

УДК 622.02

Ю.А. Епимахов, Н.Н. Абрамов, Е.В. Кабеев, А.Г. Антипов
**НАТУРНОЕ ОБСЛЕДОВАНИЕ КОМПЛЕКСА
ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ
ВЕРХНЕ-ТУЛОМСКОЙ ГЭС**

Как показывает оценка мировой практики строительства и эксплуатации объектов ГЭС, в регионах, характеризующихся наличием геологических формаций, сложенных высокопрочными гранитами, гранито-гнейсами, базальтами и т.п., широкое распространение получило подземное размещение ГЭС. К такому региону следует отнести и Мурманскую область, где в течение более чем 40 лет эксплуатируются Верхне-Тулумская и Борисоглебская ГЭС подземного размещения.

В настоящее время, в контексте с усиливающей агрессивностью террористических элементов и тенденцией роста числа техногенных катастроф, подземное размещение ГЭС является более безопасным.

В этой связи интерес представляют не только внешние аспекты безопасности, но крайне важна и оценка безопасной эксплуатации самих объектов ГЭС в условиях их подземного размещения.

Горным институтом КНЦ РАН совместно со специалистами ОАО «Колэнерго» было выполнено натурное обследование комплекса подземных сооружений Верхне-Тулумской ГЭС с оценкой устойчивости подземных выработок и безопасности их эксплуатации.

Программой обследования предусматривалось:

- визуально-экспертное обследование массива и крепи выработок;
- оценка физико-механических свойств вмещающих пород в лабораторных условиях по образцам пород (прочностные и упругие свойства пород);
- оценка мощности нарушенной зоны приконтурного массива пород вокруг выработок;

- оценка характеристик пород массива в натуральных условиях методом сейсмической томографии.

Верхне-Тулумская ГЭС в подземном исполнении была построена в период 1962-1965 гг. Финской строительной компанией. Глубина заложения подземных выработок находится в пределах от 0 до 115 м. В состав подземной ГЭС входят машинный зал (основное сооружение комплекса) с параметрами $H \times B \times L$ (21.0×17.5×90) м; шандорная галерея длиной 130 м, сечением (3.4×6.0) м; транспортная штольня протяженностью 301 м сечением (9.0×6.6) м. Кроме того, в общий комплекс подземных выработок Верхне-Тулумской ГЭС входят две камерные выработки подземного рыбозавода.

Наиболее ответственное сооружение подземного комплекса – машинный зал ГЭС. Сводчатая часть машзала закреплена железобетонными анкерами диаметром 25 мм длиной 4 м, расположенных по сетке с шагом (1.5×1.5) м. На протяжении 8 м от северного торца машзала по своду на анкерах закреплена металлическая сетка, а на остальной части свод закреплён анкерами со слоем набрызгбетона толщиной до 5-7 см.

Проведение горных выработок в скальных породах с облегченным креплением особенно характерно в зарубежной практике строительства гидротехнических сооружений Финляндии, Норвегии и Швеции. Это стало возможным благодаря применению прогрессивного элемента горной технологии, с позиции повышения степени устойчивости скального массива и снижения величины нарушения приконтурного слоя – метода контурного взрывания.

Геомеханический эффект разрушения пород при контурном взрывании заключается в сохранении монолитности пород по обе стороны от поверхности откола, а также экранирующем эффекте откольной зоны от действия динамического силового поля, образуемого при взрыве ВВ основных зарядов забоя выработки.

Установленная анкерная крепь облегченного типа в сводовой части машзала Верхне-Тулумской ГЭС, в сочетании с технологией контурного взрывания, рассчитывалась согласно гипотезе «подвешивания» пород нарушенной зоны к ненарушенному массиву, рис. 1. В соответствии с паспортом крепления сводовой части машзала, параметры крепи были приняты следующие:

- сетка расположения анкеров периодического профиля длиной 4 м и диаметром 25 мм составляет 1.5 м в ряду и 1.5 м между рядами ($a = 1.5$ м, рис.3);

- толщина набрызгбетона колеблется в пределах 5-7 см.

При таких параметрах крепи вес удерживаемой породы, приходящийся на один анкер (Q), определится

$$Q = \gamma \cdot L_n \cdot S, \text{ тс} \quad (1)$$

где γ - объемный вес пород, т/м³; L_n - размеры удерживаемой зоны пород, м; S - площадь удерживаемой породы приходящаяся на один анкер, м².

Исходя из условий, что замок анкера принимается как $L_n = 0.25 L_m$, где: L_m - длина штанги равная 4 м по паспорту крепления, то $L_n = 0.25 L_m = 3$ м. Тогда вес удерживаемой породы одним анкером, при глубине нарушенной зоны равной 3 м, составит:

$$Q = \gamma \cdot L_n \cdot S = 2.8 \cdot 3.0 \cdot (1.5 \times 1.5) = 18.9, \text{ тс} \quad (2)$$

Критическая нагрузка, которую может выдержать железобетонный анкер диаметром 25 мм периодического профиля, составляет 40-60 тс.

Запас прочности действующего паспорта крепления сводовой части машзала или коэффициент безопасности ($f = 2.2$), то есть находится в пределах ($2 \leq f < 5$), принятых в миро-

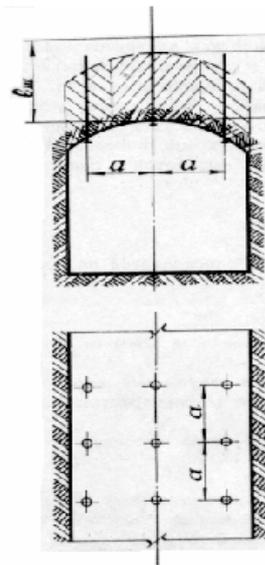


Рис. 1. Схема расчета штанговой крепи по гипотезе «подвешивания» пород зоны нарушения сплошности

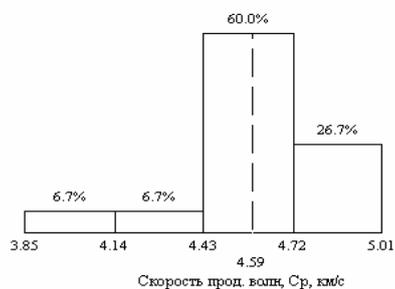
вой и отечественной практике при креплении капитальных горных выработок [1.2].

Таким образом, принятый паспорт крепления сводовой части машзала достаточно надежно обеспечивает устойчивость скального массива на длительный период эксплуатации.

Стены машзала, в основном, без крепления находятся в устойчивом состоянии, обеспечиваемым благоприятной крупно и среднеблоковой структурой массива с взаимно перпендикулярным расположением трещин. Отдельные крупные блоки «подшиты» к основному массиву анкерами.

Визуальное обследование шандорной галереи, имеющей длину 130 м с параметрами сечения (3.4×6.0) м, показало ее устойчивое состояние. Блочность массива наиболее выражена в стенках выработки. Стены галереи по своей высоте, в связи со структурными особенностями массива, в районе затворов, имеют рваную, неровную поверхность и на отдельных участках возможно образование небольших заколов, как следствие влияния процессов выветривания обнажений массива во времени. Отдельные блоки массива закреплены анкерной крепью. Сводовая часть выработки не имеет крепления. Ввиду небольшого пролета относительно высоты стен, сводовая часть весьма устойчива и не имеет видимых нарушений сплошности массива и закольных образований. Транспортная въездная штольня протяженностью 301 м, сечением (9.0×6.6) м, обеспечивает связь выработок подземного комплекса ГЭС с поверхностью. Штольня пройдена с использованием технологии контурного взрывания, имеет ровную поверхность стен и кровли, что дает основания классифицировать ее состояние как устойчивое. Участков с закольными образованиями по всей протяженности выработки на основе визуального осмотра не обнаружено.

Гистограмма распределения C_p в образцах



Гистограмма распределения модуля упругости в образцах



Рис. 2. Гистограммы распределения свойств образцов пород: а) – скорость продольной волны, C_p , км/с; б) – модуль упругости, $E \cdot 10^4$, МПа

Для подтверждения сделанных выводов по результатам визуального осмотра породного массива в районе подземных сооружений был выполнен комплекс инструментальных наблюдений для более детальной оценки состояния массива с определением количественных характеристик свойств горных пород.

Массив скальных пород, вмещающий подземные сооружения комплекса Верхне-Тулумской ГЭС представлен, в основном, комплексом биотит-амфиболовых гнейсов, с частичной мигматизацией. Штуфы горной породы данной разновидности были отобраны непосредственно из горных выработок обследуемого объекта.

В основу применяемой методики положена комплексность определений основных физических характеристик на одной пробе с учетом ее петрографо-минералогического описания. Основные определения выполнены согласно ГОСТ 21153.0-75-21153.7-75 и ГОСТ 5180-75.

По образцам каждой пробы определяли плотность, скорости продольных и поперечных упругих волн и прочность при одноосном сжатии. Расчетом определяли коэффициент Пуассона и модуль упругости.

Результаты лабораторных определений представлены в виде гистограмм, рис. 2.

Как видно из приведенных данных, скорости продольных волн варьируют в пределах $(\frac{3.85 - 5.01}{4.59})$ км/с, модули упругости $(\frac{3.79 - 5.0}{4.52}) \cdot 10^4$ МПа. Предел прочности на одноосное сжатие образцов составляет $(\frac{48.0 - 160.0}{96.0})$ МПа.

Полученные характеристики свойств пород в лабораторных испытаниях использованы при интерпретации данных натурных измерений непосредственно в массиве пород.

Для измерений в массиве использован метод сейсмической томографии. Этот метод, разработанный в Горном институте КНЦ РАН, позволяет с высокой степенью детальности выполнять оценку свойств и состояния массива пород в натуральных условиях подземных выработок [3].

На двух участках массива были оборудованы два наблюдательных полигона для проведения измерений по методу сейсмической томографии (рис. 3). Первый полигон (полигон №1) оборудован в штольне транспортной. Вдоль левой стенки выработки на ПК (2+00-3+10) были укреплены реперы с шагом 5 м. На реперах размещались сейсмодатчики (18 шт.), принимающие сейсмодатчики, излучаемые ударным способом по стенке выработки.

Длина полигона 110 м, глубина обследования от контура выработки в массив составила 8 м. При этом оценивались:

- распределения скоростей продольных и поперечных упругих сейсмических волн (томограммы скоростей) на обследуемом участке;
- по полученным скоростям рассчитаны упругие характеристики пород массива (модули упругости и коэффициенты Пуассона);
- определен геофизический показатель трещиноватости горных пород массива V_e , по которому оценены категории трещиноватости массива [3].

Аналогичным образом было выполнено обследование участка массива на полигоне НП №2. Полигон выбран на сопряжении шандорной галереи и соединительной выработки рыбзавода (рис. 3). Сейсмоприемники крепились на стенке шандорной галереи, а точки возбуждения – на стенке соединительной выработки.



дения ударов размещались вдоль выработки рыбзавода.

На рис. 4 приведена томограмма скоростей продольных волн, характеризующая состояние данного участка массива на полигоне СП-1. Наблюдаемый рост величин скоростей в глубь массива от контура выработки свидетельствует о росте консолидации пород.

Диапазон варьирования скоростей 3.3-5.4 км/с. Нарушенная зона массива, от проведения выработки, характеризующаяся малыми значениями скоростей ($C_p = 3.3 - 3.7$ км/с) приуроченная непосредственно к контуру выработки, слабо выражена. Лишь на ПК 200-220 мощность этой зоны от контура достигает 0.6-1.5 м (белая палитра с $C_p = 3.3-3.5$ км/с). На томограмме хорошо прослеживается выдержанная блочная структура массива. Размеры блоков оцениваются от 5-20 м. Опорная зона массива прослеживается на глубинах 5-6м

Рис. 4. Томограмма скоростей продольных сейсмических волн C_p на участке массива (полигон 1) от контура выработки вдоль всего протяжения

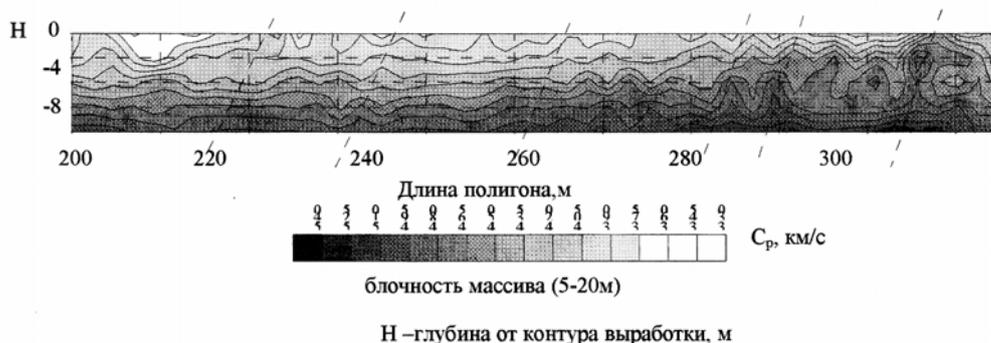


Рис. 3. Схема наблюдательных полигонов в массиве

обследуемого участка (рис. 10, $C_p = (4.9-5.2)$ км/с.). Эта зона обеспечивает поддержание выработок, снижая вероятность процесса вывалообразования. Гистограмма распределения скоростей представлена на рис. 5. Средние значения скоростей, полученных в массиве, практически совпадают с аналогичными значениями для образцов пород в лабораторных испытаниях (рис. 2а). Диапазоны варьирования скоростей также довольно близки. Полученные данные могут характеризовать данный участок массива как довольно сохраненный. Сопоставляя гистограммы распределения оцененных упругих свойств на образцах и в массиве рис. 2б и рис. 6а видно, что до 70 % значений модулей упругости пород в массиве составляют $(3.91-8.75) \cdot 10^4$ МПа, что аналогично данным в образцах. Однако, примерно 27 % значений модулей упругости ниже, чем в образцах, что может говорить о влиянии естественных и техногенных нарушений в массиве.

Расчеты показателя трещиноватости массива V_c по результатам натурных измерений приведены на гистограмме рис. 7а. Согласно классификации [3] по категориям трещиноватости по полученным экспериментальным данным массив можно классифицировать как сохраненный, (V категория трещиноватости), а на нарушенных участках как слабо и среднетрещиноватый (III – IV категории). Следовательно,

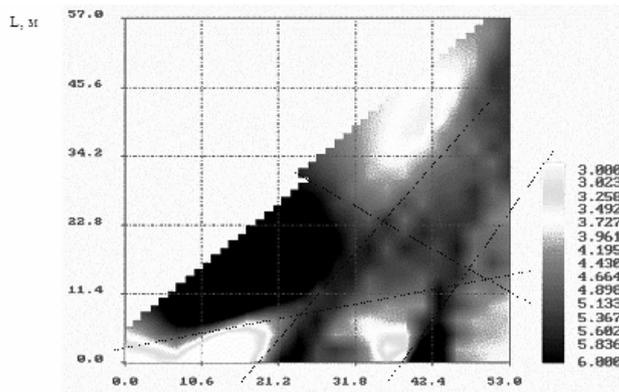
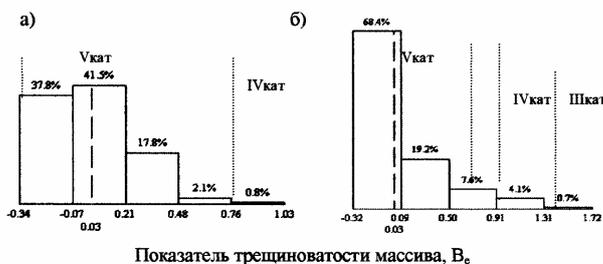
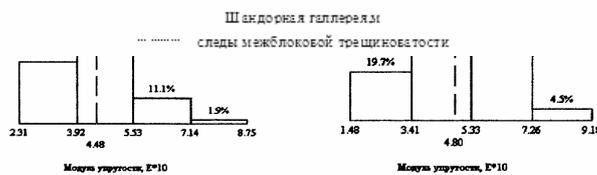


Рис. 8. Томограмма скоростей продольных волн в массиве пород: а) – участок №1; б) – участок №2



выявленные низко модульные участки массива, приуроченные непосредственно к контуру выработок на их устойчивость влияния не оказывают, а обследуемые являются устойчивыми.

Участок массива, где был заложен 2-й измерительный полигон представляет собой породный целик на сопряжении двух выработок: галереи шандорной и выработки (соединительная), соединяющей две камерные выработки рыбзавода (рис. 3). На данном полигоне с размерами в плане 57×53 м в область эксперимента попадает более значительная часть нетронутого массива по сравнению с полигоном №1. Эти особенности проявились в более широком диапазоне варьирования скоростей продольных волн (3.0-6.0) км/с, как видно из томограммы рис. 8. Довольно четко проявляется блочность массива. Зона низких скоростей также приурочена к контурам шандорной галереи и соединительной выработки. На ПК 0-15 м шандорной галереи эта зона выражена наиболее ярко

Рис. 6. Гистограммы распределения модуля упругости на наблюдательных полигонах

Рис. 7. Гистограммы показателя трещиноватости массива пород: а) – полигон 1; б) – полигон 2

(красная палитра томограммы). Практически эта зона может ассоциироваться с зоной естественной трещиноватости и прослеживается до глубин 4-6 м от контура выработки. В глубине массива (более 6-7 м) она «подзащитного действия», «скорости» продольных волн, в которой достигают 6.0 км/с. Распределение значений модулей упругости приведены на рис. 6б. Как видно из гистограммы до 80 % случаев модуль равен или выше модулей в образцах пород. В 20 % случаев, также как и для полигона №1 наблюдается снижение величин модулей упругости. Это подтверждает факты наличия ослабленных зон массива вблизи обнажений горных выработок. Оценка трещиноватости массива по критерию V_c рис. 7б показала результаты аналогичные результатам, полученным на полигоне №1, то есть массив является, в основном сохранным. Нарушения в массиве на отдельных его участках классифицируют массив как слаботрещинчатый. Таким образом, установленная корреляция результатов оценки состояния массива пород на различных его участках позволяет распространить выводы об устойчивом состоянии на весь массив, вмещающий подземные выработки Верхне-Тулумской ГЭС, а экспертно-визуальный метод обследования состояния камер и горных выработок, показал безопасность и надежность работы персонала и в целом ГЭС подземного заложения.

В связи с выявленными особенностями состояния массива техническим руководством ОАО «Колэнерго» совместно с Горным институтом КНЦ РАН разработан регламент, включающий необходимость приоб-

ретеня горного оборудования для целей обезопасивания горных выработок, установлен режим проведения инструктажа с инженерно-техническим и рабочим персоналом ГЭС, принято предложение 1 раз в 3 года

проводить детальный контроль состояния массива по вышеизложенной методике, а также запланировано в ближайшее время проведение детального обследования и Борисоглебской ГЭС подземного размещения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Tunnels & Tunneling. m. Madan Manages, may 1991 г. «Национальная гидроэнергетическая корпорация». Аналитический подход к строительству туннеля.

2. Гуцин В.В., Епимахов Ю.А., Абрамчук В.М. и др. Скоростное строительство подземных комплексов в скальных массивах. РИО. КНЦ РАН, г. Апатиты, 1992. с. 142.

3. Абрамов Н.Н. Использование метода сейсмической томографии при мониторинге подземных сооружений // Проблемы разработки месторождений подземных ископаемых и освоения подземного пространства Северо-Запада России. – Апатиты: Изд. КНЦ РАНЮ 2001. – с. 96-105.

Коротко об авторах

Епимахов Ю.А. – доктор технических наук, зав. лабораторией, Горный институт КНЦ РАН.

Абрамов Н.Н. – ст. научный сотрудник, Горный институт КНЦ РАН.

Кабеев Е.В. – ведущий технолог, Горный институт КНЦ РАН.

Антипов А.Г. – ведущий специалист, ОАО "Колэнерго".



