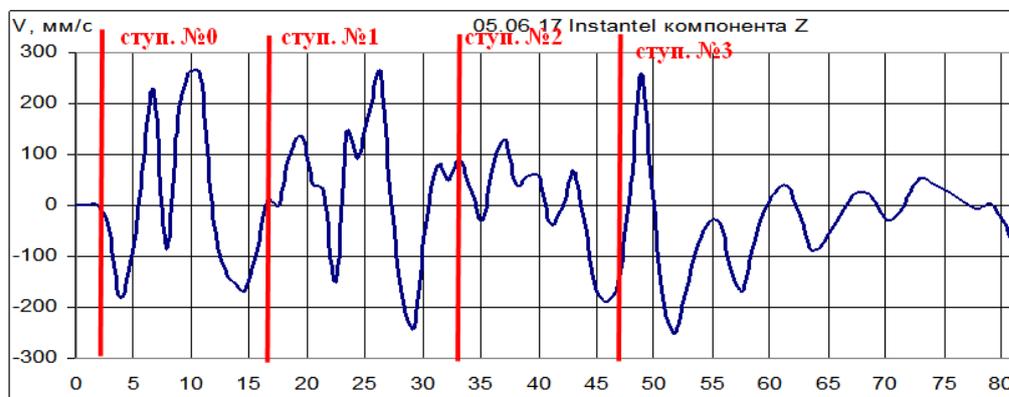


Рис. 83. Сейсмограмма колебаний и времена срабатывания ступеней при взрыве 5 веера с замедлением между скважинами 15 мс

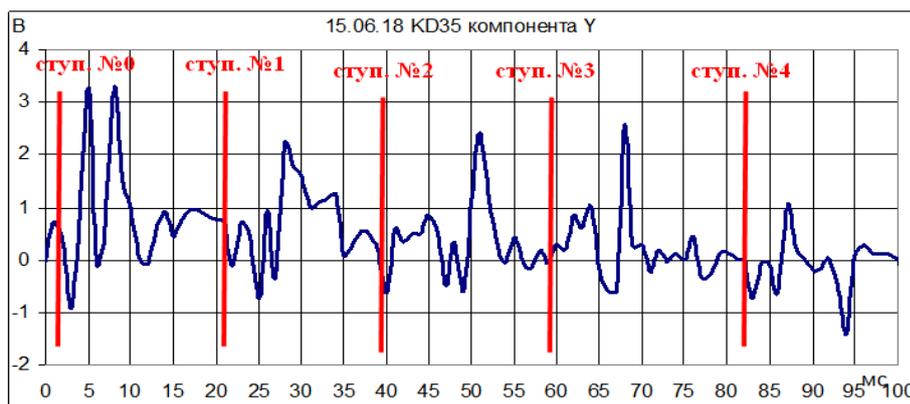
Из сейсмограммы следует, что все скважины в веере взрывались с интервалом 15–16 мс, что практически соответствует заявленным значениям. Также можно видеть, что нет четкого разделения ступеней. За время введения очистной добычи по данному буровому выход негабаритов был минимальным — не более 10 шт. (рис. 84).



**Рис. 84.** Фракционный состав горной массы после выпуска 2679 т руды

***Взрывание вееров с интервалом замедления между скважинами 20 мс***

Сейсмограмма колебаний и время замедления между скважинами в веере представлены на рис. 85.



**Рис. 85.** Сейсмограмма колебаний и времена срабатывания ступеней при взрыве 5 веера с замедлением между скважинами 20 мс

Из сейсмограммы следует, что все скважины в веере взрывались с интервалом от 18–24 мс, что также практически соответствует заявленным значениям. Также можно видеть четкое разделение ступеней по сравнению с замедлениями 10 и 15 мс.

Объем выпуска руды составил 3199 т. Во время ведения очистной добычи выходы негабаритов были зафиксированы в количестве 7 шт. (рис. 86).

Теоретически обоснованный в работе [170] оптимальный интервал замедления одновременного взрывания скважин в веере для максимальных разрушений массива горных пород приходится на задержку взрывания между скважинами в 15 мс. При моделировании взрыва на свободную поверхность выявлено, что вспучивание свободной поверхности начинается через 10–15 мс после начала инициирования, и в это время создаются благоприятные условия для взрыва следующей серии зарядов. Таким образом, с точки зрения дробления наиболее оптимальным является интервал замедления между скважинами в 15 мс.



**Рис. 86.** Фракционный состав после выпуска 2861 т руды

При оценке эффективности применения электронных инициирующих устройств «Искра-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов в подземных условиях Расвумчоррского рудника КФ АО «Апатит» установлено, что при интервалах замедлений 10 и 15 мс нет четкого разделения ступеней и имеет место интерференция волн сжатия последовательно взрываемых зарядов, а их совместное взаимодействие приводит к незначительному увеличению сейсмического воздействия на горные выработки. При интервале замедления в 20 мс получено четкое разделение ступеней по сравнению с замедлениями 10 и 15 мс при минимальном выходе негабарита.

Таким образом, с целью снижения сейсмического действия на горные выработки, прилегающие к плоскости отбойки, и улучшения степени дробления оптимальным является интервал замедления между скважинами 20 мс.

Применительно к подземным рудникам КФ АО «Апатит» была разработана технология взрывных работ для системы разработки с подэтажным обрушением и торцевым выпуском руды, основанная на выборе параметров системы разработки по условиям выпуска руды; параметров буровзрывных работ исходя из фактических значений энергетических характеристик ЭВВ «Сабтэк»; оптимальной глубины скважин по условиям бурения, нарушения и потерь скважин после взрывных работ; схем обруивания массива с одновременным взрыванием скважин в веерах при оптимальных интервалах замедления между ними, что позволило обеспечить более качественное дробление массива горных пород и существенно снизить потери и разубоживание отбитой руды [173].

Особое внимание необходимо обратить на выбор недозаряда с целью обеспечения полноценного дробления, подвижки отбитой руды и пробоя потолочины: для центральных скважин величина недозаряда должна составлять не более 2 м, для крайних скважин — 1 м, для остальных скважин — не более 3-х ЛНС.

Таким образом, разработана технология взрывной отбойки для подземных рудников КФ АО «Апатит», заключающаяся в выявлении оптимальных температурных режимов и параметров заряжания скважин ЭВВ, экспериментального определения оптимальных параметров БВР, схем обруивания и взрывания массива горных пород, что позволило улучшить качество дробления и обеспечить снижение сейсмического действия на охраняемые объекты.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Внедрение новых и совершенствование взрывных технологий обеспечивает экономический эффект горнодобывающим предприятиям и снижает техногенную нагрузку на окружающую среду. Во взрывном деле востребованы разработки, повышающие безопасность проведения взрывных работ при максимальном их качестве.

Важнейшая составляющая процесса взрывных работ — взрывчатое вещество, именно его качественные характеристики определяют исход процесса. При этом важно соответствие параметров буровзрывных работ геологическим характеристикам разрабатываемого массива; обеспечение заряжания в соответствии с расчетами конкретного места применения ВВ.

Состав промышленных взрывчатых веществ за последнее столетие принципиально не изменился — окислитель и горючее. Пока нового ничего не придумано. Взрывчатые составы за период промышленного применения прошли путь от динамита и тротила до простейших аммиачно-селитренных. Более дешевого окислителя, чем аммиачная селитра, пока нет. За прошедшее время менялись только формы применения аммиачной селитры: от порошка к пористым гранулам и в жидком виде в водосодержащих ВВ, а теперь в виде эмульсионной матрицы в эмульсионных составах.

Вынужденный переход к изготовлению ВВ на местах применения позволил горнодобывающим предприятиям страны преодолеть не только экономические проблемы, а также повысить технологическую безопасность их изготовления и применения.

Переход на использование ВВ местного изготовления стимулировал развитие исследований по изучению свойств создаваемых ВВ в условиях окружающего массива и технологии ведения взрывных работ. Учет физико-механических свойств разрушаемого массива и технологии ведения взрывных работ требуют конкретных взрывчатых веществ.

Поэтому так важно при выборе ВВ из существующего ассортимента точно знать их взрывчатые характеристики. Расчетные методы оценки все приближенные, точного результата не дают. В монографии (работе) изложены основные подходы к таким оценкам, знание которых позволит оптимально решить проблемы выбора взрывчатых веществ для достижения более высокой эффективности с минимизацией неблагоприятных последствий их применения.

В монографии представлена история, современное состояние и перспективы применения промышленных ВВ на подземных рудниках хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд (АО «Апатит»), начиная от тротилсодержащих зерногранулитов до современных эмульсионных составов. Описаны методы исследований основных характеристик ВВ, рассмотрены физико-химические взрывчатые свойства в зависимости от различных факторов. Приведены эксплуатационные и детонационные характеристики ВВ. Рассмотрены вопросы безопасности и эффективности их изготовления и применения.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Горная энциклопедия [Электронный ресурс]. URL: <http://www.mining-enc.ru/> (дата обращения: 26.10.2023).
2. Самин Д. К. 100 великих ученых. М.: Вече, 2000. 592 с.
3. Из истории отечественной пороховой промышленности: Краткие биографические очерки; под ред. Л. В. Забелина. М.: ЦНИИИТИКПК, 1998. 120 с.
4. Клименко Г. К. Страницы из истории пороховой промышленности. М.: ЦНИИИТИКПК, 1980. 76 с.
5. Снеткова Е. А. История развития взрывчатых веществ // Инновационные научные исследования [Электронный ресурс]. 2021. 2–1(4). С. 6–22. URL: <https://ip-journal.ru/> (дата обращения: 26.10.2023).
6. Викторов С. Д. Разработка и применение простейших взрывчатых веществ. М.: ИПКОН РАН, 1996. 156 с.
7. Светлов Б. Я., Яременко Н. Е. Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ. М.: Недра, 1966. 330 с.
8. Юбилей Д. И. Менделеева: Материалы расширенного заседания Президиума Санкт-Петербургского научного центра РАН; под ред. В. В. Окрепилова. СПб.: Наука, 2009. 208 с.
9. Панфилов С. Ю. История создания, состояние, проблемы и перспективы развития производства и применения взрывчатых материалов в Российской Федерации // Горно-информационный аналитический бюллетень. 2011. № S10. С. 42–56.
10. Дубнов Л. В., Бахаревиц Н. С., Романов А. И. Промышленные взрывчатые вещества. М.: Недра, 1988. 358 с.
11. Чернышев А. К., Левин Б. В., Туголуков А. В., Огарков А. А., Ильин В. А. Аммиачная селитра: свойства, производство, применение. М.: ЗАО «Инфохим», 2009. 504 с.
12. Михайлов Ю. М., Колганов Е. В., Соснин В. А. Безопасность аммиачной селитры и ее применение в промышленных взрывчатых веществах. Дзержинск, ООО «Партнер-плюс», 2008. 304 с.
13. Курузов Б. Н. Современные тенденции в теории, технике и технологии взрывного разрушения пород: мат-лы междунар. конф. «Взрывное дело – 99»; МГГУ. М.: Издательство МГГУ, 1999. С. 21–24.
14. Горные науки. Освоение и сохранение недр Земли / под ред. акад. К. Н. Трубецкого. М.: АГН, 1997. 478 с.
15. Мельников Н. В., Симкин Б. А., Демидюк Г. П. Новые средства бурения и взрывания на открытых разработках. М.: Госгортехиздат, 1960. 192 с.
16. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. М.: Недра, 1977. 253 с.
17. Светлов Б. Я., Солнцева Р. Н. О химической стабильности алюминия в составе промышленных взрывчатых веществ // Взрывное дело. 1953. № 52/9. С. 67–80.
18. Апин А. Я. Роль наполнителей при детонации взрывчатых веществ и порохов // Физика взрыва. 1953. № 2. С. 150–166.
19. Кук М. А. Наука о промышленных взрывчатых веществах. М.: Недра, 1980. 453 с.
20. Демидюк Г. П. Теоретические предпосылки совершенствования взрывных работ на основе механизированного применения взрывчатых веществ с широким диапазоном регулирования объемной концентрации энергии // Теория и опыт механизированного применения простейших взрывчатых веществ. М.: Ротапринт Сектора физико-технических горных проблем ИФЗ АН СССР, 1972. С. 3–16.

21. Викторов С. Д., Демидюк Г. П. Простейшие взрывчатые вещества // Вестник Академии наук СССР. 1985. № 4. С. 102–111.
22. Потапов А. И., Клейн А. И. Опытное-промышленное испытание ифзанитов на Михайловском горно-обогатительном комбинате // Горный журнал. 1975. № 11. С. 47–49.
23. Закалинский В. М. Применение ифзанита в обводненных скважинах на карьерах // Взрывное дело. 1978. № 80/37. С. 135–140.
24. Павлютенков В. М., Шеменев В. Г., Шпилевских П. В., Субботин В. Я. Внедрение структурированных водосодержащих взрывчатых веществ на карьерах Качканарского ГОКа и разработка руд черных металлов // Свердловск: ИГД УрО АН СССР, 1989. С. 77–83.
25. Моторин А. С., Шеменев В. Г., Сеницын В. А., Завгороднев В. И., Лебедев С. М., Субботин В. Я. Технология и средства механизации для приготовления гелеобразных водосодержащих ВВ и заряжания ими взрывных скважин // Горный журнал. 1993. № 9–10. С. 26–27.
26. Маточкин В. А., Шпилевских П. В., Субботин В. Я., Павлютенков В. М., Шеменев В. Г. Опыт применения водонаполненных ВВ на карьерах комбината // Горный журнал. 1988. № 9. С. 19–20.
27. Кошарнов М. Ф., Звонов А. А., Зонтович Ю. К. Водосодержащие взрывчатые вещества с поверхностно-активным загустителем // Теоретические основы разработки водосодержащих ВВ и опыт механизированного применения их в народном хозяйстве. М.: Ротапринт СФТПП АН СССР, 1974. С. 77–80.
28. Кошарнов М. Ф., Звонов А. А., Зонтович Ю. К. Разработка и исследование свойств холодных водосодержащих ВВ // Взрывное дело. 1974. № 74/31. С. 46–50.
29. Ханукаев А. И. Состояние и перспективы применения водонаполненных ВВ, изготавливаемых на местах потребления. Обзорная информация. М.: Минчермет СССР, 1980. Вып. 4. 34 с.
30. Ханукаев А. Н. Перспективы применения горячельющихся ВВ на открытых и подземных работах // Теория и опыт механизированного применения простейших взрывчатых веществ. М.: Ротапринт Сектора физико-технических горных проблем ИФЗ АН СССР, 1972. С. 27–36.
31. Ханукаев А. Н., Арбиев К. К. Опыт, теория и перспективы применения горячих водонаполненных ВВ (ГЛВВВ) на открытых работах // Теоретические основы разработки водосодержащих ВВ и опыт механизированного их применения в народном хозяйстве. М.: Ротапринт СФТПП АН СССР, 1974. С. 26–38.
32. Адрианов Н. Ф., Головкин Т. С., Козловский Т. С. Определение работоспособности водосодержащих ВВ методом воронкообразования // Теория и опыт механизированного применения простейших взрывчатых веществ. М.: ИФХ АН СССР, 1972. С. 36–41.
33. Мельников Н. В., Демидюк Г. П. Пути развития водонаполненных ВВ // Теоретические основы разработки водосодержащих ВВ и опыт механизированного применения их в народном хозяйстве. М.: СФТПП АН СССР, 1974. С. 3–10.
34. Долгов К. А., Кире В. Г. О некоторых физико-механических свойствах горячих льющихся водонаполненных ВВ // Теоретические основы разработки водосодержащих ВВ и опыт механизированного их применения в народном хозяйстве. М.: Ротапринт Сектора физико-технических горных проблем института физики земли АН СССР АН СССР, 1974. С. 54–60.

35. Кире Б. Г. Свойства горячих водонаполненных ВВ и испытания их на руднике «Медвежий ручей» Норильского комбината // Использование взрыва в народном хозяйстве. Киев: Наукова думка, 1970. С. 253–258.
36. Ханукаев А. Н. Новые водосодержащие взрывчатые вещества // Безопасность труда в промышленности. 1994. № 4. С. 32–36.
37. Карпов М. А., Попов Г. П. Применение передовых технологий в области буровзрывных // Горный журнал. 2002. № 8. С. 25–27.
38. Карпов М. А., Попов Г. П. Повышение эффективности использования взрывчатых веществ // Горный журнал. 1997. № 5–6. С. 42–45.
39. Кутузов Б. Н. Перспективы совершенствования ассортимента промышленных ВВ для карьеров // Горный журнал 1996. № 9–10. С. 39–43.
40. Попов Г. П., Артемьев В. А., Борзенков Л. А. Стабильность заряда акватаола // Безопасность труда в промышленности. 1990. № 7. С. 70–72.
41. Державец А. С., Феодоритов М. И., Костюков В. В., Гаврилов Н. И., Горшколепов Г. М., Маслов И. Ю. Обеспечение безопасности ведения взрывных работ на карьерах // Безопасность труда в промышленности. 2004. № 2. С. 6–7.
42. Галкин В. В., Ветлужских В. П., Павлютенков В. М. Причины разложения и отказов зарядов акватаола // Безопасность труда в промышленности. 1988. № 10. С. 47–49.
43. Кутузов Б. Н. Разрушение горных пород взрывом // Взрывные технологии в промышленности. М.: МГГУ, 1994. 446 с.
44. Патент РФ № 1631939. Взрывчатое вещество № 4440677/23, 2000 (15.06.88. Б. И. № 33).
45. Захаров В. И., Матвеев В. А. и др. Нефелин как источник получения компонентов простейших взрывчатых веществ для горнодобывающей промышленности // Комплексная переработка хибинских нефелиновых руд. Апатиты: КНЦ РАН, 1999. С. 61–68.
46. Подозерский Д. С., Едигарев С. А., Вяткин Н. П. Совершенствование составов взрывчатых веществ // Горный журнал. 1997. № 9. С. 48–49.
47. Шеменев В. Г., Павлютенков В. М. Водосодержащие взрывчатые вещества: состояние разработки, перспективы использования // Горный журнал. 1996. № 11–12. С. 48–49.
48. Шеменев В. Г., Маторин А. С., Ветлужских В. П., Котяшев А. А., Соколов В. С., Сеницын В. А., Попов В. Ю. Исследование энергетических и детонационных характеристик водосодержащих взрывчатых веществ с пониженным содержанием тротила: сб. докл. VI Всерос. совещания по взрывным работам (г. Междуреченск). 1997.
49. Соснин В. А., Морозов К. Е., Корунов В. Н. Опыт применения технологии получения эмульсионных взрывчатых веществ для открытых горных пород разработки ОАО «ГосНИИ «Кристалл» // Взрывное дело. 2014. № 112/69. С. 114–121.
50. Соснин В. А., Межеричкий С. Э., Печенев Ю. Г. Состояние и перспективы развития промышленных взрывчатых веществ в России и за рубежом // Горная промышленность. 2017. № 5(135). С. 60–64.
51. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору в 2021 году. М.: ЗАО «НТЦ ПБ», 2022.
52. Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 15 сент. 2011 г. № 537в «Перечень взрывчатых материалов, оборудования и приборов взрывного дела, допущенных к применению в Российской Федерации». URL: <https://docs.cntd.ru/document/902301357> (дата обращения: 26.10.2023).

53. Колганов В. Е., Соснин В. А. Состояние и перспективы развития ПВВ в России и за рубежом // Взрывное дело. 2008. № 100/57. С. 20–32.
54. Власова Е. А., Козырев С. А. Исследование физико-химических характеристик многокомпонентных взрывчатых составов // Взрывное дело. 2023. № 141/98. С. 20–32.
55. Апин А. Я., Велина Н. Ф. О критических диаметрах зарядов ВВ и скорости детонации гексогена // Взрывное дело. 1967. № 63/20. С. 5–35.
56. Хотин В. Г., Хотина Л. Д., Шаталов Н. Е., Кригер Г. Э. Исследование детонационной способности аммиачно-селитренных ВВ, сенсibilизированных гексогеном // Взрывное дело. 1970. № 68/25. С. 235–243.
57. Жуков Ю. Н., Янкилевич В. М., Сергеев А. Г. и др. Ассортимент взрывчатых веществ для механизированного заряжания при подземных горных работах // Информационный бюллетень Национальной организации инженеров-взрывников. 2002. № 3. С. 4–5.
58. Патент RU № 2257369 С2, Взрывчатое вещество «Граммонит М» № 2001128706/02, 27.07.2005 (25.10.2001).
59. Ананьин А. А., Жуков Ю. Н., Янкилевич В. М., Левушкин Д. А., Сергеев А. Г., Жуков А. Н., Машуков И. В. Новые взрывчатые материалы. Разработка и производство. О состоянии взрывного дела в РФ. Основные проблемы и пути их решения // Сб. докл. и ст. Всерос. конф. (28–30 мая 2002 г.). М., 2002. С. 82–84.
60. Ананьин А. А., Жуков Ю. Н., Янкилевич В. М. и др. Разработка взрывчатого материала II класса граммонита М21 для механизированного заряжания скважин и шпуров // Взрывное дело. 2006. № 96/53. С. 173–178.
61. Переведенцев П. П., Жуков Ю. Н., Янкилевич В. М., Соколов Е. В., Сергеев А. Г. Применение граммонита М21 для механизированного заряжания скважин и шпуров // Взрывное дело. 2008. № 100/57. С. 214–218.
62. Жуков Ю. Н., Переведенцев П. П., Аникеев В. Н., Сергеев А. Г. Опыт использования граммонита М21 для механизированного пневмозаряжания скважин и шпуров // Горный журнал. 2011. № 2. С. 60–62.
63. Орлова Е. Ю. Химия и технология бризантных взрывчатых веществ. Л.: Химия, 1971. 312 с.
64. Барон В. Л., Кантор В. Х. Техника и технология взрывных работ в США. М.: Недра, 1989. 376 с.
65. Державец А. С., Феодоритов М. И. О состоянии и перспективах применения взрывчатых веществ, изготавливаемых вблизи мест их применения // О состоянии взрывного дела в Российской Федерации: основные проблемы и пути решения: сб. докл. и стат. Всерос. конф. (28–30 мая 2002 г.). М.: МГГУ, 2002. С. 37–46.
66. Клаус-Петер Брайдунг ANDEX 2000 аммиачно-селитренное взрывчатое вещество, усовершенствованное в отношении техники взрывных работ и безвредности для окружающей среды // Глюкауф. 1999. № 1. С. 34–40.
67. Поздняков З. Г., Росси Б. Д. Справочник по промышленным взрывчатым веществам и средствам взрывания. М.: Недра, 1977. 253 с.
68. Игнатьева С. Ю., Базотов В. Я., Мадыкин В. Ф. Активирование внутренней поверхности аммиачной селитры различных марок методами термо-вакуум-импульсного воздействия // Вестник Казанского технологического ун-та. 2014. № 23, Т.17. С. 348–350.
69. Вещество взрывчатое промышленное Гранулит АК. Технические условия ТУ 7276-02-04694181-93. Апатиты, 1993. 18 с.

70. Искрицкий Н. А. Экономика и перспективы применения вермикулита. Л.: Наука, 1975. 150 с.
71. Автское свидетельство SU 1438836 A1, 23.11.1988. Способ получения сорбента / С. П. Месяц, В. В. Крючков, Л. А. Кириллова, И. А. Сентябрева. – № 415359; заявл. от 29.07.1986.
72. Вещество взрывчатое промышленное Гранулит ВК. Технические условия ТУ 7276-03-04694181-96. Апатиты, 1996. 17 с.
73. Додух В. Д. Влияние типа и свойств аммиачной селитры на взрывчатые характеристики сыпучих смесевых ВВ // Горный журнал. 2003. № 4–5. С. 66–70.
74. Литовка О. Б., Чугреева Е. Ю., Старшинов А. В., Козак Г. Д. Физико-химические и взрывчатые характеристики простейших составов на основе пористой гранулированной аммиачной селитры // Успехи в химии и химической технологии. 2007. Т. 21, № 5(73). С. 35–40.
75. Старшинов А. В., Фадеев В. Ю., Богданов Н. М. Влияние физического состояния исходных компонентов на эффективность применения смесевых взрывчатых веществ // Физические проблемы взрывного разрушения массивов горных пород: сб. тр. междунар. конф. (г. Москва, 7–11 сент., 1998 г.). М.: ИПКОН, 1999. С. 244–250.
76. Старшинов А. В., Нейман В. Р., Бакулин В. Н., Козак Г. Д., Литовка О. Б., Жамьян Ж. Результаты испытаний смесей АСДТ из различных видов сырья // Взрывное дело. 2009. № 102/59. С. 145–155.
77. Старшинов А. В. Современные представления о структуре гранул аммиачной селитры и смесевых взрывчатых веществ на ее основе // Взрывное дело. 2019. № 122/79. С. 84–97.
78. Руководство по эксплуатации установки смесительной УИ-2. Разрешение к применению в подземных выработках всех рудников предприятий цветной металлургии не опасных по газу и пыли постановлением Госгортехнадзора СССР №02-1-40/511 от 14.12.87 г.
79. Козырев С. А., Едигарев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Комплексный метод оценки взрывчатых и газовых характеристик промышленных ВВ // Записки Горного института. 2007. Т. 171. С. 195–202.
80. Патент на изобретение РФ №2407984 С2, 27.12.2010. Заявка № 2008152923/02 от 31.12.2008. Способ определения относительной работоспособности промышленного взрывчатого вещества / С. А. Козырев, Е. А. Власова, А. В. Соколов.
81. Патент на изобретение РФ № 2407985 С2, 27.12.2010. Заявка № 2008152985/02 от 31.12.2008. Способ определения газовой вредности промышленного взрывчатого вещества / С. А. Козырев, Е. А. Власова, А. В. Соколов.
82. McCree J., Dewey J. H. Inco Steps Up ANFO Uses // Mining engineering. 1964. Vol. 16, №. 11. p. 56–60.
83. Кукиб Б. Н., Панкова Е. В., Афанасенков А. Н., Потулов В. Ю., Шведов К. К. Расчетный экспресс-метод предварительной оценки энергетических характеристик, параметров детонации, относительной работоспособности и экономической эффективности промышленных взрывчатых веществ // Методы испытаний низкочувствительных ВВ: метод. рек. Черноголовка: Отд. ин-та хим. физики АН СССР, 1991. С. 90–108.
84. Лебедев Ю. А. Термохимическое изучение индивидуальных взрывчатых веществ и их смесей // Взрывное дело. 1963. № 52/9. С. 80–90.

85. Шведов К. К. Некоторые вопросы детонации смесевых ВВ // Детонация. Материалы II Всесоюзного совещания по детонации: сб., вып. II. Черноголовка, 1981. С. 28–35.
86. Шведов К. К. Некоторые вопросы современного состояния развития промышленных ВВ и методов их испытаний // ФТПРПИ. 1990. № 4. С. 93–101.
87. Моисеенко П. М. Некоторые взрывчатые характеристики смесей перхлората аммония и аммиачной селитры с алюминиевой пудрой // Взрывное дело. 1975. № 75/32. С. 135–140.
88. Иоффе В. Б., Меньшиков Б. А. О детонационной способности водонаполненных взрывчатых веществ // Взрывное дело. 1975. № 75/32. С. 141–151.
89. Фролов Ю. В., Похил П. Ф., Логачев В. С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8, № 2. С. 213–235.
90. Похил П. Ф., Логачев В. С., Мальцев В. М. О механизме горения частиц металла // Физика горения и взрыва. 1970. Т. 6, № 3. С. 407–410.
91. Махов В. Н. Метательная способность и теплота взрывчатого разложения алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 2. С. 96–105.
92. Гоголя М. В., Махов В. Н., Долгобородов А. Ю. и др. Механическая чувствительность и параметры детонации алюминизированных взрывчатых веществ // Физика горения и взрыва. 2004. Т. 40, № 4. С. 80–83.
93. Власова Е. А., Державец А. С., Козырев С. А., Кутьин Н. Г., Фильчаков А. А. Оценка взрывчатых характеристик и газовой вредности промышленных ВВ // Взрывное дело. 2008. № 56. С. 119–136.
94. Шведов К. К. Некоторые вопросы современного состояния развития промышленных ВВ и методов их испытаний // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 1990. № 4. С. 93–101.
95. Фролов Ю. В., Похил П. Ф., Логачев В. С. Воспламенение и горение порошкообразного алюминия в высокотемпературных газовых средах и составе гетерогенных конденсированных систем // Физика горения и взрыва. 1972. Т. 8, № 2. С. 213–236.
96. Светлов Б. Я. О некоторых особенностях взрывчатого превращения алюмосодержащих взрывчатых веществ // Взрывное дело. 1963. № 52/9. С. 57–67.
97. Кутузов, Б. Н. Перспективы замены тротилсодержащих промышленных ВВ на бестротиловые для горных предприятий // Горный журнал. 2007. № 4. С. 52–53.
98. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Пугачев С. С., Михайлов А. Л. Экспериментальное определение газовой вредности современных промышленных ВВ // Безопасность труда в промышленности. 2008. № 2. С. 40–43.
99. Исследование физических процессов и явлений в скальных массивах при взрывах для повышения их эффективности и уменьшения вредных воздействий на окружающую среду: отчет о НИР (заключ.): 5-00-2404 / Н. Н. Мельников, Д. С. Подозерский и др. Апатиты, Горный институт КНЦ РАН, 2003.
100. Вещество взрывчатое – Игданит А-6. Технические условия ТУ 48. – ИПКОН – 04-83.
101. Тамбиев Г. И., Ольшанский Е. Н., Никитин О. Г. Вопросы развития механизации, взрывных работ на рудниках // Взрывное дело. 2008. № 56. С. 235–245.
102. Тамбиев Г. И., Ольшанский Е. Н. Развитие производства промышленных ВВ и их применение в НПП «Интеррин» // Взрывное дело. 2007. № 55. С. 192–203.

103. Джалов В. К., Ерёменко А. А., Машуков И. В. Механизация взрывных работ на подземных рудниках Горной Шории и Хакасии // Горный журнал. 2007. № 4. С. 49–51.
104. Сборщиков А. Г., Солнцева Р. Н., Бахаревич Н. С. О замене алюминия менее дефицитными компонентами в промышленных взрывчатых веществах // Взрывное дело. 1978. № 80/37. С. 115–121.
105. Парфенов А. А., Барина Т. А., Казаркина Л. Н., Анаскин Н. А. Новая энергетическая добавка для промышленных ВВ // Безопасность труда в промышленности. 1995. № 3. С. 27–28.
106. Бахтин А. К., Бахтин Е. А., Петров Е. А. Новая энергетическая добавка для промышленных ВВ // Горный журнал. 2004. № 10. С. 34–37.
107. Бахтин А. К., Бахтин Е. А., Берикбалапов Н. Е., Усик С. Г. Модернизированная зарядная машина МЗ-3Б для приготовления и использования металлизированных гранулитов // Горный журнал. 2008. № 6. С. 69–70.
108. Ли Хи Ун, Панчигин В. Я., Резников И. Н. Технологии и качество приготовления гранулированных ВВ в лабораторных и производственных условиях // Вестн. науч. центра по безо. работ в угол. пром-сти ВостНИИ. 2005. № 2. С. 18–25.
109. Вещества взрывчатые промышленные Гранулиты МП. Технические условия ТУ 7276-079-00203938-2006.
110. Порошок алюминиевый марки AlSi25. Технические условия ТУ 1310-001-93350951-2006.
111. Козырев С. А., Соколов А. В., Власова Е. А., Звонарь А. Ю., Пугачев С. С. Оценка эффективности действия алюминизированных взрывчатых веществ // Развитие идей Н. В. Мельникова в области комплексного освоения недр. Международное совещание к 100-летию со дня рождения акад. Н. В. Мельникова / составитель: А. Г. Красивин. УРАН ИПКОН РАН. М., 2009. С. 122–125.
112. Регламент технологического процесса получения Гранулита-МП (ТУ 7276-079-00203938-2006) на подземном участке изготовления гранулированных взрывчатых веществ цеха взрывных работ ОАО «Апатит».
113. Подозерский Д. С., Едигарев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Белоглазов М. И., Шишаев В. А., Листопад Г. Г., Доильницын В. М. Метод определения скорости детонации и газовой вредности промышленных взрывчатых веществ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2003. № 9. С. 63–66.
114. Шведов К. К. О полноте и экологической безопасности взрыва низкочувствительных промышленных ВВ // Энергетическое строительство. 1993. № 6. С. 51–55.
115. Кутузов Б. Н. Анализ обстоятельств и причин аварии при подготовке массового взрыва на подземном руднике «Расвумчорр» ОАО «Апатит» // Горный журнал. 2009. № 5. С. 94–96.
116. Кукиб Б. Н., Кутузов Б. Н. Анализ обстоятельств и причин аварии при подготовке массового взрыва на подземном руднике «Расвумчорр» ОАО «Апатит» // Безопасность труда в промышленности. 2009. № 7. С. 34–36.
117. Державец А. С. Уроки несанкционированных взрывов на подземных рудниках // Горный журнал. 2009. № 5. С. 97–99.
118. Переведенцев П. П., Власов О. М., Хрулев А. А., Сергеев А. Г., Левушкин Д. А., Соловьев С. А. Разработка и внедрение взрывчатых материалов и изделий различного назначения на их основе // Взрывное дело. 2013. № 109/66. С. 222–228.

119. Boliden Group (Boliden's open pit and underground mines). Рекламные материалы 2009 год.
120. Orica Mining Services. Рекламные материалы 2009 год.
121. Компания LKAB, Швеция. Рекламные материалы 2009 год.
122. NitroNobel (Швеция). Рекламные материалы 2009 год.
123. Red Back Mining Inc. (Канада). Рекламные материалы 2007 год.
124. Корпорация МАХАМ (Испания). Рекламные материалы 2007 год.
125. Рубцов С. К., Мальгин О. Н., Бибики И. П. К вопросу оценки относительной работоспособности эмульсионных взрывчатых составов // Горный вестник Узбекистана. 2005. № 2 (21). С. 36–40.
126. Колганов Е. В., Соснин В. А., Илюхин В. С., Филинов А. И. Экспериментальный взрыв эмульсионного ПВВ в подземных условиях АО «Казахмыс» Казахстан // Взрывное дело. 2005. № 95/52. С. 80–84.
127. Колганов Е. В. Механизированное зарядание эмульсионных взрывчатых веществ в подземных горных выработках — перспективное направление повышения эффективности буровзрывных работ // Ориентированные фундаментальные исследования — Федеральные целевые программы, наукоемкое производство: сб. науч. тр. М.: Эксподизайн РА, 2007. С. 367–369.
128. Викторов С. Д., Кутузов Б. Н., Фадеев В. Ю. Совершенствование ассортимента российских промышленных взрывчатых материалов для подземных рудников России // Безопасность труда в промышленности. 2011. № 6. С. 28–34.
129. Сакерин А. С., Константинов Д. О., Козырев С. А., Оверченко М. Н. Эмульсионные взрывчатые вещества, зарядное оборудование и взрывные технологии для подземных горных работ // Горный журнал. 2014. № 10. С. 38–41.
130. ТУ 7276-002-23308410-2006 Эмульсионное промышленное взрывчатое вещество «Сабтэк».
131. Руководство по эксплуатации смесительно-зарядной машины MCU РЭ 4826-007-23308410-2010.
132. ГГД Невзрывчатый компонент промышленных эмульсионных взрывчатых веществ. Газогенерирующая добавка. ТУ 2499-004-23308410-2006.
133. Козырев С. А., Звонарь А. Ю. Повышение эффективности и безопасности взрывной отбойки на подземных рудниках хибинских месторождений при использовании эмульсионных взрывчатых веществ // Взрывное дело. 2011. № 106–63. С. 72–91.
134. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Звонарь А. Ю., Браунштейн А. А., Оверченко М. Н. Внедрение на подземных рудниках ОАО «Апатит» эмульсионных ВВ «Сабтэк» при проходке горных выработок // Взрывное дело. 2013. № 109–66 С. 161–172.
135. Жученко Е. И., Иоффе В. Б., Кукиб Б. Н., Сундуков И. Ю., Овчаренко М. И. Зарядание глубоких скважин эмульсионными ВВ на разрезах Кузбасса // Физические проблемы разрушения горных пород. Новосибирск: Наука, 2003. С. 154–162.
136. Горинов С. А., Маслов И. Ю. Плотность эмульсионного взрывчатого вещества, сенсibilизированного газовыми порами // Горный информационно-аналитический бюллетень (науч.-технич. жур.). 2013. № 54–1. С. 174–191.
137. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В. Оценка фактических энергетических характеристик эмульсионных взрывчатых веществ по данным экспериментального определения скорости детонации // Горный журнал. 2020. № 9. С. 47–53.

138. Колганов Е. В., Соснин В. А. Эмульсионные промышленные взрывчатые вещества. 1-я книга (Составы и свойства). Дзержинск Нижегородской обл.: ГосНИИ «Кристалл», 2009. – 592 с.
139. Коваленко И. Л., Куприн В. П. Обоснование выбора эмульгатора матриц эмульсионных взрывчатых веществ на основе аммиачной и кальциевой селитр // Вопросы химии и химической технологии. 2001. № 1. С. 87–90.
140. Стрилец А. П., Гопанюк Д. Г., Швец В. Ю. Исследование процесса приготовления эмульсионной композиции для получения ЭВВ при использовании различных компонентов, входящих в ее состав // Горный информационно-аналитический бюллетень. 1999. № 7. С. 53–54.
141. Горинов С. А., Маслов И. Ю. Влияние химического состава окислительной фазы эмульсии ЭВВ на взрывчатые характеристики при их сенсбилизации пластиковыми микросферами // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2011. № S4–5. С. 9–16.
142. Горинов С. А., Куприн В. П., Коваленко И. Л., Собина Е. П. Влияние химической природы окислителя на детонационные характеристики ЭВВ // Развитие ресурсосберегающих технологий во взрывном деле. III Уральский горно-промышленный форум. Екатеринбург, 2010. С. 191–201.
143. Эмульсионные взрывчатые вещества / пер. монограф. проф. Ван Сюйгуан. Издания Metallurgical Industry Press. 1994 г. Красноярск, 2012. 380 с.
144. Эмульсия / пер с англ. Л.: Химия, 1972. 452 с.
145. Эмульсионная матрица «Сабтэк» ТУ 7276-002-23308410-2006 (с изменениями на 19.01.2017 г.).
146. ГОСТ 2-2013 Селитра аммиачная. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, с Поправкой).
147. ГОСТ 29238-91. Нитрат аммония технический. Метод определения содержания вещества, не растворимого в воде (гравиметрический).
148. Сухарев Ю. И. Синтез и применение специфических оксигидратных сорбентов. М.: Энергоатомиздат, 1987. 120 с.
149. ГОСТ 19906-74 Нитрит натрия технический. Технические условия (с Изменениями № 1–5).
150. Тарасевич Б. Н. ИК-спектры основных классов органических соединений. Справочные материалы. М.: МГУ им. М. В. Ломоносова, 2012. 54 с.
151. ГОСТ 11088-75 Реактивы. Магний нитрат 6-водный. Технические условия (с Изменениями № 1, 2).
152. ГОСТ 14870-77 (СТ СЭВ 3686-82; СТ СЭВ 1489-79) Продукты химические. Методы определения воды (с Изменениями № 1, 2).
153. Lee J., Persson P. A. Detonation behavior of emulsion explosives // Propellants, Explosives, Pyrotechnics, 1990. V. 15. P. 208–216.
154. Дерibas А. А., Медведев А. Е., Решетняк А. Ю., Фомин В. М. Детонация эмульсионных взрывчатых веществ с полыми микросферами // Доклады Академии наук. 2003. Т. 389, № 6. С. 747–748.
155. Неблагоприятное воздействие динамической ударной волны на эмульсионные взрывчатые сенсбилизаторы. URL: [http://unigran.ua/ru/wp-content/uploads/2009/06/vienna\\_conference.pdf](http://unigran.ua/ru/wp-content/uploads/2009/06/vienna_conference.pdf)
156. Кириченко А. Л., Устименко Е. Б., Шиман Л. Н., Политов В. В. Исследование детонационных характеристик шпуровых зарядов патронированных эмульсионных взрывчатых веществ // Научный вестник НГУ. 2012. № 6. С. 37–41.

157. Нефедов М. А. Направленное разрушение горных пород взрывом. СПб.: Издательство С.-Петербургского ун-та, 1992. 188 с.
158. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Звонарь А. Ю., Браунштейн А. А., Оверченко М. Н. Внедрение на подземных рудниках ОАО «Апатит» эмульсионных ВВ «Сабтэк» // Взрывное дело. 2013. № 109/66. С. 161–172.
159. Козырев С. А., Фокин В. А., Соколов А. В., Сакерин А. С. Влияние динамических нагрузок на взрывчатые характеристики газифицированных эмульсионных взрывчатых веществ // Взрывное дело. 2014. № 111–68. С. 228–242.
160. Козырев С. А., Абрашитов А. Ю., Онуприенко В. С., Волков А. В. Совершенствование технологии взрывной отбойки в системе разработки с подэтажным обрушением и торцовым выпуском руды на подземных рудниках Хибинских месторождений // Горный журнал. 2019. №11. С.42–50.
161. Временные методические указания по расчету и проектированию проектов буровзрывных работ для системы разработки с подэтажным обрушением и торцовым выпуском руды. Горный институт КНЦ РАН. Апатиты–Кировск, 2018.
162. Козырев С. А., Соколов А. В., Константинов К. Н., Пугачев С. С. Повышение эффективности скважинной отбойки руды в системе подэтажного принудительного обрушения // Горная промышленность. 2008. № 3(79). С.10–13.
163. Артемьев Э. П., Трясцин А. В. Обоснование оптимальных интервалов времени замедления при производстве массовых взрывов на карьерах // Изв. вузов. Горный жур. 2013. № 12. С. 84–87.
164. Кутузов Б. Н., Тюпин В. Н. Определение интервала короткозамедленного взрывания зарядов в трещиноватом массиве // Изв. вузов. Горный жур. 1979. № 1. С. 28–35.
165. Ермолаев А. И., Лапшов А. А. Анализ теории и практики короткозамедленного взрывания горных пород // Известия вузов. Горный жур. 2005. № 4. С. 102–108.
166. Ермолаев А. И., Токмаков В. В. и др. Механизм разрушения горных пород при короткозамедленном взрывании (КЗВ) и расчет интервалов замедления // Инновационные геотехнологии при разработке рудных и нерудных месторождений. Екатеринбург, 2014. С. 75–79.
167. Кушнеров П. И., Шумский А. И. Оптимальные интервалы замедления между смежными зарядами при КЗВ // Взрывное дело. 2008. № 99/56. С. 69–79.
168. Совмен В. К., Эквист Б. В. Методика расчетов интервалов замедлений при производстве массовых взрывов с использованием неэлектрических систем инициирования зарядов // Горный журнал. 2006. № 8. С. 67–68.
169. Ansys inc. Autodyn, Explicit software for non-linear dynamics, theory manual, revision 4.3 edition, 2005, 235 p.
170. Козырев С. А., Камянский В. Н., Аленичев И. А. Оценка взаимодействия скважинных зарядов при различных интервалах замедлений между ними // Взрывное дело. 2017. № 117/74. С. 60–75.
171. Козырев С. А., Соколов А. В., Камянский В. Н., Усачев Е. А. Оценка оптимального времени замедления между скважинами при их одновременном взрывании в веере // Промышленная безопасность предприятий минерально-сырьевого комплекса в XXI веке. 2018. С. 62–63.
172. Неэлектрическая система инициирования «Эксэл» ТУ 7287-005-23308410-2006.
173. Козырев С. А., Власова Е. А., Соколов А. В., Усачев Е. А. Оценка эффективности применения электронных инициирующих устройств «Искра-Т» по условиям дробления и сейсмического действия торцевых взрывов // Горная промышленность. 2021. № 2. С 107–113.



ГОРНЫЙ ИНСТИТУТ ФИЦ КНЦ РАН

РОССИЯ, 184209, Мурманская область, г. Апатиты, ул. Ферсмана, 24



ISBN 978-5-91137-509-6



9 785911 375096