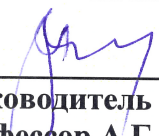


ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ



**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОРНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УТВЕРЖДАЮ


Руководитель ОПОП ВО
профессор А.Г. Протосеня

**МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ
ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ДИСЦИПЛИНЕ**

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ

Уровень высшего образования:	Подготовка кадров высшей квалификации
Направление подготовки:	21.06.01 Геология, разведка и разработка полезных ископаемых
Направленность (профиль):	Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика
Форма обучения:	очная
Нормативный срок обучения:	4 года
Составитель:	к.т.н., доц. В.Н. Ковалевский

Санкт-Петербург

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Задания к самостоятельной работе	4
Рекомендуемая литература и источники в сети Интернет:	5
Базы данных, электронно-библиотечные системы, информационно-справочные и поисковые системы:	5
Контрольные вопросы для самопроверки:.....	6
Практическое занятие № 1.....	8
Практическое занятие № 2.....	14

ВВЕДЕНИЕ

Изучение дисциплины «Физические процессы взрывного разрушения» предполагает формирование у аспирантов базовых знаний и современных представлений о особенностях физики разрушения горных пород в различных условиях при ведении взрывных работ; а также подготовку теоретической базы аспирантов для последующего изучения техники и технологий взрывных работ при разработке месторождений открытым и подземным способами, физики взрыва, взрывных работ в строительстве, специальных взрывных технологий, методов ведения взрывных работ; а также научного стиля мышления, умения ориентироваться в потоке научной и технической информации и применять в будущей научно-исследовательской и проектно-производственной деятельности физические методы исследования. В процессе изучения дисциплины аспиранты выполняют ряд практических заданий, которые составляют основу практической подготовки.

Настоящие методические указания предназначены для приобретения аспирантами навыков самостоятельного использования изученного теоретического материала при решении практических задач.

ЗАДАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ

Самостоятельная работа – обязательная и неотъемлемая часть учебной работы аспиранта, направленная на:

- систематизацию, закрепление, углубление и расширение полученных теоретических знаний и практических умений;
- формирование умений использовать различные информационные источники: нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей, творческой инициативы, ответственности и организованности;
- развитие исследовательских умений.

Рекомендуемая литература и источники в сети Интернет:

1. В.А. Боровиков, И.Ф. Ванягин, М.Г. Менжулин, С.В. Цирель. Волны напряжений в обводненном трещиноватом массиве. Л.:ЛГИ, 1989. 85 с.
2. А.Н. Ханукаев. Физические процессы при отбойке горных пород взрывом. М.: Недра, 1974.
3. Г.М. Крюков. Физика и моменты разных видов разрушения горной породы при взрыве в ней удлиненного заряда ПВВ // отдельные статьи ГИАБ. – М.: Изд-во МГГУ, 2009. – № 3. – 48 с.

Базы данных, электронно-библиотечные системы, информационно-справочные и поисковые системы:

1. Европейская цифровая библиотека Europeana: <http://www.europeana.eu/portal>
КонсультантПлюс: справочно-поисковая система [Электронный ресурс]. - www.consultant.ru/
2. Информационно-издательский центр по геологии и недропользованию Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации - ООО "ГЕОИНФОРММАРК": <http://www.geoinform.ru/>
3. Информационно-аналитический центр «Минерал»: <http://www.mineral.ru/>
4. Мировая цифровая библиотека: <http://wdl.org/ru>
5. Научная электронная библиотека «Scopus»: <https://www.scopus.com>
6. Научная электронная библиотека ScienceDirect: <http://www.sciencedirect.com>
7. Научная электронная библиотека «eLIBRARY»: <https://elibrary.ru/>
8. Портал «Гуманитарное образование» <http://www.humanities.edu.ru/>
9. Федеральный портал «Российское образование» <http://www.edu.ru/>
10. Федеральное хранилище «Единая коллекция цифровых образовательных ресурсов» <http://school-collection.edu.ru/>
11. Поисковые системы Yandex, Rambler, Yahoo и др.

12. Электронно-библиотечная система издательского центра «Лань»: <https://e.lanbook.com/books>

13. Электронная библиотека Российской Государственной Библиотеки (РГБ): Электронная библиотека учебников: <http://studentam.net>

14. Электронно-библиотечная система «ЭБС ЮРАЙТ»: www.biblio-online.ru.

15. Электронная библиотечная система «Национальный цифровой ресурс «Руконт»»: <http://rucont.ru/>

16. Электронно-библиотечная система <http://www.sciteclibrary.ru/>

Для подготовки к промежуточному контролю обучающийся должен сопоставить приобретенные знания, умения, навыки и опыт с указанными в рабочей программе дисциплины, проверить себя, ответив на контрольные вопросы и, в случае необходимости, еще раз изучить литературные источники и обратиться к преподавателю за консультацией.

Контрольные вопросы для самопроверки:

1. Как определяется максимальный радиус полости цилиндрического заряда?
2. Что представляет собой коэффициент пересчета начального давления продуктов взрыва
3. Как определить размер зоны дробления?
4. Каким образом определяется динамический предел прочности породы на сдвиг?
5. Как рассчитать размер зоны трещинообразования?
6. Что такое динамический предел прочности породы на отрыв?
7. Что представляет собой акустическая жесткость породы?
8. Назовите пределы ближней, средней и дальней зоны взрыва.
9. Как проводится расчет параметров волн напряжений при взрыве для условий ближней зоны взрыва?

10. Как проводится расчет параметров волн напряжений при взрыве для условий средней зоны взрыва?
11. Как проводится расчет параметров волн напряжений при взрыве для условий дальней зоны взрыва?
12. Какие допущения применяются для определения избыточного давления на фронте ударной волны воздушной волны цилиндрического заряда при наличии воздушного зазора?

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 1
РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНОГО РАДИУСА ВЗРЫВНОЙ ПОЛОСТИ, ОСТАТОЧНОГО ДАВЛЕНИЯ В НЕЙ, РАДИУСОВ ЗОНЫ ДРОБЛЕНИЯ И ЗОНЫ ТРЕЩИНООБРАЗОВАНИЯ

1. Для цилиндрического заряда максимальный радиус полости составляет:

$$R_{0max} = 1310(\rho_n c_s^2)^{-0,292} \cdot R_{0з}, \quad (1)$$

где ρ_n – плотность породы, кг/м³;

c_s – скорость распространения поперечной волны, м/с;

$R_{0з}$ – радиус заряда, м.

Остаточное давление во взрывной полости:

$$P_{oc} = 8,5 \cdot 10^8 \cdot K_p \left(\frac{R_{0з}}{R_{0max}} \right)^{2,5} = 13,7 K_p (\rho_n c_s^2)^{0,73}, \quad (2)$$

где K_p – коэффициент пересчета начального давления продуктов взрыва

$$K_p = \frac{\gamma_{ВВ} D_{ВВ}^2}{\gamma_{тр} D_{тр}^2}, \quad (3)$$

где $\gamma_{ВВ}$, $\gamma_{тр}$ – плотность применяемого ВВ и эталонного (тротила) соответственно;

$D_{ВВ}$, $D_{тр}$ – скорость детонации применяемого ВВ и эталонного (тротила) соответственно.

2. Расчёт радиуса зоны дробления

Размер зоны дробления определяется значением максимального напряжения сдвига в упругопластической волне сжатия и динамическим пределом прочности породы на сдвиг согласно выражению:

$$\sigma_{сдв.мах}(\bar{R}_{др}) = \frac{\sigma_r маx(\bar{R}_{др}) - \sigma_\phi маx(\bar{R}_{др})}{2} \geq [\sigma_{сдв}^{дин}], \quad (4)$$

где $\bar{R}_{др}$ – относительный радиус зоны дробления:

$$\bar{R}_{др} = \frac{R_{др}}{R_{0з}^*}, \quad (5)$$

где $R_{0з}^*$ – эквивалентный радиус заряда:

$$R_{03}^* = R_{03} \left(\frac{\gamma_{ВВ} Q_{ВВ}}{\gamma_{тэн} Q_{тэн}} \right)^\lambda, \quad (6)$$

где $\gamma_{ВВ}$, $\gamma_{тэн}$ – плотность применяемого ВВ и тэна соответственно

($\gamma_{тэн} = 1500 \text{ кг/м}^3$);

$Q_{ВВ}$, $Q_{тэн}$ – скорость детонации применяемого ВВ и тэна соответственно ($Q_{тэн} = 5860 \text{ кДж/кг}$);

λ – коэффициент, зависящий от формы заряда (для цилиндрического заряда $\lambda = 0,5$).

Динамический предел прочности породы на сдвиг определяется из выражения:

$$[\sigma_{сдв}^{дин}] = \sigma_{сдв}^0 + \frac{\mu_* P_{ос}}{1 + \frac{\mu_* P_{ос}}{\sigma_{сдв}^p - \sigma_{сдв}^0}}, \quad (7)$$

где $\sigma_{сдв}^0$, $\sigma_{сдв}^p$ – предел прочности породы на сдвиг соответственно при атмосферном и всестороннем гидростатическим давлением (500-2100 МПа);

μ_* – коэффициент внутреннего трения;

$P_{ос}$ – квазистатическое давление продуктов взрыва, определяемое по формуле (2) для цилиндрического заряда. Значения $\sigma_{сдв}^0$, $\sigma_{сдв}^p$, μ_* берутся из таблицы 1.

Таблица 1.

Физико-механические свойства ряда горных пород

Порода	Плотность ρ_n , кг/м ³	Скорость поперечной волны c_s , м/с	μ_*	$\sigma_{сдв}^0$, МПа	$\sigma_{сдв}^p$, МПа
Гранит крупнозернистый	2780	2750	2,0	40	1020
Гранит среднезернистый	2670	3020	1,8	30	990

Гранит микрозер- нистый	2730	3250	2,0	60	970
Гранит гнейсовый	2750	3480	2,5	60	980
Известняк плотный	2910	2800	1,0	20	1020
Известняк средней плотности	2650	3540	1,2	30	870
Черный сланец	2760	3120	1,5	60	480
Кварцит	2650	3150	2,0	60	60
Серый сла- нец	2520	3270	1,8	30	570

Значение $\sigma_{r.max}(\bar{R}_{др})$ определяется по зависимости:

$$\sigma_{r.max}(\bar{R}_{др}) = \rho_{п} c_{п} \frac{1,1}{\bar{r}^{1,4}}, \quad (8)$$

где \bar{r} – относительное расстояние от оси заряда:

$$\bar{r} = \frac{r}{R_{0з}^*} \quad (9)$$

Подставив (8) в (4), выражение для расчёта радиуса дробления цилиндрического заряда примет вид:

$$\bar{R}_{др}^ц = \left[\frac{1,1 \rho_{п} c_{п}}{2 [\sigma_{сдв}^{дин}]} (1 + c_1 + c_2 \bar{R}_{др}) \right]^{0,714} \quad (10)$$

3. Расчёт радиуса зоны трещинообразования

Размер зоны трещинообразования $R_{тр}$ определяют из выражения

$$\sigma_{\phi max}(\bar{R}_{тр}) \geq [\sigma_{отр}^{дин}] \quad (11)$$

где $\sigma_{\varphi \max}$ – максимальная амплитуда тангенциальной составляющей волны напряжений в фазе разряжения;

$[\sigma_{\text{отр}}^{\text{дин}}]$ – динамический предел прочности породы на отрыв.

Подставив в выражение (11) выражения (12)

$$\sigma_{r.\max} = \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \frac{545}{\bar{r}^{1,1}} \quad (12)$$

и (13)

$$\sigma_{\varphi.\max} = (c_1 + c_2 \bar{r}) \sigma_{r.\max} \quad (13)$$

определяем радиус зоны трещинообразования для цилиндрического заряда:

$$\bar{R}_{\text{тр}}^{\text{ц}} = \left[\frac{[\sigma_{\text{отр}}^{\text{дин}}]}{0,545 \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}} (c_1 + c_2 \bar{R}_{\text{тр}}^{\text{ц}}) \right]^{1/1,1} \quad (14)$$

Значения c_1 и c_2 являются безразмерными коэффициентами, зависящие от акустической жесткости породы, и определяются из выражений:

$$c_1 = 0,09 + 0,228 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}} \quad (15)$$

$$c_2 = (0,07 + 0,224 \cdot 10^{-7} \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}) \cdot 10^{-2} \quad (16)$$

Выражение (10) можно записать в виде:

$$\frac{1,1 \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}{\bar{R}_{\text{др}}^{1,4}} [1 - (c_1 + c_2 \bar{R}_{\text{др}})] = 2 [\sigma_{\text{сдв}}^{\text{дин}}] \quad (17)$$

Это уравнение решается графо-аналитическим способом. Зададимся двумя функциями:

$$F_1(\bar{R}_{\text{др}}) = \frac{1,1 \rho_{\text{п}} c_{\text{п}}}{\bar{R}_{\text{др}}^{1,4}} [1 - (c_1 + c_2 \bar{R}_{\text{др}})] \quad (18)$$

$$F_2(\bar{R}_{\text{др}}) = 2 [\sigma_{\text{сдв}}^{\text{дин}}] \quad (19)$$

Для построения графика функции $F_1(\bar{R}_{\text{др}})$ зададимся несколькими предполагаемыми значениями радиуса зоны дробления и вычисляем соответствующее значение функции. График $F_2(\bar{R}_{\text{др}})$ –

прямая линия, параллельная оси абсцисс. В точке пересечения находим искомый радиус зоны дробления.

Для расчёта радиуса зоны трещинообразования будем предполагать, что он определяется максимальной амплитудой тангенциальной составляющей волны напряжения и динамическим пределом прочности породы на отрыв:

$$\sigma_{\varphi.max} \geq [\sigma_{отр}^{дин}] \quad (20)$$

Динамический предел прочности определяются из выражения:

$$[\sigma_{отр}^{дин}] = K_{отр}^{дин} [\sigma_{отр}^{ст}] \quad (21)$$

где $K_{отр}^{дин}$ – коэффициент динамичности при определении прочности на отрыв:

$$K_{отр}^{дин} = 4,81 - 0,97 \cdot 10^{-11} \rho_{п} c_{п} \quad (22)$$

Для удлиненного заряда на расстоянии в диапазоне $12 \leq \bar{r} \leq 100$ значение радиальной составляющей волны напряжений соответствуют выражению (12), а тангенциальная составляющая волны напряжений соответствуют выражению (13).

Запишем выражение (20) в виде:

$$(c_1 + c_2 \bar{R}_{тр}) \rho_{п} c_{п} \frac{0,545}{\bar{R}_{тр}^{1,1}} = [\sigma_{отр}^{дин}] \quad (23)$$

или

$$\frac{(c_1 + c_2 \bar{R}_{тр})}{\bar{R}_{тр}^{1,1}} = \frac{[\sigma_{отр}^{дин}]}{0,545 \rho_{п} c_{п}} \quad (24)$$

Зададимся двумя функциями:

$$\begin{cases} F_1(\bar{R}_{тр}) = \frac{(c_1 + c_2 \bar{R}_{тр})}{\bar{R}_{тр}^{1,1}} \\ F_2(\bar{R}_{тр}) = \frac{[\sigma_{отр}^{дин}]}{0,545 \rho_{п} c_{п}} \end{cases} \quad (25)$$

Для построения графика $F_1(\bar{R}_{тр})$ задаемся несколькими предполагаемыми значениями радиуса зоны трещинообразования и вычисляем соответствующие значения функции.

График функции $F_2(\bar{R}_{\text{тр}})$ – прямая линия. В точке пересечения находим значение радиуса зоны трещинообразования.

Задание 1. Рассчитать максимальный радиус взрывной полости, остаточного давления в ней, радиус зоны дробления и зоны трещинообразования при взрывании заряда ВВ граммонита 30/70 в граните с $\rho_n = 2730 \text{ кг/м}^3$, в массиве скорость продольной волны $c_p = 5200 \text{ м/с}$, скорость поперечной волны $c_s = 3250 \text{ м/с}$, коэффициент Пуассона $\nu = 0,24$, коэффициент внутреннего трения $\mu_* = 2$, статический предел прочности на одноосное сжатие $[\sigma_{\text{сж}}^{\text{ст}}] = 140 \text{ МПа}$, статический предел прочности на сдвиг $[\sigma_{\text{сдв}}^{\text{ст}}] = 40 \text{ МПа}$, статический предел прочности на растяжение (отрыв) $[\sigma_{\text{отр}}^{\text{ст}}] = 11 \text{ МПа}$, модуль Юнга $E = 5,74 \text{ ГПа}$.

Плотность заряжения $\rho_{\text{ВВ}} = 900 \text{ кг/м}^3$, теплота взрыва $Q_{\text{ВВ}} = 4000 \text{ кДж/кг}$, скорость детонации $D_{\text{ВВ}} = 4000 \text{ м/с}$, диаметр заряда (скважины) $d = 0,22 \text{ м}$. $\sigma_{\text{сдв}}^0 = 60 \text{ МПа}$, $\sigma_{\text{сдв}}^p = 970 \text{ МПа}$.

Задание 2. Рассчитать максимальный радиус взрывной полости, остаточное давление в ней, радиус зоны дробления и зоны трещинообразования при взрывании заряда граммонита 79/21 в известняке с $\rho_n = 2920 \text{ кг/м}^3$ при следующих условиях:

$$c_p = 3480 \text{ м/с}$$

$$c_s = 2000 \text{ м/с}$$

$$\nu = 0,26$$

$$[\sigma_{\text{сж}}^{\text{ст}}] = 70 \text{ МПа}$$

$$[\sigma_{\text{сдв}}^{\text{ст}}] = 30 \text{ МПа}$$

$$[\sigma_{\text{отр}}^{\text{ст}}] = 3,7 \text{ МПа}$$

$$\mu_* = 1,2$$

$$\sigma_{\text{сдв}}^0 = 30 \text{ МПа}$$

$$\sigma_{\text{сдв}}^p = 870 \text{ МПа}$$

$$\rho_{\text{ВВ}} = 850 \text{ кг/м}^3$$

$$E = 2,17 \text{ ГПа}$$

$$Q_{\text{ВВ}} = 4300 \text{ кДж/кг}$$

$$D_{\text{ВВ}} = 3600 \text{ м/с}$$

$$d = 0,17 \text{ м}$$

ПРАКТИЧЕСКОЕ ЗАНЯТИЕ № 2
РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ВОЛН НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ВЗРЫВЕ
ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ (УДЛИНЕННЫХ) ЗАРЯДОВ

1. Для условий ближней зоны когда выполняется условие

$$(4 \div 6)R_{0з} < r < (12 \div 15)R_{0з} \quad (26)$$

где r – расстояние от оси (цилиндра) заряда до рассматриваемой точки; $R_{0з}$ – фактический радиус заряда.

Амплитуда массовой скорости:

$$V_{2max} = \frac{1100}{\bar{r}^{1.4}} \quad (27)$$

Напряжени радиальной составляющей волны напряжения (волны сжатия):

$$\sigma_{rmax} = \rho_{п} c_p \cdot \frac{1100}{\bar{r}^{1.4}} \quad (28)$$

где $\rho_{п}$ – плотность породы,

c_p – скорость распространения продольной волны,

\bar{r} – относительное расстояние от оси (центра) заряда до рассматриваемой точки.

$$\bar{r} = \frac{r}{R_{0з}^*} \quad (29)$$

$$R_{0з}^* = R_{0з} \left(\frac{\rho_{ВВ} \cdot Q_{ВВ}}{\rho_{ТЭН} \cdot Q_{ТЭН}} \right) \quad (30)$$

где $R_{0з}^*$ – эквивалентный радиус заряда

$\rho_{ВВ}$ и $Q_{ВВ}$ – плотность заряжания и теплота взрывчатого превращения

применяемого ВВ и тэна соответственно

λ – коэффициент; $\lambda = 0,5$ для цилиндрического заряда

Для средней зоны взрыва при условии $(12 \div 15)R_{0з} \leq r \leq (80 \div 150)R_{0з}$ максимальная амплитуда радиальной составляющей волны напряжения цилиндрического заряда определяется из выражения:

$$\sigma_{rmax}(\bar{r}) = \rho_{п} c_p \cdot \frac{545}{\bar{r}^{1.1}} \quad (31)$$

Максимальная амплитуда радиальной составляющей волны напряжения цилиндрического заряда определяется из выражения:

$$\sigma_{umax}(\bar{r}) = (c_1 + c_2\bar{r})\sigma_{rmax}(\bar{r}) \quad (32)$$

где c_1 и c_2 – безразмерные постоянные, зависящие от акустической жесткости породы

$$c_1 = 0.09 + 0.928 \cdot 10^{-7} \rho_n c_p \quad (33)$$

$$c_2 = -(0.07 - 0.224 \cdot 10^{-7} \rho_n c_p) 10^{-2} \quad (34)$$

Зависимость (31) справедлива до расстояний равных $r \leq 80R_{03}^*$

Для больших расстояний $r \leq 200R_{03}^*$ вычисление максимальной амплитуды радиальной составляющей волны напряжения производится по формуле:

$$\sigma_{rmax}(\bar{r}) = \rho_n c_p \cdot \frac{344}{\bar{r}^{1.5}} \quad (35)$$

Задание 1. Рассчитать параметры волн напряжений (амплитуду массовой скорости, величину радиальной и тангенциальной составляющей волны напряжения в ближней, средней и дальней зонах при взрыве цилиндрического заряда гранулотола в скважине $\emptyset 230$ мм в гранитном массиве.

Задание 2. Рассчитать параметры волн напряжений (амплитуду массовой скорости, величину радиальной и тангенциальной составляющей волны напряжения в ближней, средней и дальней зонах при взрыве цилиндрического заряда игданита в скважине $\emptyset 250$ мм в известняке.