

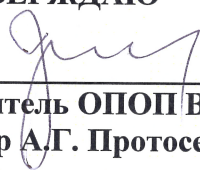
**ПЕРВОЕ ВЫСШЕЕ ТЕХНИЧЕСКОЕ УЧЕБНОЕ ЗАВЕДЕНИЕ РОССИИ**



**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 САМОСТОЯТЕЛЬНОГО  
ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ**

**МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ,  
АЭРОГАЗОТЕРМОДИНАМИКИ И НАПРАВЛЕНИЯ ИХ  
РАЗВИТИЯ**

<b>Уровень высшего образования:</b>	Подготовка кадров высшей квалификации
<b>Направление подготовки:</b>	21.06.01 Геология, разведка и разработка полезных ископаемых
<b>Направленность (профиль):</b>	Геомеханика, разрушение горных пород, рудничная аэрогазодинамика и горная теплофизика
<b>Форма обучения:</b>	очная
<b>Нормативный срок обучения:</b>	4 года
<b>Составитель:</b>	д.т.н., проф. А.Г. Протосеня

Санкт-Петербург

# 1. ГЕОМЕХАНИЧЕСКИЕ И ГЕОГАЗОДИНАМИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ПРИ ОСВОЕНИИ РУДНЫХ И НЕРУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

**1. Цель:** изучение методов оценки структурной нарушенности породного массива естественной трещиноватостью, а также прогноз изменения напряженно-деформированного состояния в окрестности горных выработок, расположенных в трещиноватых горных массивах.

## 2. Теоретические положения

Построение паспорта прочности на основании условия прочности Хока и Брауна. Критерий прочности горной породы Хока-Брауна в главных напряжениях имеет вид

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_{c,i} \left( m_i \frac{\sigma_3}{\sigma_{c,i}} + 1 \right)^{0.5}, \quad (20)$$

где  $\sigma_1$  - предельное значение главного максимального нормального напряжения соответствующего величине главного минимального нормального напряжения  $\sigma_3$ ;  $\sigma_3$  - главное минимальное нормальное напряжение;  $m_i$  - показатель формы огибающей прочности горной породы;  $\sigma_{c,i}$  - прочность горной породы в условиях одноосного сжатия.

Ориентировочно показатель прочности в зависимости от типа горной породы можно принять следующие (таблица 9).

Таблица 9 – Значение прочности горной породы для различных типов пород

Тип породы	Прочность на одноосное сжатие, МПа
Базальт, диабаз, гнейс, гранит, кварцит	>250
Амфиболит, песчаник, базальт, габро, гнейс, известняк, мрамор, туф	100 – 250
Известняк, мрамор, филит, песчаник, сланец,	50 – 100
Аргиллит, уголь, бетон, сланец, алевролит	25 – 50
Мел, каменная соль, поташ	5 – 25
Сильно выветрелые породы	1 – 5
Раздробленная порода	0.25 - 1

Значение показателя  $m_i$  обычно определяется на основании анализа данных лабораторных испытаний горной породы (трехосных испытаний) полученных в диапазоне изменение бокового давления от 0 до  $0.5\sigma_{c,i}$ .

При построении огибающей прочности в области действия сжимающих напряжений ( $\sigma_3 > 0$ ) величина показателя  $m_i$  ориентировочно может быть определена по таблице 10.

Таблица 10 – Значение показателя  $m_i$  для различных типов пород

Тип породы	Значение показателя $m_i$
Базальт	25±5
Мел	7±2
Аргиллит	4±2
Известняк	12±2
Диабаз	15±5
Габро	27±3
Гипс	8±2
Мрамор	9±3

Если в таблице 10 отсутствуют данные для конкретной горной породы величина показателя  $m_i$  может быть условно определена по следующей формуле

$$m_i = \frac{\sigma_{c.i.}}{\sigma_{t.i.}} \quad (21)$$

Для построение огибающей прочности по критерию прочности Хока и Брауна при действии растягивающих напряжений ( $\sigma_3 < 0$ ) величину показателя  $m_i$  связывается с величиной прочности горной породы на одноосное растяжение  $\sigma_{t.i}$  согласно уравнению (П2.9).

$$\sigma_{t.i} = \frac{\sigma_{c.i.}}{0.7m_i + 8.6} \quad (22)$$

Зная величину прочности на одноосное растяжения  $\sigma_{t.i}$  величину показателя  $m_i$  найдем как

$$m_i = \frac{\frac{\sigma_{c.i.}}{\sigma_{t.i.}} - 8.6}{0.7}$$

Коэффициент структурного ослабления  $\alpha$  определяется на основании исходных данных о прочности образца породы в условиях одноосного сжатия и степени трещиноватости породного массива (таблица 11, таблица 12)

Таблица 11 – Взаимосвязь между коэффициентом структурного ослабления  $\alpha$  и показателями прочности и структурной нарушенности породы

Категория массива скальных пород по степени трещиноватости	Коэффициент $\alpha$ при пределе прочности породы на сжатие (МПа)				
	10	20	40	80	160
I – практически не трещиноватые	1.7	1.4	1.2	1.1	1.0
II – малотрещиноватые	1.4	1.2	1.0	0.9	0.8
III – среднетрещиноватые	1.2	0.9	0.7	0.6	0.5
IV – сильнотрещиноватые	0.9	0.7	0.5	0.4	0.3
V – раздробленные	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1

Таблица 12– Категория пород в зависимости от трещиноватости

Трещинная пустотность, %	Категория пород при густоте трещин, м			
	очень редкой (более 1.0)	редкой (1.0 – 0.3)	густой (0.3 – 0.1)	очень густой (менее 0.1)
Малая – (менее 0.3)	I	II	III	IV
Средняя – (0.3 – 1.0)	II	III	IV	IV
Большая – (1.0 – 3.0)	III	IV	V	V
Очень большая – (более 3.0)	IV	V	V	V

Геомеханическая классификация породного массива по Бениавскому включает в себя 6 рейтинговых показателей, которые позволяют комплексно оценить развитие структурную нарушенность породного массива

$$RMR = J_{A1} + J_{A2} + J_{A3} + J_{A4} + J_{A5} + J_B, \quad (23)$$

где  $J_{A1}$  – показатель который зависит от прочности породы в условиях одноосного сжатия;  $J_{A2}$  – показатель который зависит от значения показателя  $RQD$ ;  $J_{A3}$  – показатель который зависит от расстояния между трещинами;  $J_{A4}$  – показатель учитывающий качество контакта по трещинам;  $J_{A5}$  – показатель, учитывающий обводненность трещин;  $J_B$  – показатель учитывающий направление трещиноватости.

Таблица 13 – Показатель ( $J_{A1}$ ) критерия  $RMR$  характеризующий прочность горной породы на одноосное сжатие

Индекс прочности при точечном нагружении, МПа	Предел прочности на одноосное сжатие, МПа	Показатель $J_{A1}$
> 10	более 250	15
4 – 10	100 – 250	12
2 – 4	50 – 100	7
1 – 2	25 – 50	4
-	5 – 25	2
-	1 – 5	1
-	менее 1	0

Таблица 14 – Показатель ( $J_{A2}$ ) критерия  $RMR$  характеризующий качество горной породы согласно индексу  $RQD$

Качественное описание горной породы	Качество по керну $RQD$ , %	Показатель $J_{A2}$
Отличное	90 – 100	20
Хорошее	75 – 90	17
Нормальное	50 – 75	13
Плохое	25 – 50	8
Очень плохое	менее 25	3

Таблица 15 – Показатель ( $J_{A3}$ ) критерия  $RMR$  характеризующий интенсивность трещиноватости породного массива

Качественное описание интенсивности трещиноватости (расстояние между трещинами)	Расстояние между трещинами, м	Рейтинг $J_{A3}$
очень значительное	> 2	20
значительное	0.6 – 2	15
среднее	0.2 – 0.6	10
малое	0.06 – 0.2	8
очень малое	< 0.06	5

Таблица 16 – Показатель ( $J_{A4}$ ) критерия  $RMR$  характеризующий характер трещиноватости породного массива

Описание характера трещины	Рейтинг $J_{A4}$
Очень шероховатые невыветрелые породы. Трещины плотно закрыты или отсутствуют.	30
Шероховатые и слегка выветрелые породы, отдельности до 1 мм	25
Слегка шероховатые и от средне до весьма выветрелые породы, отдельности до 1 мм	20
Гладкие поверхности, отдельности 1 -5 мм, заполненные набухающим материалом	10
Толщина набухающего слоя 5 мм, отдельности 5 мм	0

Таблица 17 – Показатель ( $J_{A5}$ ) критерия  $RMR$  характеризующий условия обводненности породного массива

Приток воды на 10 м длины тоннеля, л/мин	Давление воды в трещине/главные максимальные напряжения	Общее описание	Рейтинг $J_{A5}$
отсутствует	0	полностью сухие	15
< 10	0 – 0.1	влажные	10
10 – 25	0.1 – 0.2	мокрые	7
25 – 125	0.2 – 0.5	капез	4
> 125	> 0.5	приток	0

Таблица 18 – Показатель ( $J_B$ ) критерия  $RMR$  характеризующий ориентацию трещин относительно тоннеля

Ориентация трещин относительно тоннеля	Рейтинг $J_B$
Очень благоприятная	0
Благоприятная	-2
Относительно благоприятная	-5
Неблагоприятная	-10
Весьма неблагоприятная	-12

После определения рейтинга по каждому отдельному фактору, по формуле (П4.1) определяет значение критерия  $RMR$ . По величине критерия  $RMR$  можно определить устойчивость породного массива, среднее время устойчивого состояния обнажения, а также прочностные показатели породного массива (таблица 19).

Таблица 19 – Показатели устойчивости породного массива на основании критерия  $RMR$

Параметры/свойства породного массива	Величина критерия $RMR$				
	100 – 81	80 – 61	60 – 41	40 – 21	< 20

Категория устойчивости	I	II	III	IV	V
Классификация горных пород по устойчивости	очень устойчивые	устойчивые	средне устойчивые	неустойчивые	весьма неустойчивые
Среднее время устойчивого состояния	10 лет, пролет до 15 м	6 месяцев, пролет до 8 м	1 неделя, пролет до 5 м	10 часов, пролет до 2.5 м	30 минут, пролет до 1 м

В работе Бениявского представлены рекомендации по крепления горных выработок на основании величины критерия *RMR* представлены в табличном виде (таблица 20). Необходимо отметить, что представленные рекомендации получены для тоннеля подковообразного поперечного сечения шириной не более 10 м при величине вертикальных напряжений до 25 МПа и проведением горной выработки по буровзрывной технологии, поэтому должны рассматриваться как предварительные.

Таблица 20 – Рекомендации по креплению тоннелей на основании величины критерия *RMR*

Величина критерия <i>RMR</i>	Рекомендуемый метод строительства	Крепление		
		Анкера	Набрызгбетон	Металлические арки
100 – 81	Разработка породы на полное сечение тоннеля. Величина заходка – 3.0 м	В общем случае крепление не выполняется, за исключением крепления отдельных участков анкерной крепью		
80 – 61	Разработка породы на полное сечение тоннеля. Величина заходки 1.0 – 1.5 м. Установка постоянного крепление на расстоянии 20 м от лба забоя тоннеля.	Локальная установка анкерной крепи в кровлю выработки длиной 3 м, с шагом 2.5 м. В отдельных случаях устанавливается металлическая сетка.	50 мм в своде тоннеля в локальных участках	-
60 – 41	Разработка породы по двух уступной схеме. Величина заходки 1.5 – 3.0 м. Крепление выполняется после каждой заходки. Установка постоянного крепления на расстоянии 10 м от лба забоя тоннеля.	Систематическая установка анкеров длиной 4 м, шагом 1.5 – 2.0 м в кровле тоннеля и боках тоннеля. Установка металлической сетки в своде тоннеля.	50 – 100 мм в своде тоннеля и 30 мм в боках тоннеля.	-

40 – 21	<p>Разработка породы по двух уступной схеме. Величина заходки 1.5 – 3.0 м. Крепление выполняется после каждой заходки. Установка постоянного крепления на расстоянии 10 м от лба забоя тоннеля.</p>	<p>Систематическая установка анкеров длиной 4 – 5 м, шагом 1.0 – 1.5 м в своде и боках с установкой металлической сетки.</p>	<p>100 – 150 мм в своде тоннеля и 100 мм в боках</p>	<p>Легкие стальные рамы с шагом установки 1.5 м (по расчету)</p>
< 20	<p>Разработка сечения тоннеля многочисленными штольнями. Величина заходки при разработке верхней части тоннеля 0.5 – 1.5 м. Установка крепи непосредственно после заходки. Нанесение набрызгбетона на породное обнажение сразу же после ведения взрывных работ.</p>	<p>Систематическая установка анкеров длиной 5 – 6 м, шаг расстановки 1.0 – 1.5 м в своде и боках тоннеля с установкой металлической сетки. Установка анкеров в обратный свод.</p>	<p>150 – 200 мм в кровле, 150 мм в боках и 50 мм на лоб забоя</p>	<p>Рамы или арки средней/высокой несущей способности шагом 0.75 м. Передовое крепление лба забоя. Установка обратного свода.</p>

Показатель  $RQD$  определяется на основании изучения керна породы извлекаемого из скважины. Если такие данные отсутствуют, что встречается достаточно часто на тех производствах где в программу инженерно-геологических испытаний не включены требования по определению данного показателя, можно воспользоваться эмпирическими методиками для его определения.

Значение  $RQD$  можно определить по следующей формуле

$$RQD = 100e^{-0.1\lambda}(0.1\lambda + 1), \quad (24)$$

где  $\lambda$  – среднее количество трещин на 1 м длины породного массива.

Также, значение  $RQD$  определяется через объемный показатель трещиноватости породного массива  $J_v$ , который характеризует количество трещин, пересекающих 1 м<sup>3</sup> объема породного массива.

$$RQD = 110 - 2.5J_v. \quad (25)$$

Геомеханическая классификация породного массива  $Q$  разработанная Бартоном в период с 1971 по 1974 г. в первую очередь предназначена для оценки устойчивости породных обнажений, располагаемых в различных горно-геологических условиях. Показатель  $Q$  рассчитывается на основании 6 параметров характеризующих структурную

нарушенность породного массива. На основании полученной величины показателя  $Q$  можно предварительно определить тип крепи и параметры крепи необходимые для рассматриваемых условий. Таким образом, геомеханическая классификация породного массива  $Q$  (далее рейтинговая система  $Q$ ) может быть использована в качестве вспомогательного инструмента при обосновании типа и параметров крепи, а также является эффективным инструментом для описания структурной нарушенности породного массива. Изначально, рейтинговая система  $Q$  разрабатывалась таким образом, чтобы определять значения параметров, входящих в нее на основании визуального осмотра и замеров, проводимых непосредственно в породном обнажении. Однако допускается их определение и на основании обработки kernового материала, получаемого при инженерно-геологических изысканиях.

Значение показателя  $Q$  изменяется в диапазоне от 0.001 до 1000. Меньшее значение соответствует меньшей устойчивости породного обнажения, в то время как его увеличению говорит о повышении устойчивости породного обнажения. Показатель  $Q$  определяется по следующей зависимости

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \frac{J_r}{J_a} \frac{J_w}{SRF}, \quad (26)$$

где  $RQD$  – показатель качества горной породы ( $RQD$  – rock quality designation);  $J_n$  – показатель количества систем трещин;  $J_r$  – показатель шероховатости трещины;  $J_a$  – показатель трансформации контактных условий по трещине;  $J_w$  – показатель учитывающий влияние обводненности трещины на условие контакта по трещине;  $SRF$  – показатель учитывающий соотношение между напряжениями, действующими в породном массиве и прочностью породы.

Таблица 21 – Рекомендации по определению показателя  $J_n$

Класс породного массива	Описание трещиноватости породного массива	Значение показателя $J_n$
A	Трещиноватость породного массива отсутствует или наблюдается несколько неориентированных трещин	0.5 – 1
B	Одна система трещин	2
C	Одна система трещин и несколько хаотично ориентированных трещин	3
D	Две системы трещин	4
E	Две системы трещин и несколько хаотично ориентированных трещин	6
F	Три системы трещин	9
G	Три системы трещин и несколько хаотично ориентированных трещин	12
H	Четыре или более систем трещин или хаотичная ориентация трещин	15
J	Раздробленная или перемятая порода	20

Примечание: для сопряжения горных выработок значение  $J_n$  принимается равным  $3J_n$  для порталных участков значение  $J_n$  принимается равным  $2J_n$

Таблица 22 – Рекомендации по определению показателя  $J_r$

Класс породного массива	Описание условия контакта по трещине	Значение показателя $J_r$
-------------------------	--------------------------------------	---------------------------



A	Прерывная (не сплошная) трещиноватость	4
B	Шероховатая, неруглярная, волнистая поверхность трещины	3
C	Гладкая, волнистая поверхность трещины	1
D	Скользкая, волнистая поверхность трещины	1.5
E	Шероховатая, нерегулярная, плоская поверхность трещины	1.5
F	Гладкая, плоская поверхность трещины	1
G	Скользкая, плоская поверхность трещины	0.5
H	Трещина заполнена глинистым материалом препятствующим возникновению контакта между стенок породного массива при сдвиге	1

Таблица 23 – Рекомендации по определению показателя  $J_w$

Класс породного массива	Описание условия обводненности трещин	Значение показателя $J_w$
A	Породный массив в окрестности породного обнажения сухой или наблюдается незначительный приток воды через несколько трещин	1.0
B	Приток воды в породное обнажение средней интенсивности, нерегулярное вымывание заполнителя трещин, приток воды происходит через несколько трещин	0.66
C	Высокое давление подземных вод, которое проявляется в виде интенсивного притока воды в породное обнажение через незаполненные минералами трещины	0.5
D	Большой приток воды в породное обнажение сопровождающееся вымыванием минеральных частиц из трещин	0.33
E	Очень значительный мгновенный приток или высокое мгновенное давление подземных вод который/ое уменьшается со временем и сопровождается вымыванием минеральных частиц из трещин, а также отдельных фрагментов породного массива	0.2-0.1
F	Очень значительный мгновенный приток или высокое мгновенное давление подземных вод который/ое не уменьшается со временем и сопровождается вымыванием минеральных частиц из трещин, а также отдельных фрагментов породного массива	0.1-0.05

Таблица 24 – Рекомендации по определению показателя  $J_a$

Класс породного массива	Описание условия контакта по трещине	Ориентировочное значение угла внутреннего трения $\varphi_r$	Значение показателя $J_a$
Контактное взаимодействие между стенками трещины реализуется напрямую (трещины не запылены минералами)			
A	Плотно закрытая трещина, твердая, непроницаемая	-	0.75
B	Трещина без видимых изменений, незначительное поверхностное изменение текстуры	25-35	1

C	Незначительно изменённая поверхность стенок трещины. Поверхность стенок покрыта не размыкаемыми минералами. Внутри трещины наблюдаются отдельные частички песка, дезинтегрированной породы без наличия глинистых частиц	25-30	2
D	Поверхность трещин покрыта суглинистыми и супесчаными частицами. Внутри трещины наблюдается небольшое количество глинистых включений.	20-25	3
E	Поверхность трещин покрыта размягчаемыми минералами или глинистыми частицами характеризующимися малым трением. Внутри трещины могут присутствовать частицы гипса, графита, хлорита и др. минералов, а также небольшие включения набухающей глины	8-16	4
Контактное взаимодействие между стенками трещины реализуется .. (трещина заполнена тонким слоем минерального заполнителя)			
F	Трещины заполнены песчаными частицами и дезинтегрированной породой, глинистые частицы отсутствуют	25-30	4
G	Трещины заполнены сильно литифицированной не размягчаемой глиной толщиной не более 5 мм	16-24	6
H	Трещины заполнены слабо или средне литифицированной глиной толщиной не более 5 мм	12-16	8
J	Трещины заполнены набухающей глиной содержащей минералы монтмориллонита толщиной не более 5 мм. Величина показателя $J_a$ варьируется от процентного содержания набухающих глинистых частиц	6-12	8-12
Контактное взаимодействие между стенками трещины отсутствует (трещина заполнена толстым слоем минерального заполнителя)			
K	Зоны или полосы породного массива, состоящие из дезинтегрированной или разрушенной породы. Трещины заполнены сильно литифицированной глиной	16-24	6
L	Зоны или полосы породного массива, состоящие из дезинтегрированной или разрушенной породы или полностью из глинистой породы. Трещины заполнены средне или слабо литифицированной глиной	12-16	8
M	Полосы породного массива, состоящие из дезинтегрированной или разрушенной породы или разрушенной породы или полностью из глинистой породы. Трещины заполнены набухающей глиной. Величина показателя $J_a$ варьируется от процентного содержания набухающих глинистых частиц	6-12	8-12
N	Мощные протяженные зоны или полосы сильно литифицированных глинистых пород	12-16	10

О	Мощные протяженные зоны или полосы средне и слабо литифицированных глинистых пород	12-16	13
Р	Мощные протяженные зоны или полосы набухающих глинистых пород. Величина показателя $J_a$ варьируется от процентного содержания набухающих глинистых частиц	6-12	13-20

Таблица 25 – Рекомендации по определению показателя  $SRF$

Класс породного массива	Описание	$\sigma_{c,i}/\sigma_1$	$\sigma_\theta/\sigma_{c,i}$	$SRF$
а) Зоны ослабления пересекающие породное обнажения и могущие стать причиной обрушения породной массы				
А	Множественные зоны ослабления содержащие глинистые породы или химически дезинтегрированные породы или протяженные секции слабых неустойчивых пород	-	-	10
В	Множественные зоны значительной структурной нарушенности породного массива по длине породного обнажения чередующиеся с зонами монолитных пород или несильно трещиноватых пород с отсутствием глинистого заполнителя	-	-	7.5
С	Единичная зона ослабленных пород заполненная или не заполненная глинистой породой или химически дезинтегрированной породой (глубина от поверхности менее 50 м)	-	-	5
Д	Сильно нарушенный породный массив, открытая трещиноватость, условия контакта по трещинам не благоприятное	-	-	5
Е	Единичная зона ослабленных пород заполненная или не заполненная глинистой породой или химически дезинтегрированной породой (глубина от поверхности не менее 50 м)	-	-	2.5
Примечание: значение показателя $SRF$ необходимо снизить на 25-50% если зона ослабления не пересекает породное обнажение, а только оказывает влияние на геомеханическое состояние породного обнажения				
б) Монолитные, в основном нетрещиноватые и слабо трещиноватые породы, проблемы с устойчивостью которых могут быть вызваны действием напряженного состояния				
Ф	Напряженность породного массива низкая, отдельные трещины находятся в открытом состоянии	> 200	< 0.01	2.5
Г	Напряженность породного массива средняя, благоприятное распределение напряжений в окрестности породного обнажения	200 – 10	0.01 – 0.3	1
Н	Напряженность породного массива высокая. Обычно направление действия напряжений благоприятное относительно трещиноватости породного массива.	10 – 5	0.3 – 0.4	0.5 – 2 2 – 5*
Ж	Наблюдается шелушение или стреляние породы средней интенсивности, которое может сопровождаться раскалывание и последующим	5 – 3	0.5 – 0.65	5 – 50

	отслоением породы от породного массива примерно через 1 час после обнажения			
К	Наблюдается интенсивное стреляние и динамическое заколообразование непосредственно через несколько минут после обнажения. Может сопровождаться низкоэнергетическим горным ударом	3 – 2	0.65 – 1	50 – 200
L	Наблюдается высокоэнергетический горный удар и мгновенное динамическое деформирование породного массива сразу после обнажения	< 2	> 1	200 – 400
Примечание: для породного массива расположенного в сильно анизотропном начальном поле напряженного состояния применить следующие корректировки: значение $\sigma_{c.i}$ снизить до $0.75\sigma_{c.i}$ если $5 \leq \sigma_1/\sigma_3 \leq 10$ ; значение $\sigma_{c.i}$ снизить до $0.5\sigma_{c.i}$ если $\sigma_1/\sigma_3 > 10$				
в) Породы склонные к большим пластическим деформациям в условиях значительной величины начальных напряжений породного массива				
М	Напряженное состояние породного массива таково, что приводит к ограниченному развитию больших пластических деформаций породного массива в окрестности породного обнажения	-	1-5	5 – 10
N	Напряженное состояние породного массива таково, что приводит к значительному развитию больших пластических деформаций породного массива в окрестности породного обнажения	-	> 5	10 – 20
г) Породные склонные к химическому пучению за счет изменения их естественной влажности				
О	Породы проявляющие ограниченное пучение при изменении их естественной влажности	-	-	5 – 10
P	Породы проявляющие значительное пучение при изменении их естественной влажности	-	-	10 – 15

Примечание:  $\sigma_1$  – главное максимальное нормальное напряжение;  $\sigma_3$  – главное минимальное нормальное напряжение;  $\sigma_\theta$  – максимальное значение тангенциального нормального напряжения на контуре породного обнажения (оценка напряжения на контуре породного обнажения выполняется на основании теории упругости);  $\sigma_{c.i}$  – прочность ненарушенной породы в условиях одноосного сжатия.

На основании шести параметров входящих в уравнение 26 можно количественно определить три основных показателя определяющих устойчивость породного обнажения в структурно-нарушенной среде:  $RQD/J_n$  – показатель степени трещиноватости породного массива;  $J_r/J_a$  – показатель характеризующий состояние поверхности ослабления;  $J_w/SRF$  – показатель характеризующий напряженное состояние породного массива.

Согласно Бартону в зависимости от величины показателя  $Q$  породный массив можно классифицировать следующим образом (таблица 27).

Таблица 27 – Классификация породного массива в зависимости от величины показателя  $Q$

Класс породного массива	Описание породного массива	Значение показателя $Q$
А	Невероятно хорошее состояние	400 – 1000
	Экстремально хорошее состояние	100 – 400
	Очень хорошее состояние	40 – 100
В	Хорошее состояние	10 – 40
С	Среднее состояние	4 – 10

D	Плохое состояние	1 – 4
E	Очень плохое состояние	0.1 – 1
F	Экстремально плохое состояние	0.01 – 0.1
G	Невероятно плохое состояние	0.001 – 0.01

По величине показателя  $Q$  можно предварительно выбрать тип крепления и параметры временной крепи и постоянной обделки тоннеля (рисунок П5.1).

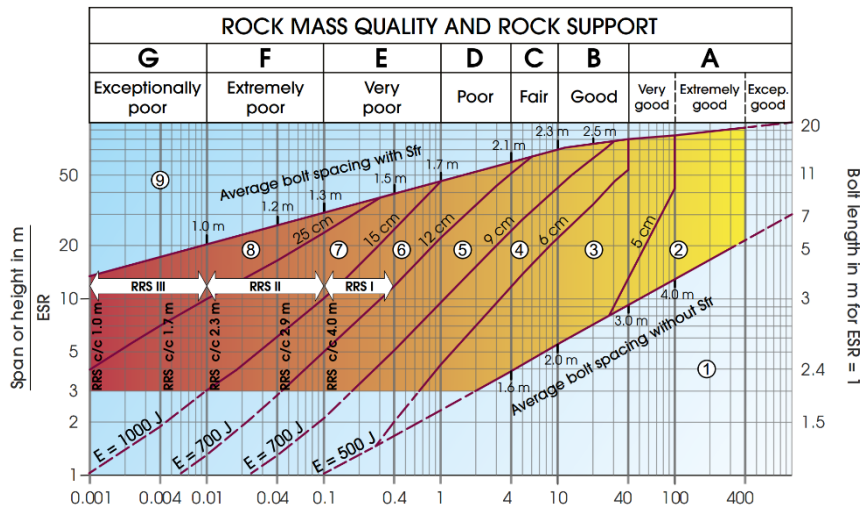


Рисунок 7 – Рекомендации по предварительному выбору параметров временной крепи и постоянной обделки тоннеля:

① - незакрепленная или точечное (локальное) анкерное крепление; ② - точечное анкерное (локальное) крепление (АК); ③ - систематическое анкерное крепление (АК), дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 5-6 см (ДН); ④ - дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 6-9 см (класс по энергии разрушения не менее E500) и анкерное крепление; ⑤ - дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 9-12 см (класс по энергии разрушения не менее E700) и анкерное крепление; ⑥ - дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной 12-15 см (класс по энергии разрушения не менее E500), армированные (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонные арки и анкерное крепление; ⑦ - дисперсно-армированный набрызгбетон толщиной более 15 см (класс по энергии разрушения не менее E1000), армированные (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонные арки и анкерное крепление; ⑧ - монолитная железобетонная крепь или дисперсно-армированная набрызгбетонная крепь (класс по энергии разрушения не менее E1000) совместно с армированными (гибкая или жесткая арматура) набрызгбетонными арками и анкерным креплением; ⑨ - данные условия требуют специального рассмотрения

### 3. Задание:

Рассматривается сооружение подземной горной выработки в породном массиве, нарушенном естественной трещиноватостью. Необходимо выполнить анализ геомеханической обстановки в окрестности сооружаемой горной выработки, который заключается в обработке результатов инженерно-геологических изысканий с целью получения параметров необходимых для выполнения последующих расчетов.

### 4. Порядок проведения работы:

1. На основании горно-геологических условий по трассе строительства горной выработки выбираются участки с типовыми условиями (по вмещающим породам, структурной нарушенности пород, глубине заложения). Отдельное внимание уделяется участкам пересечения горной выработкой разломов, тектонических нарушений, зон значительной раздробленности пород.

2. Для каждого принятого к расчету участка выполняется оценка физико-механических характеристик пород и породного массива, которая включает:

- построение паспортов прочности на основании условия парности Кулона-Мора, Протодяконова, Хока и Брауна. Выполняется сравнение паспортов прочности пород, полученных на основании трех принятых условий прочности, и определяется область их эффективного применения для выполнения прогноза геомеханических процессов в окрестности породного обнажения. На основании полученных данных выполняется определение зоны хрупкого разрушения пород, если такое условие потери устойчивости свойственно рассматриваемому участку строительства;

- выполняется оценка структурной нарушенности породного массива по методике СП 122.13330.2012 и методикам, предложенным в работах Бениавского (рейтинговая система RMR) и Бартон (рейтинговая система Q). Оценка структурной нарушенности пород по методикам Бениавского и Бартон используется для обоснования коэффициента структурного ослабления породного массива и предварительного выбора параметров временной крепи и постоянной обделки. На основании методики представленной в СП 122.13330.2012 осуществляется определение статической нагрузки на момент эксплуатации постоянной обделки и выполняется проверка ее несущей способности.

### **5. Исходные данные:**

В качестве исходных данных задаются:

- инженерно-геологический разрез по трассе горной выработки, который включает геометрический профиль участка строительства, линии разделяющие инженерно-геологические элементы (ИГЭ) между собой;

- физико-механические свойства пород ненарушенного сложения (плотность, модуль деформации, коэффициент поперечных деформаций, прочность в условиях одноосного сжатия, прочность в условиях одноосного растяжения) для каждого ИГЭ, которые встречаются по трассе;

- гидрогеологические условия (естественное положение уровня подземных вод, изменение уровня подземных вод на участке ведения строительных работ, в призабойной зоне горной выработки);

- показатели структурной нарушенности породного массива, которые включают количество систем трещин, интенсивность трещиноватости, качество контакта между стенками трещин, наличие заполнения трещин другими минералами или породами, условия обводненности трещин и т.д.);

- геометрические параметры горной выработки и её расположение в представленных инженерно-геологических условиях.

## 2. МЕТОДОЛОГИЯ И ПРИКЛАДНЫЕ ЗАДАЧИ ГЕОМЕХАНИКИ И ГЕОГАЗОДИНАМИКИ ПРИ ОСВОЕНИИ ПОДЗЕМНОГО ПРОСТРАНСТВА МЕГАПОЛИСОВ

**1. Цель:** освоение методики определения геомеханически безопасной величины давления активного пригруза забоя при строительстве тоннелей с применением ТПМК в условиях плотной городской застройки.

### 2. Теоретические положения:

При строительстве подземных сооружений в сложных горно-геологических и гидрогеологических условиях, особенно в условиях плотной городской застройки, в настоящее время, как правило, используются тоннелепроходческие механизированные комплексы (ТПМК) с различными видами пригруза забоя.

Проходка с использованием ТПМК с пригрузом забоя позволяет получить высокие скорости проходки при строительстве в сложных инженерно-геологических условиях за счет высокой степени механизации труда проходчиков. Другим очевидным преимуществом такой технологии строительства является возможность избежать потери устойчивости забоя в процессе проходки тоннеля за счет его постоянного подпора силой пригруза, которая может создаваться различными способами (грунтопригруз, гидропригруз, пенопригруз и другие).

При правильном выборе типа и давления пригруза можно добиться полной компенсации смещений плоскости забоя внутрь выработки, что позволит избежать оседаний поверхности, т.е. позволит создать практически безосадочную технологию строительства при условии наличия достаточно жесткой системы крепления протяженной части тоннеля.

Условно всю массу методик прогноза оседаний земной поверхности и рациональных величин пригруза забоя в научных работах можно разделить на четыре группы по признаку применяемого подхода к прогнозу размеров области значительных неупругих (т.е. пластических и/или реологических) деформаций во вмещающем грунтовом массиве:

- группа аналитических методик – прогноз размеров зоны значительных неупругих деформаций выполняется аналитически, как правило без учета сдерживающего влияния давления пригруза, а пригруз забоя рассматривается как нагрузка, которая должна удерживать от обрушения объем грунта в пределах зоны значительных неупругих деформаций;
- группа эмпирических методик – расчет оседаний земной поверхности и рациональной величины давления пригруза забоя выполняется на основании эмпирических зависимостей, которые выводятся на основании анализа большого объема результатов натурных наблюдений;
- группа экспериментальных методик - расчет оседаний земной поверхности и рациональной величины давления пригруза забоя выполняется на основании эмпирических зависимостей, которые выводятся на основании физического моделирования проходки тоннеля с помощью ТПМК с активным пригрузом забоя;
- группа численных методик - прогноз размеров зоны значительных неупругих деформаций выполняется на основании численного моделирования с использованием метода конечных элементов (FEM), метода отдельных элементов (DEM) или любого другого, что позволяет выполнять прогноз изменения размеров этой зоны и оседаний земной поверхности с учетом упрочняющего действия давления пригруза.

Аналитические методики в значительной степени базируются на концепции потери устойчивости грунтового массива впереди лба забоя тоннеля, сформулированной в работах Horn. Они обладают важным свойством универсальности решений, а потому трудоемкость их практической реализации является наименьшей, но в то же время они не учитывают массу важных особенностей технологии строительства тоннеля, а потому их следует использовать только для расчетов в первом приближении, а также для проверки.

Эмпирические методики просты в практическом использовании, но дают достоверные результаты только в конкретных инженерно-геологических и

технологических условиях строительства тоннеля, для которых они были разработаны. Во многом эта группа методик развивалась в работах Broms и Bennermark. Создание таких методик представляется чрезвычайно трудоемким, т.к. сопряжено с необходимостью накопления большого объема данных натуральных наблюдений, без которых получаемые формулы не будут являться репрезентативными.

Экспериментальные методы базируются на использовании результатов физического моделирования с применением основных зависимостей теории подобия. Для реализации такого подхода необходимо достаточно сложное и дорогостоящее лабораторное оборудование (к примеру, центрифуги), а решения, получаемые на основании физического моделирования, очевидно не являются универсальными. Огромным преимуществом такого подхода является принципиальная возможность смоделировать аварийную ситуацию в тоннеле, сопровождающуюся потерей устойчивости лба забоя и наглядно наблюдать процессы деформирования грунтового массива в окрестности призабойной части тоннеля после обрушения породного обнажения.

Численные методы базируются на использовании результатов математического моделирования с применением различных численных методов. Такой подход позволяет получить решение задачи прогноза напряженно-деформированного состояния грунтового массива в окрестности призабойной части тоннеля при его проходке с применением ТПК с активным пригрузом забоя на основании схемы взаимодействия.

В результате анализа аварийных ситуаций, возникающих при строительстве тоннелей тоннелепроходческими комплексами с активным пригрузом забоя в различных инженерно-геологических условиях, были выявлены основные технологические факторы, которые имеют определяющее влияние на формирование мульды оседаний земной поверхности в области подработки тоннелем. К этим факторам следует отнести:

- давление нагнетания тампонажного раствора, который нагнетается за кольца тоннельной обделки, сходящие с хвостовой оболочки щитового комплекса на породный контур. Это давление создаёт отпор свободным смещениям породного контура в пределах зазора между породным контуром и внешним контуром тоннельной обделки;

- давление активного пригруза забоя тоннеля. Это давление создает отпор свободным смещениям плоскости забоя тоннеля в направлении выработанного пространства и препятствует потере устойчивости лба забоя тоннеля. В зависимости от типа пригруза может на модели представляться в виде равномерно распределенной (равномерного давления силы по площади забоя) или в виде неравномерно распределенной нагрузки;

- уменьшение объема тоннеля вследствие уменьшения площади его поперечного сечения из-за свободных смещений породного контура в пределах зазора между диаметром резания исполнительного органа тоннелепроходческого комплекса и внешним диаметром его хвостовой оболочки (т.е. из-за фактической конусности формы щита).

Формирование значительной мульды оседания земной поверхности также возможно вследствие разрушения колец обделки тоннеля, а также из-за возможных технологических ошибок, совершаемых при непосредственном ведении проходческих работ, и проявления непредсказуемых природных явлений (наличие по трассе тоннеля различных неоднородностей в массиве вмещающих пород, пльвунов, напорных подземных вод, тектонических нарушений и т.д.), которые не были выявлены при проведении инженерно-геологических и гидрогеологических изысканий. Однако, эти факторы закладывать в прогнозную мульду оседания не представляется целесообразным, поскольку их появление не связано со штатными ситуациями, а связано с ошибочностью принятых проектных решений на более ранних стадиях проработки проекта, нарушениями технологии строительства из-за недостаточной квалификации непосредственных исполнителей проходческих работ или с форс-мажорными обстоятельствами.

Многовариантное численное моделирование следует выполнять в пространственной постановке с использованием упругопластических и вязко-упругопластических



геомеханических моделей для описания механического поведения массива грунтов. При наличии у грунтового массива анизотропии деформационных и прочностных свойств следует ее учитывать посредством использования соответствующих анизотропных моделей сред.

Фактическое изменение деформационно-прочностных свойств грунтового массива по глубине следует учитывать при моделировании непосредственно, задавая их изменение в виде функциональных зависимостей деформационно-прочностных характеристик модели среды от глубины заложения. Основные параметры этих функциональных зависимостей следует определять на основании изучения результатов лабораторных испытаний образцов грунтов при различных видах напряженных состояний и натурных наблюдений за геологоразведочными скважинами.

При наличии напорных или безнапорных подземных вод их следует учитывать при выполнении прогноза параметров мульды оседания земной поверхности посредством соответствующих математических моделей, имеющихся в используемом для многовариантного численного моделирования программном комплексе. Следует учитывать взвешивающее действие вод, их избыточное давление при наличии, стремление к фильтрации подземных вод при извлечении массива в пределах контура строящегося тоннеля в выработанное пространство и особенности отжима воды из пор грунта при механическом воздействии (дренированное и недренированное поведение). Механическое поведение влажного и водонасыщенного грунта, а также его физико-механические свойства изучаются на основании лабораторных испытаний, а параметры подземных вод – на основании гидрогеологических изысканий и при многовариантном моделировании задаются соответствующими полученным в результате выполнения такого комплекса исследований.

В случае значительно изменяющейся топографии в пределах изучаемой области земной поверхности, подвергающейся подработке при строительстве тоннеля, особенно в части значительных перепадов высотных отметок, следует при моделировании использовать реальную полученную по результатам топографической съемки местности геометрию земной поверхности. Это позволяет корректно спрогнозировать параметры естественного напряженного состояния и в последствии более корректно описать распределение вертикальных оседаний при строительстве тоннеля, особенно на относительно малых глубинах заложения.

Методику определения геомеханически безопасной величины давления активного пригруза забоя при строительстве тоннелей с применением ТПМК в условиях плотной городской застройки на основе многовариантного моделирования в виде основных этапов и их результатов можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 8.

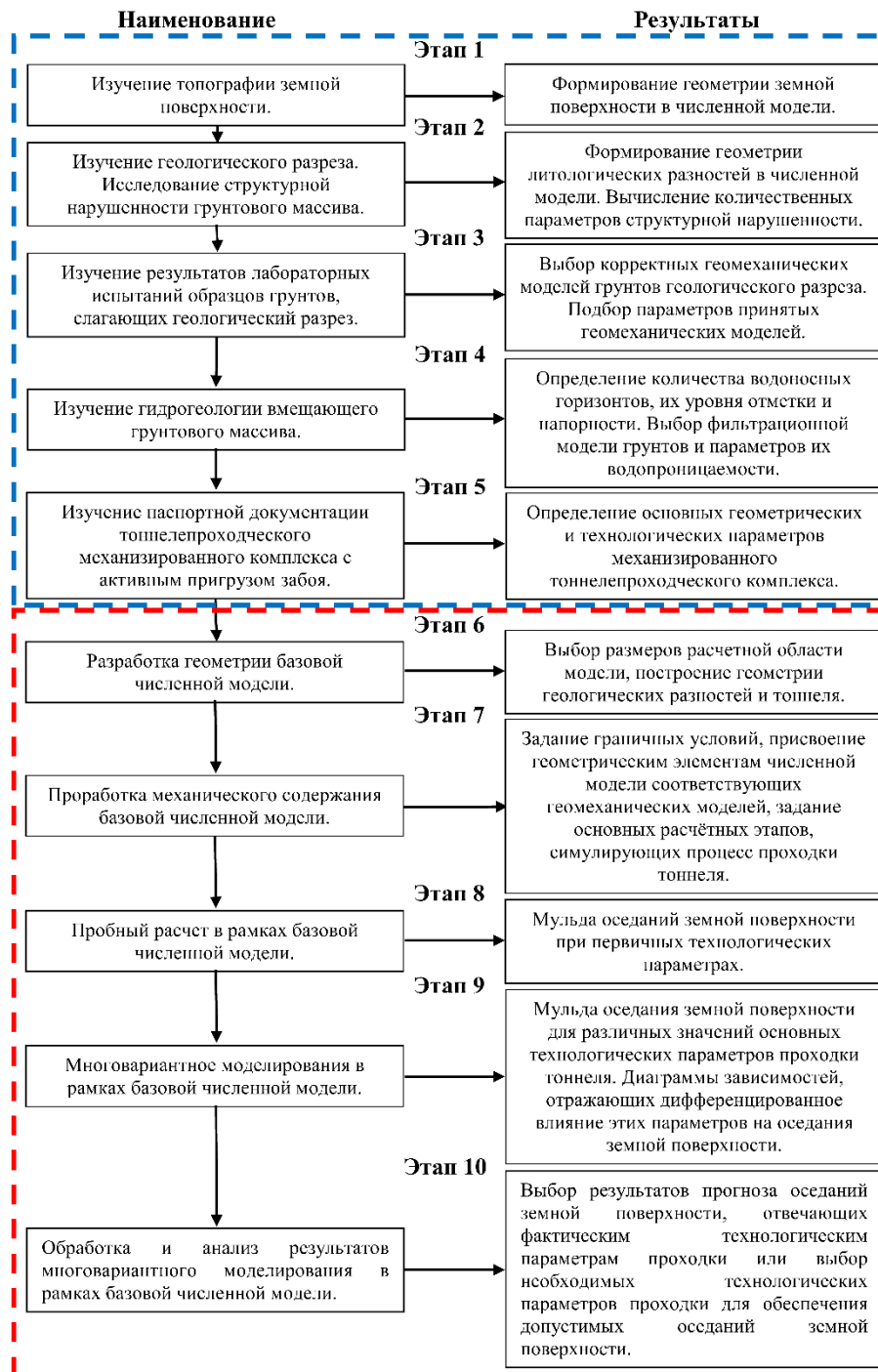


Рисунок 8 – Блок-схема метода прогноза оседаний земной поверхности

### 3. Задание:

Построить диаграмму зависимости вертикальных оседаний земной поверхности от величины давления активного пригруза забоя тоннеля, пройденного на глубине  $H$  от земной поверхности в слабых неустойчивых грунтах.

Определить геомеханически безопасную величину активного давления пригруза забоя тоннеля исходя из условий обеспечения устойчивости породных обнажений лба забоя тоннеля и исходя из условия минимизации оседаний земной поверхности в зоне подработки.

### 4. Порядок проведения работы:

1. Изучение топографии земной поверхности в пределах подрабатываемой территории. На этом этапе с учетом проектируемой глубины заложения тоннеля и реальной геометрии земной поверхности выполняется решение о необходимости непосредственного учета топографии земной поверхности при моделировании.

2. Изучение геологического разреза в пределах трассы тоннеля, строительство которого выполняется с применением тоннелепроходческого комплекса. На этом этапе формируется представление о геометрии будущей численной модели и о грунтах, слагающих геологические разности. При необходимости для скальных грунтов следует выполнять оценку структурной нарушенности массива структурными особенностями (трещиноватостью). Такую оценку следует выполнять с применением рейтинговых систем.

3. Изучение результатов лабораторных исследований грунтового массива. На этом этапе происходит формирование представления о механическом поведении массива вмещающих грунтов, об их деформационно-прочностных свойствах и в результате выполняется выбор геомеханических моделей в наибольшей степени отражающих реальное поведение грунтов под нагрузкой, а также конкретных значений параметров этих моделей (при необходимости с учетом структурной нарушенности).

4. Изучение результатов гидрогеологических изысканий. На этом этапе определяется количество водоносных горизонтов, водоупоров и напора подземных вод в каждом из горизонтов, изучаются результаты лабораторных исследований водопроницаемости грунтов. В результате выбирается дренированный или недренированный тип поведения для каждого литотипа грунтов в пределах геологического разреза, а также выбирается фильтрационная модель массива грунтов, применяемая для многовариантного численного моделирования, с указанием конкретных значений параметров.

5. Изучение паспорта механизированного тоннелепроходческого комплекса с активным пригрузом и его паспортных технологических чертежей. Необходимо установить основные геометрические размеры щита (диаметр резания, диаметр хвостовой оболочки, длина щитового комплекса с хвостовой оболочкой, зазор между хвостовой оболочкой и затампонированным кольцом постоянной обделки, сошедшим на породный контур), технологические параметры (тип активного пригруза забоя, плотность рабочей смеси для пригруза, диапазон рабочих давлений пригруза забоя, материал корпуса щита и его толщина, количество щитовых гидродомкратов и их рабочее усилие, материал и размеры колец постоянной обделки, диапазон рабочих давлений нагнетания тампонажного раствора).

6. Разрабатывается геометрия базовой численной модели для многовариантного моделирования. Наружные размеры модели следует выбирать таким образом, чтобы граничные условия, прикладываемые к боковым граням модели, не оказывали влияния на параметры мульды оседания земной поверхности. Мульда оседаний имеет тем большую ширину в сечении тоннеля чем больший собственный диаметр и глубину заложения имеет тоннель. В целом здесь можно следовать следующим рекомендациям:

- при глубине заложения тоннеля до  $3D$  ( $D$  – диаметр тоннеля в проходке) размеры модели принимать не менее  $7D \times 7D$  в плоскости поперечного сечения тоннеля;

- при глубине заложения тоннеля более  $3D$  размеры модели принимать не менее  $(1,5-2)H \times (1,5-2)H$  ( $H$  – глубина заложения тоннеля) в плоскости поперечного сечения тоннеля.

В направлении продольной оси тоннеля размер модели следует принимать в зависимости от количества этапов проходки тоннеля, которые предполагается смоделировать. Первое моделируемое положение лба забоя тоннеля рекомендуется располагать вблизи геометрического центра модели по оси тоннеля. Проходку тоннеля следует выполнять заходками с длиной, равной ширине одного кольца постоянной обделки.

7. В численной модели прописываются основные параметры геомеханических моделей грунтов и других материалов, которые будут использоваться при моделировании, прописываются параметры гидрогеологии и в первом приближении задаются технологические параметры, определяющие основные факторы, влияющие на формирование мульды оседания земной поверхности (давление тампонажного раствора, давление активного пригруза забоя и потеря объема тоннеля), задаются граничные условия

и формируется поле естественных напряжений. Граничные условия, как правило, представляют собой запрет перемещений по внешним граням модели в направлениях перпендикулярных к этим граням, за исключением верхней грани или поверхности, которая остается свободно деформируемой. Поле естественных напряжений формируется с учетом его основных закономерностей, характерных для конкретных инженерно-геологических условий, в которых выполняется строительство.

8. Выполняется пробный расчет с предварительно заданными технологическими параметрами, строится мутьда вертикальных оседаний земной поверхности и выполняется анализ полученных результатов.

9. Из трех основных технологических факторов два фиксируются на одном и том же значении, а один последовательно изменяется в рабочем диапазоне применяемого тоннелепроходческого комплекса с целью выявить его влияние на изменение параметров результирующей мутьды оседания земной поверхности. Таким образом необходимо определить дифференцированное влияние каждого из трех технологических факторов и результаты такого анализа следует представлять в виде приведенных диаграмм.

10. Отталкиваясь от построенных обобщенных диаграмм дифференциального влияния основных технологических факторов следует либо задаться необходимыми значениями соответствующих технологических параметров для обеспечения необходимых величин вертикального оседания земной поверхности, либо по уже заданным в проекте величинам этих технологических параметров определить результирующие вертикальные оседания земной поверхности, которые сформируются при строительстве тоннеля.

#### **5. Исходные данные:**

В качестве исходных данных задаются:

- инженерно-геологический разрез по трассе тоннеля, который включает геометрический профиль участка строительства, линии разделяющие инженерно-геологические элементы (ИГЭ) между собой;
- физико-механические свойства пород ненарушенного сложения (плотность, модуль деформации, коэффициент поперечных деформаций, прочность в условиях одноосного сжатия, прочность в условиях одноосного растяжения) для каждого ИГЭ, которые встречаются по трассе;
- гидрогеологические условия (естественное положение уровня подземных вод, изменение уровня подземных вод на участке ведения строительных работ, в призабойной зоне тоннеля);
- показатели структурной нарушенности породного массива, которые включают количество систем трещин, интенсивность трещиноватости, качество контакта между стенками трещин, наличие заполнения трещин другими минералами или породами, условия обводненности трещин и т.д.);
- геометрические параметры тоннеля и расположение тоннеля в представленных инженерно-геологических условиях.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. ГОСТ 21153.0-75 «Породы горные. Методы физических испытаний».
2. ГОСТ 21153.2-84 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном сжатии».
3. ГОСТ 21153.3-85 «Породы горные. Методы определения предела прочности при одноосном растяжении».
4. ГОСТ 21153.8-88 «Породы горные. Методы определения предела прочности при объемном сжатии».
5. Протосеня А.Г. Геомеханика: Учеб пособие // А.Г. Протосеня, О.В. Тимофеев. Санкт-Петербургский государственный горный институт (технический университет) СПб, 2008. 117 с.
6. Баклашов И.В. Геомеханика: Учебник для вузов. В 2 т. – М.: Издательство Московского государственного горного университета, 2004. – Т.1. Основы геомеханики. – 208 с.