МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ СССР
ГПИО «ЭНЕРГОПРОЕКТ»
ВСЕСОЮЗНОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКОЕ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ «ГИДРОПРОЕКТ» ИМЕНИ С. Я. ЖУКА

РЕКОМЕНДАЦИИ
ПО ПРОВЕДЕНИЮ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ В СКАЛЬНЫХ И РЫХЛЫХ ГРУНТАХ В ГИДРОТЕХНИЧЕСКОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

П-879-90
Гидропроект

МОСКВА 1990

gost.e-ecolog.ru

Министерство энергетики и электрификации СССР
ГПИО "ЭНЕРГОПРОЕКТ"

ВСЕСОЮЗНОЕ ОРДЕНА ЛЕНИНА ПРОЕКТНО-ИЗЫСКАТЕЛЬСКОЕ И НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ ОБЪЕДИНЕНИЕ "ГИДРОПРОЕКТ" ИМЕНИ С.Я.ЖУКА

"УТВЕРЖДАЮ"

Зам.главного инженера
объединения "Гидропроект"

И.А.Парабучев

Р Е К О М Е Н Д А Ц И И

по проведению акустико-эмиссионных исследований в скальных и рыхлых грунтах в гидротехническом строительстве

П-879-90

Гидропроект

Начальник отдела геофизических изысканий и исследований А.И.Савич

Руководитель разработки и ответственный исполнитель заведующий группой ОГИИ М.Г.Езерский

"СОГЛАСОВАНО"

Начальник технического отдела А.К.Вахрамеев

Москва 1990г.

В настоящих "Рекомендациях" обобщен опыт применения метода акустической эмиссии (МАЭ) для решения актуальных задач изысканий под проектирование и строительство крупных гидротехнических сооружений. МАЭ позволяет изучать напряженно-деформированное состояние скальных массивов, контролировать развитие горного давления на обделки подземных сооружений, вести режимные наблюдения за деформационными процессами в основаниях плотин и на оползневых склонах. МАЭ относится к инженерно-геофизическим методам неразрушающего контроля геологических сред и инженерных сооружений. Экономичен, оперативен, базируется на простой аппаратуре с автономным питанием, что позволяет производить наблюдения в труднодоступных участках на поверхности земли и в горных выработках.

"Рекомендации" разработаны в отделе геофизических изысканий и исследований объединения "Гидропроект" заведующим группой, канд.физ.-мат.н. М.Г.Езерским и ведущим инженером М.С.Рудяком. Аппаратурные разработки и исследования на оползневом склоне Загорской ГАЭС выполнены ведущим инженером В.В.Ждановым.

В "Рекомендациях" учтены замечания рецензентов: докт. физ.-мат.н. С.Д.Виноградова (Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта АН СССР) канд.физ.-мат.н. В.Н.Никитина (объединение "Гидропроект".

"Рекомендации" предназначены для специалистов-геофизиков и могут быть использованы в гидротехническом и гражданском строительстве, горном деле, туннелестроении.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в связи с усложнением инженерно-геологических условий строительства промышленных сооружений, которые смещаются в тектонические сейсмоактивные районы Кавказа (Ингурская, Худонская, Жинвали ГЭС), Средней Азии (Нурекская, Курпсайская, Рогунская и др.ГЭС), Сибири и Дальнего Востока, перед гидроэнергетикой встает задача усовершенствования методов инженерных изысканий и повышения качества проектов с целью обеспечения экономичных проектных решений при повышенной надежности эксплуатируемых объектов.

Осуществление этих задач возможно, если изыскательские службы обладают разнообразным набором методов, применение которых в той или иной ситуации по-отдельности или в комплексе с другими методами, позволяет оперативно решить проблемы изучения строения, свойств и состояния среды, развития в ней деформационных процессов и явлений, таких как обвалы, оползни, разрушения, горные удары и вывалы в подземных сооружениях и приповерхностных массивах.

Для решения сложных задач изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации сооружений уже нашли широкое применение геофизические методы: сейсмо- и электроразведка, каротажные и т.п. Все более широкое применение начинает находить и метод акустической эмиссии (АЭ), который от решения чисто научных задач переходит в стадию практического использования. Помимо шахтного и рудного строительства, где МАЭ применяется для прогноза горных ударов и

и управления горным давлением (напряженно-деформированным состоянием массивов), он нашел также применение в режимных наблюдениях за деформационными процессами в скальных и рыхлых оползнях /18, 26, 27, 41/, грунтовых плотинах /34-37/, при изучении карста, в проблеме устойчивости подземных сооружений (3, 4, 10, 30) и т.п.

В практике изысканий для проектирования гидротехнических объектов, а также при "активном проектировании" в ходе строительства крупных подземных гидротехнических сооружений (машинных залов, туннелей и т.п.) выполняемых отделом геофизических изысканий и исследований Гидропроекта, МАЭ нашел применение для изучения характера напряженно-деформированного состояния пород вокруг горных выработок /17/, контроля за развитием горного давления на обделку и крепь туннелей и т.п./9,10/

Особенностью методик, используемых в практике Гидропроекта, является комплексирование МАЭ с другими геофизическими методами, в частности, с ультразвуковым каротажом (УЗК) шпуров и скважин, другими видами каротажа, что дает взаимодополняющую информацию о напряженном состоянии и деформационных процессах в скальном массиве или рыхлых отложениях.

Целью настоящей работы является составление практических рекомендаций по проведению акустико-эмиссионных исследований при изысканиях и строительстве гидротехнических объектов. В ней даются основные понятия, взаимосвязи параметров акустической эмиссии с традиционными параметрами деформационных процессов и трещин, приводится обзор отечественной и зарубежной аппаратуры для исследований, описывается методика, основанная на опыте работ отдела геофизических изысканий и исследований

Гидропроекта, и наконец, описывается опыт применения метода на объектах гидротехнического строительства за последнее десятилетие.

I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ

I.I. Настоящие рекомендации составлены на основании "Плана разработки ведомственных нормативных документов, пособий и рекомендаций по проектированию, изысканиям и исследованиям объединения "Гидропроект" им.С.Я.Жука в развитие научно-исследовательской работы по проблеме 0.55.06 теме 06.HI. II.2. "Разработка акустико-эмиссионного метода оценки напряженно-деформированного состояния массива горных пород и внедрение его при изучении взаимодействия гидротехнических сооружений с их основаниями".

I.2. Рекомендации предназначены для организации и проведения оперативных акустико-эмиссионных исследований в скальных массивах в окрестности горных выработок и на оползнях при изысканиях под гидротехническое строительство. Предложенная методика может также использоваться в смежных отраслях народного хозяйства (горном деле, строительстве туннелей метро и т.п.).

I.3. Термином "акустическая эмиссия" (АЭ) обозначают процессы излучения упругих волн, вызванных внутренними источниками, расположенными в толще среды. Необходимым условием возникновения АЭ являются локальность и импульсный характер источника. АЭ определяется, как процесс излучения материалом механических волн, вызванных динамической перестройкой внутренней структуры среды /8/. Основными источниками АЭ в горных

породах являются: образование отрывных (хрупких) трещин, их рост, взаимодействие, ветвление, скольжение по поверхностям разрушения, в процессе которых происходит разрыв старых и образование новых участков контакта поверхности. Основные параметры АЭ: амплитуда импульса (A), его длительность (τ), время прихода сигнала (t_n), суммарная АЭ (N) (число превышения сигналом выбранного уровня дискриминации за период наблюдений , интенсивность АЭ ($\dot{N}$) (то же за единицу времени). Используются также энергетические характеристики регистрируемых сигналов АЭ в условных или абсолютных единицах: энергия импульса (E), пропорциональная квадрату амплитуды (A^2) и длительности импульса, а суммарная энергия (Σ E) - равна энергии импульсов за период наблюдений. В практических приложениях метода наиболее часто используются параметры N и $\dot{N}$, связанные прямой зависимостью с характеристиками напряженно-деформированного состояния, а, кроме того, практически наиболее просто регистрируемые.

I.2. В изучении АЭ выделяются два подхода: феноменологический и микроструктурный. Первый позволяет выявить взаимосвязи между параметрами АЭ и феноменологическими характеристиками напряженно-деформированного (НДС) состояния некоторого объема среды - напряжениями и деформациями, описывающими интегральное поведение этого объема при силовых воздействиях. При микроструктурном подходе рассматривается взаимосвязь параметров АЭ с характеристиками их источников - микротрещин, баланс энергии при образовании разрывов в среде и доля освобожденной при этом энергии, переходящая в энергию упругих

колебаний. В данной работе для решения поставленных задач рассматривается феноменологический подход, однако, некоторые элементы микроструктурного рассмотрения будут полезны для интерпретации результатов исследований.

1.2.1. Феноменологический подход. Деформационный процесс в горных породах описывается феноменологическими кривыми деформирования "σ" - "ε" (напряжение-деформация), обобщенный вид которых показан на рис.1.1,а. Структурная схема (рис.1.1,б) объясняет и связывает макро- и микроповедение пород при их деформировании от начала приложения нагрузки до разрушения объема породы: такие параметры, как гидростатическое давление (σ_3), вид напряженного состояния (σ_3/σ_1), а также величина максимальных касательных напряжений $\tau_{макс} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2}$ обусловливают тип и геометрию микротрещин, накапливаемых в объеме среды в ходе ее деформирования, а последние, в свою очередь, макроскопически проявляются в виде неупругих деформаций того или иного типа (сдвиговых, линейных, объемных). Характер взаимодействия микротрещин определяет тип макроразрушения. Именно наличие в объеме микротрещин отрыва определяет характер и интенсивность изменения геофизических параметров: скоростей продольных и поперечных волн, затухания их энергии, и выделения АЭ.

1.2.2. Микроструктурное рассмотрение. При микроструктурном подходе находят взаимосвязь между параметрами структурных нарушений и АЭ. В таблице 1, заимствованной из /15/ даются взаимосвязи параметров трещин с параметрами-

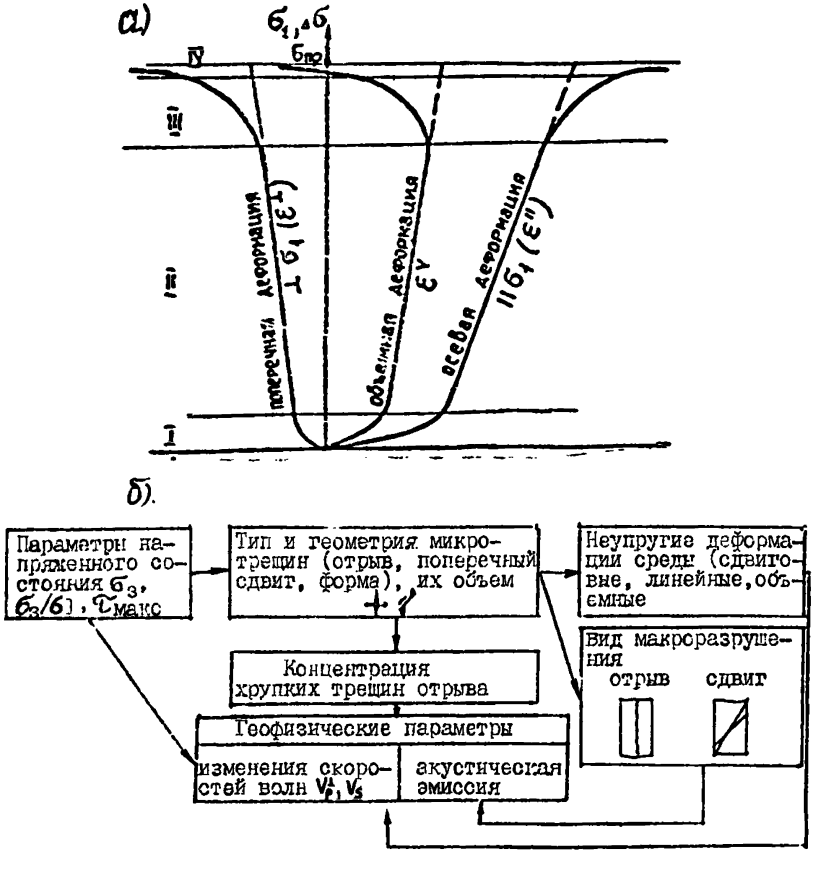


Рис.1.1 Обобщенные кривые деформирования (а) и структурная схема протекания деформационного процесса в горных породах и его проявлений в геофизических характеристиках среды (б).

I-IV -стадии деформационного процесса.

АЭ по данным различных исследователей.

Энергетические соотношения для сдвиговых трещин рассмотрены в работах Б.В.Кострова, а для хрупких.-А.А.Поллока /45/. Установлено, что чем более динамично происходит процесс разрушения, тем меньшая часть энергии переходит в теплоту и, соответственно, большая переходит в энергию АЭ. Кроме того, из работ Поллока следует: во-первых, энергия импульса АЭ - прямо пропорциональна относительному удлинению трещины, то есть, чем длиннее исходная трещина, тем, при одинаковом удлинении в абсолютных единицах энергия излучаемого импульса меньше; во-вторых, трещина, распространяющаяся малым числом больших скачков, выделяет намного больше энергии, чем на той же дистанции, но малыми скачками. В целом, как отмечается в работе /I5/, теоретические зависимости между параметрами трещин и АЭ пока разработаны слабо.

Таблица I

Параметры разрушения	: формула	: Автор
Коэффициент интенсивности напряжений, K	$N \sim K^4$; $N \sim K^2/E_y$	Дьюган
Суммарное раскрытие трещины, $\delta\mathcal{E}$	$\delta\mathcal{E} \sim (I - \nu)$ $\delta\mathcal{E} \sim (0{,}2\sigma_т)$	Хилл
Суммарная площадь раскрытия трещины, S	$S \sim N$	Иванов
Длина скачка трещины, Δl	$\Delta l \sim A$	Поллок
Площадь микротрещин, $\Delta S_м$	$\Delta S_м \sim A$	Гербериx
Скачкообразное увеличение площади трещин, ΔS	$\Delta S \sim E/K$	Гербериx
Длина трещины, $\mathcal{L}$	$\mathcal{L} \sim \nu_р \times T$	Маслов

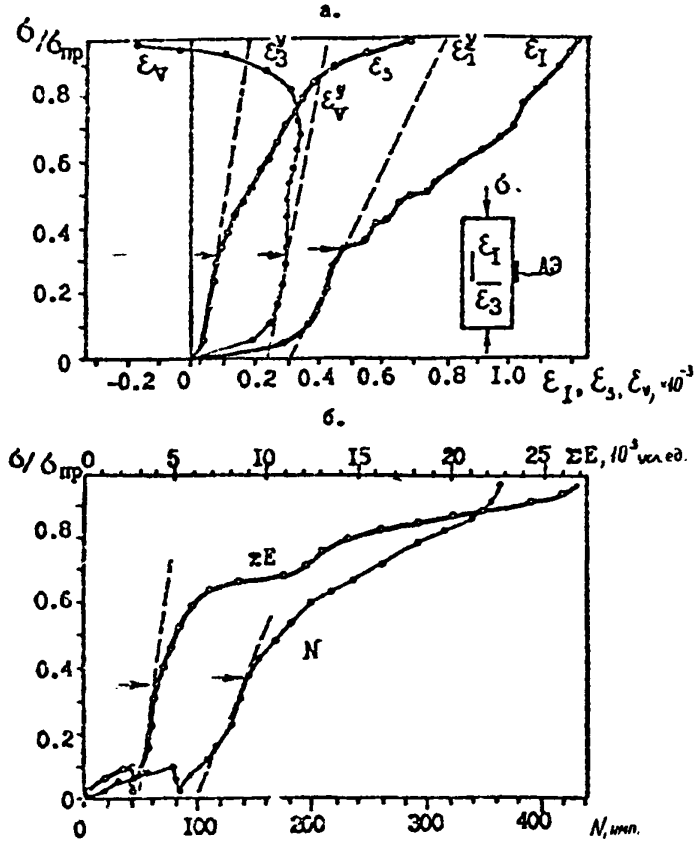


Рис.1.2. Зависимости от уровня нагрузки $б/б_{пр}$ осевых ε_1, окружных ε_3, объемных ε_v деформаций (а), а также суммарных параметров: энергии ΣE и эмиссии N (б). ε_i^y - упругие деформации, экстраполированные в область высоких значений $б/б_{пр}$ (пунктирные линии), горизонтальная стрелка - начало неупругого деформирования (дилатансии); $\varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3$, АЭ - датчик акустической эмиссии.

Где: N – число импульсов, V_p – скорость распространения продольных волн, К – коэффициент интенсивности напряжений, E_y – модуль упругости, ν – коэффициент Пуассона, Т – длительность первой полуволны АЭ, А – амплитуда сигнала, $\sigma_т$ – предел текучести.

I.3. Экспериментально установлено, что акустическая эмиссия связана и с деформациями и с напряжениями. Это следует и из структурной схемы на рис.I.I. На рис.I.2. приводятся зависимости от уровня нагрузки деформаций осевых ε_1, поперечных ε_2 и объемных ε_v образца базальтового порфирита, одноосно нагружавшегося до разрушения. Для сопоставления даны графики изменения с той же нагрузкой суммарной акустической эмиссии и энергии АЭ (рис.2,б). Очевидна полная аналогия кривых $N = f(\sigma/\sigma_{пр})$, $E = f(\sigma/\sigma_{пр})$ и $\varepsilon_1 = f(\sigma_з/\sigma_{пр})$. В работе Харди с соавторами /28/ отмечается тесная связь между суммарной АЭ с осевой, поперечной и объемной деформациями крипа (рис.I.3 и I.4). Харди установил, что и деформации крипа и суммарная АЭ описываются реологическими уравнениями одного типа, из чего заключил, что эти параметры определяются характером и величиной микротрещинообразования. В наших лабораторных исследованиях /II/ установлено, что вид зависимости суммарной АЭ от деформации существенно зависит от вида напряженного состояния и характера подготавливаемого разрушения образца. Это объясняется тем, что характеристики микротрещин, такие как раскрытие, длина, определяющие коэффициент формы, существенно различны при разных видах напряженного состояния. Отмеченные особенности прослеживаются и при деформировании

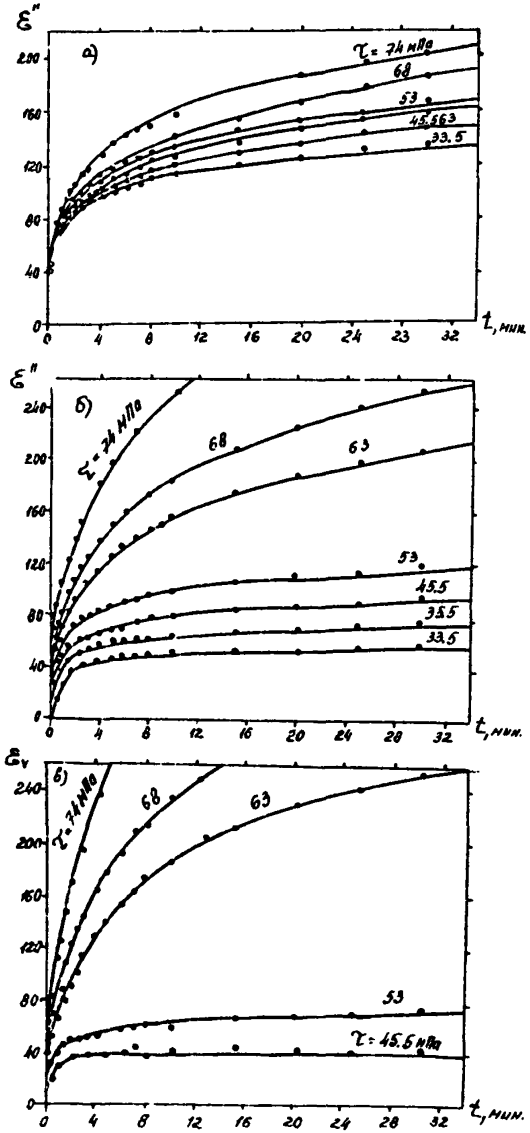


Рис.1.3 Изменение во времени осевой (а), поперечной (б) и объемной (в) деформации крипа в песчанике /28/.

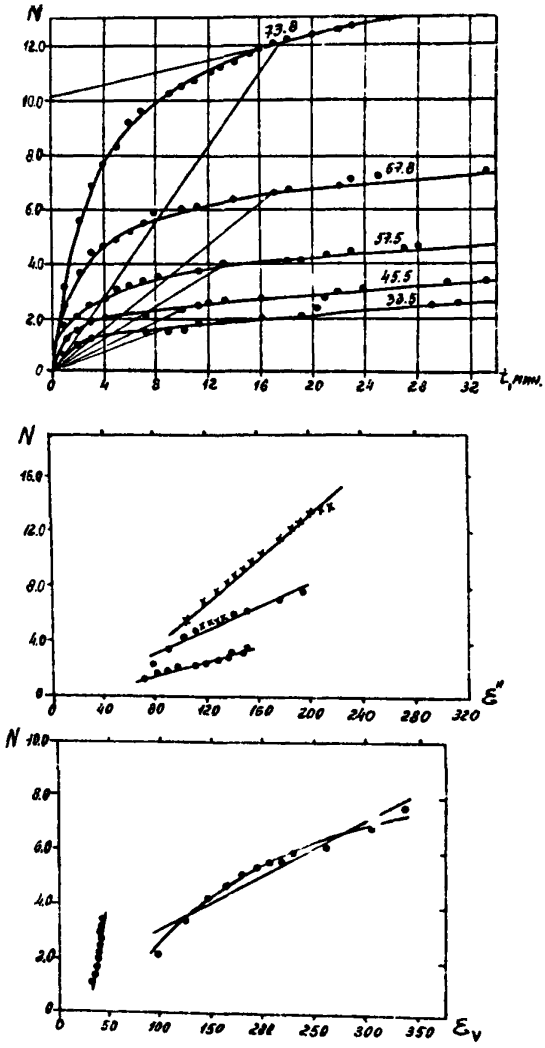


Рис.1.4 Изменение во времени акустической эмиссии (а) и зависимости между суммарной АЭ – осевой деформацией (б) и объемной деформацией (в) крипа в песчанике /28/.

разрушении целиков горных пород. Все исследователи сходятся на том, что акустическая эмиссия является мерой неупругой деформации горной породы, тонко отражающей структурные особенности процесса ее деформирования и подготовки разрушения.

I.4. Эмпирические зависимости, связывающие параметры АЭ с характеристиками НДС получены в работе /28/ при испытаниях на ползучесть (крип) образцов разных типов пород (известняка, песчаника, гранита) при постоянной нагрузке. В процессе нагружения образцов ступенями по $\Delta\sigma$ и выдерживания при нагрузке $\sigma+\Delta\sigma$ в течение 40 мин получены следующие зависимости:

$$N(t) = A + B\varepsilon(t) \qquad (1)$$

а

$$\dot{N}(t) = B\dot{\varepsilon}(t) \qquad (2)$$

и реологическое поведение породы в терминах АЭ тогда выражается

$$N(t) = A + \frac{B_1\Delta\sigma}{E_3} + \frac{B_1\sigma}{E_1}\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right] + \frac{B_2\Delta\sigma}{E_2}\left[1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right] + \frac{B\sigma t}{\eta_3} \qquad (3)$$

и(в предположении, что $\Delta\sigma$ и σ не зависят от t):

$$\dot{N} = \left[\frac{B}{\eta_1}e^{-\frac{t}{\tau_1}} + \frac{B}{\eta_2}e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right]\Delta\sigma + \frac{B\sigma}{\eta_3} \qquad (4)$$

Константа A численно равна акустической эмиссии, соответствующей мгновенной деформации в момент $t_0=0$. Константа B может быть записана, как

$$B = C/\tau_{пр}$$

где C – константа материала, а $\tau_{пр}$ прочность на сдвиг. Тогда

$$\dot{N} = \left[\frac{C}{\gamma_1} e^{-\frac{\tau}{\tau_1}} + \frac{C}{\gamma_2} e^{-\frac{\tau}{\tau_2}}\right] \frac{\Delta\tau}{\tau_{пр}} + \frac{C}{\gamma_3} \frac{\tau}{\tau_{пр}} \quad (6)$$

Из (6) следует, что интенсивность АЭ определяется реологическими свойствами среды (параметры t/τ_1, t/τ_2, γ_i), прочностными ($\sigma_{пр}$, $\tau_{пр}$), величиной напряжений (σ, τ), приращением напряжений ($\Delta\sigma$, $\Delta\sigma$). Здесь первый член в квадратных скобках определяет закон интенсивности АЭ ($\dot{N}$) при приложении нагрузки $\Delta\tau/t$, то есть переходный процесс в стадии первичного крипа. Второй член определяет уровень эмиссии вторичного устойчивого крипа. При $t/\tau_1 \gg 1$

$$\dot{N} = (C/\gamma_3) \times (\tau/\tau_{пр}) \quad (7)$$

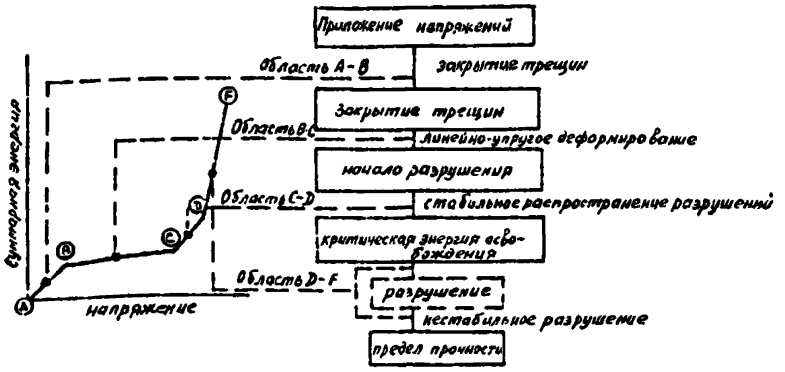
Отсюда следует, что интенсивность АЭ ($\dot{N}$) определяется величиной действующих напряжений (сжимающих или сдвиговых). Полученные Харди результаты связывают параметры АЭ с характеристиками напряженно-деформированного состояния. Сформулируем наиболее важные выводы:

величина суммарной эмиссии N линейно связана с неупругими деформациями среды и определяется ее свойствами, уровнем и приростом напряжений;

интенсивность АЭ ($\dot{N}$) линейно связана со скоростью деформации ($\dot{\varepsilon}$) и уровнем напряжений ($\tau/\tau_{пр}$) и может служить, соответственно, мерой тех и других для конкретного типа пород и условий

Закономерности изменения параметров N, $\dot{N}$ во времени и с нагрузкой могут служить индикатором стадии и характера деформационного процесса.

1)



2)

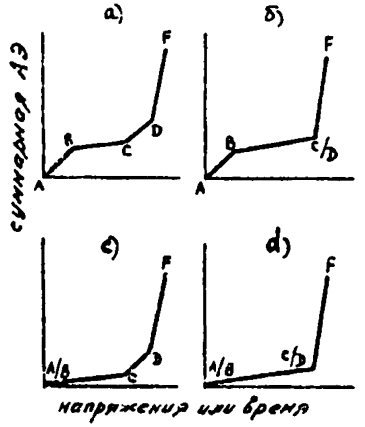


Рис.1.5 Обобщенная кривая суммарной Aθ в зависимости от напряжения по К.Моги /40/ и стадии деформирования при хрупком разрушении по З.Бенявски (1); типы кривых суммарной Aθ в зависимости от напряжения или времени испытаний (2): а - тип I, Моги; б - тип II, нестабильное разрушение (хрупкое); с - тип III, монолитные породы; d - тип IV, монолитные породы, нестабильное разрушение.

Тесная связь параметров АЭ с характеристиками напряженного состояния горных пород позволяет ставить задачу контроля за деформированием среды, определения стадии деформационного процесса от начала приложения нагрузки до разрушения. Основой для этого является тот факт, что деформированию и разрушению горных пород как при быстром нагружении, так и при постоянной нагрузке (во времени), предшествует закономерное изменение деформаций, а, следовательно, параметров АЭ. К.Кайзер /40/ выделил типичные кривые $N = f(\sigma)$ и связал их с различными стадиями по З.Бенявски (рис.I.5-I). На рис. I.5-2 приведены характерные графики изменения суммарной АЭ в зависимости от времени или напряжения.

2. ПРИНЦИПЫ РЕГИСТРАЦИИ АЭ И АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

2.I. Принципы регистрации. Упругий механический импульс напряжений, возникающий в деформирующейся толще массива, достигая точки регистрации (рис.2.I), расположенной на поверхности или в скважине, преобразуется приемником упругих колебаний (I) в электрический импульс. Этот импульс по длинному кабелю подается к регистрирующему и анализирующему тракту. При измерении интенсивности АЭ производится регистрация числа импульсов, превышающих заданный уровень дискриминации (определяемый обычно уровнем помех или задаваемый исследователем) в единицу времени (рис.2.2.). Интервал времени регистрации выбирается в зависимости от интенсивности изучаемых деформационных процессов: при лабораторных исследованиях при быстром нагружении определяется число импульсов в секунду,

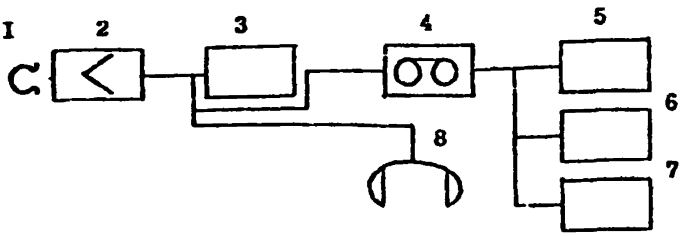


Рис.2.1 Блок-схема регистрации акустической эмиссии: 1 - пьезоакселерометр; 2 - предварительный усилитель; 3 - интегратор; 4 - магнитофон; 5 - запоминающий осциллограф; 6 - шлейфовый осциллограф; 7 - анализатор импульсов; 8 - головные телефоны.

при опытах на ползучесть за единицу времени принимается час. Аналогично, часовая шумность определяется в шахтных наблюдениях по прогнозу горных ударов /I/. В исследованиях напряженного состояния время определяется опытным путем и нормируется к минутному интервалу.

2.2. Блок-схема аппаратуры. Как правило, аппаратура АЭ содержит следующие основные блоки, показанные на рис.2.I. В качестве приемника колебаний (I) применяется пьезоакселерометр или геофон, различающиеся принципом преобразования механического колебания в электрический импульс. В первом случае на пьезокристалл укрепляется инертная масса и сигнал на выходе датчика пропорционален ускорению колебаний поверхности, к которой он крепится. Во втором случае в качестве преобразователя наиболее часто употребляются электродинамические преобразователи, электрический импульс на выходе которых пропорционален скорости смещений поверхности. С преобразователем, как правило, совмещается предварительный усилитель, назначение которого - усиление импульса и согласование выхода датчика с кабелем. Далее по длинному кабелю импульс подается на регистратор (3), в качестве которого используется интегратор или счетчик импульсов (например, частотомер с нормализатором). Импульс может записываться на промежуточный магнитный носитель с помощью магнитофона (4) для дальнейшего анализа, например, перезаписи на фотобумагу через шлейфовый осциллограф (6) или запоминающий осциллограф (5), анализа распределения импульсов по амплитуде посредством анализатора импульсов АИ(7). Возможно для анализа использование микроЭВМ. В этом случае аналоговый сигнал с магнитного носителя с помощью

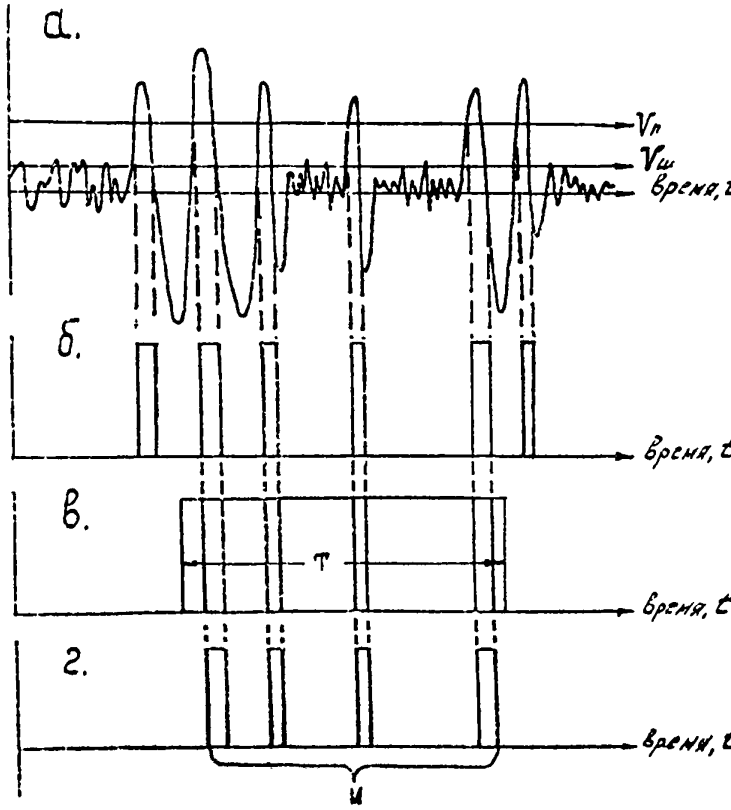


Рис.2.2. Временные диаграммы электрических сигналов в разных точках схемы интегратора: а - на входе компаратора; б - на выходе компаратора; в - на выходе блока управления, определяющего время Т счета импульсов Δθ; г - на входе счетчика импульсов. $V_п$ - пороговое напряжение срабатывания прибора, $V_ш$-уровень шума.

Таблица 2

Наименование прибора	Число каналов	Регистрируемые параметры	Диапазон измерения параметров	Время измерения параметра	Полоса частот, Гц	Коэфф. усиления, дб Ш/общ.	Питание В	Потр. мощн. вт	Вид индикации	Время непрер. работы час	Вес, кг	Фирма разработчик	Примечания
I Аппаратура сейсмо-акустического контроля "Гроза-4"	4	N, $\dot{N}$ прослушивание через IT	0÷9999	I,5,I5,30мин I,3,6,8,I2 24 час	I00÷400000	30 70	от сети I27/220 от батареи +I2	20	цифровая	48	20	НПО Сибцветметавтоматика, Красноярск	Имеет фильтры ФНЧ и ФВЧ: I009,I60,3I5, 600,1250,2500 5000,I0000
2 Регистратор АЭ "Прогноз-М"	I	N, прослушивание через IT	0÷9999	5,I0,60,600с, непрерывно	I000÷50000	20 –	от батареи I2	0,6	то же	6	3	ИФиМГП x) АНКиргССР г.Фрунзе	Имеет фильтр ВЧ и зарядное устройство
3 Портативный комбинированный цифровой измеритель параметров сигналов акустической и электромагнитной эмиссии АЭР "КОМБИ"	I	АЭ: N, $\dot{N}$	0÷99999	8,I6,32,64xx) I28,256,5I2, I024,2048, 4096,8I92сек	I00÷2000xxx) 500÷2000 или 50 2000÷40000, 8000–40000	50	автономное от внутр. источника	–	–"–	–	4	ИФиМГП г.Фрунзе	
		ЭМЭ N, $\dot{N}$	0÷9999	–"–	50000÷ 500000		то же	–	–"–	–			
4 Переносной взрывозащищенный цифровой регистратор АЭ" АЭР-ШВ"	I	N, $\dot{N}$	0÷9999	I,5,I0,60, 600сек, непрерывно	4000–I0000	–	–"–	–	–"–	40	–	ИФиМГП, г.Фрунзе по методике ВНИМИ	Имеет зарядное устройство
5 Портативный цифровой измеритель параметров сигналов АЭ "АЭР-2Ш"	2	N, $\dot{N}$	0÷9999	8,I3,32,64xx) I28,256,5I2, I024,2048 4096,8I92сек, непрерывно	I00–2000xxx) 500–2000, 2000–40000, 8000–40000, I600–40000	50	автономное от внутр. источника	–"–	–"–	–	4	ИФиМГП, г.Фрунзе	
6 Регистратор АЭ для режимных наблюдений	2	N	0÷9999	I час	I00÷2000	–	автоном. от батареи	–	–"–	256	I	ВПИиНИО "Гидропроект" г.Москва	По истечении I0 суток автоматич. регистрации считывает почасовую АЭ
7 Импульсный прецизионный шумомер: модель 2209, 22I0	I	N, A	При работе непрерывно с акселерометром – не указан		I0÷70000 20÷20000	90	автоном. 3xI,5в	–	стрелочн. индикатор	–	до I	"Брюль и Кьер", Дания	Имеет выходы на самописец, магнитофон, фильтры

x:) Институт физики и механики горных пород АН Кирг.ССР
xx) По усмотрению заказчика устанавливается пять дискретных интервалов из указанного ряда
xxx) Диапазон частот выбирается заказчиком

аналогово-цифрового преобразователя преобразуется в цифровой код и далее производится анализ сигнала по заданным программам (расчет спектра, анализ амплитуд, распределения по энергии или амплитуде и т.п.). Как правило, в схему регистрации включаются головные телефоны (6), позволяющие контролировать процесс регистрации "на слух". Схема регистрации может усложняться за счет увеличения блоков, позволяющих регистрировать большее число параметров. Подобные дополнения, обычно, указываются в инструкциях по эксплуатации регистраторов.

2.3. Аппаратура для регистрации АЭ. Аппаратура для проведения акустико-эмиссионных исследований выпускается в СССР и за рубежом специализированными предприятиями, производственными объединениями, фирмами мелкими сериями или по индивидуальным заказам. Лабораторные приборы и установки в настоящих рекомендациях не рассматриваются и достаточно подробно описаны в научно-технической литературе (3,15) и проспектах предприятий-изготовителей. Обзор полевых приборов и их технические характеристики приводится в таблице № 2. Некоторые из этих приборов (Гроза-4, Прогноз-М) опробованы в практике геофизических исследований на ряде гидротехнических объектов в СССР.

3. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ КРИТЕРИИ СТАДИИ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ

В соответствии с экспериментальными работами существует градация стадий напряженно-деформированного состояния горных пород, представленная в столбцах 2-5 таблицы 3. (рис.I.I,а):

Таблица 3

№ стадии НДС	Наименование стадии НДС	Уровень напряжений $\tau/\tau_{пр}$	Описание микроструктурных процессов	Уровень интенсивности АЭ $\dot{N}/\dot{N}_м$
I	Неупругое деформирование	0,2	Обжатие трещин, разрушение слабых элементов	0,05
2 II	Линейно-упругое поведение	0,2÷0,5	Упругое деформирование скелета	0,05÷0,13
3 III	Упруго-пластическое деформирование (дилатансия)	0,5÷0,9	Микрорастрескивание и скольжение по поверхностям	0,13÷0,22
4 IУ	Разрушение	0,9÷I,0	Накопление микродефектов, формирование макротрещины, скольжение по макроразрыву	0,22÷I,0
5 У	Запредельное деформирование	I,0	Скольжение по макроразрыву	I,0
6.	Норм тивный критерий квазиупругого состояния	0÷0,3		0,I3

В основе определения стадий НДС соотношение

$$\dot{N}/\dot{N}_м = C(\tau/\tau_{пр}) \qquad (8)$$

где С - константа, определяемая экспериментальным путем, $\dot{N}_1$ - уровень интенсивности АЭ, соотв тствующий разр шению материала или пород..

Из выражения (8) можно определить относительную величину

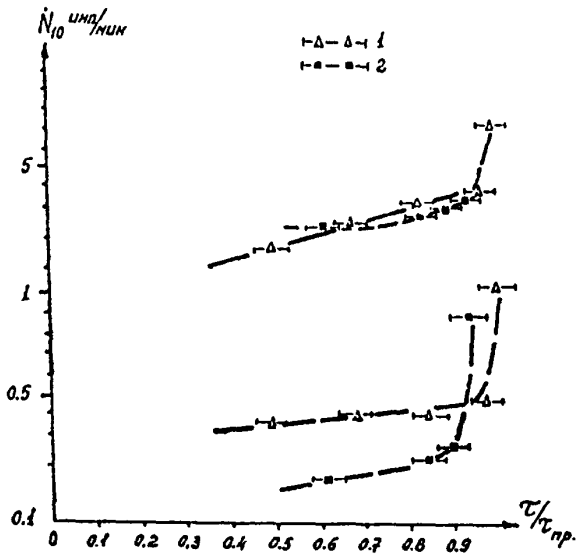


Рис.3.1 Зависимость $\dot{N}$ от уровня сдвиговых напряжений для образцов песчаника (1), гранита (2). Верхние кривые для первичного крипа, нижние - для вторичного крипа, $\dot{N}$ рассчитано по 10-минутным замерам АЭ. [28].

$\dot{N}/\dot{N}_м$, соответствующую каждой стадии НДС. В последнем столбце таблицы № 3 приведены критерии, полученные из экспериментальной работы Р.Харди /28/ (рис.3.I). Строго говоря, в упругом состоянии среда не должна излучать импульсы АЭ. Однако К.Моги /40/ показано, что в неоднородных среднепрочных материалах и породах излучение импульсов АЭ присутствует на всех стадиях нагружения. Это связано с тем, что при среднем уровне напряжении в объеме на отдельных неоднородностях возникает концетрация напряжений, приводящая к их растрескиванию. Поэтому в данном случае (стадия II) можно говорить о квазиупругом состоянии. Данные таблицы № 3 используются для определения уровня напряжений в массиве и бетонной обделке, а также других материалах.

4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ

4.I. АЭ измерения в скважинах и шпурах. Этот вид наблюдений позволяет получить акустико-эмиссионный разрез скважины, отражающий распределение напряжений ($\bar{\tau}/\tau_{пр}$) и скоростей деформаций $\dot{\varepsilon}$ вдоль ее оси. По уровню АЭ ($\dot{N}$) в разрезе скважины выделяются зоны интенсивного деформирования. На рис.4.I. показана схем проведения измерений в наземных скважинах (а) и шпурах, пробуренных из подземных выработок (б). Одно- или двухканальный зонд (I) устанавливается на заданной глубине скважины (2), прижимается датчик (3) к стенке с помощью пневматического прижима (4), выдерживается в течение некоторого времени ожидания Δt_o пока происходит стабилизация контакта датчиков с породой. (релэксация контактных напряжений, раздавливание микрочастиц породы и т.п.), а затем производится

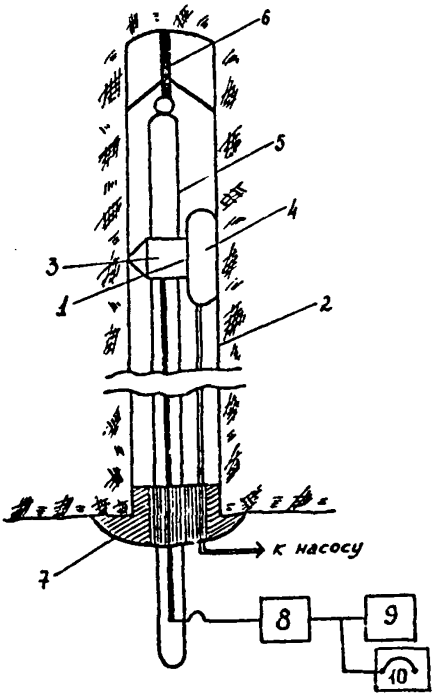


Рис.4.1 Схема проведения измерений в восходящей скважине.

1 - зонд
2 - скважина
3 - приемник
4 - пневмоприжим
5 - тросик
6 - блок
7 - звукоизолирующая заглушка
8 ÷ 10 - регистратор (усилитель, интегратор, наушники)

регистрация АЭ. При изучении восходящих скважин зонд перемещается с помощью тросика, перекинутого через блок, устанавливаемый на забой скважины посредством сборных металлических штанг. После установки штанги извлекаются из скважины и зонд перемещается по скважине только тросиком. Регистрация импульсов АЭ производится в течение "времени регистрации" $t_р$ на участке расположения зонда (стоянке). После окончания регистрации на данной стоянке зонд перемещается на следующую стоянку с шагом $\Delta\ell$, определяемым экспериментальным путем. Обычно в скважинных наблюдениях $\Delta\ell$ составляет 0,5–1,0 м и в интервалах повышенной шумности может уменьшаться до 0,2 м.

На рис.4.2. показаны варианты установки АЭ-датчиков в скважинах при наземных исследованиях по работе /30/.

4.2. Измерение АЭ на поверхности объектов. В ряде случаев целесообразно проводить регистрацию АЭ с поверхности выработок, бетонных конструкций, земли (рис.4.3). В этих случаях регистрирующий датчик располагается на поверхности, предварительно зачищенной и прошлифованной. Для создания надежного акустического контакта поверхность датчика и объекта смазывается солидолом, тавотом или аналогичным смазочным веществом густой консистенции. При режимных наблюдениях оборудуются стационарные пункты наблюдений в виде анкеров, заделанных в бетон или в неглубокий шпур. Глубина шпура выбирается обычно из тех соображений, чтобы разместить преобразователь за пределами зоны интенсивно нарушенных пород. В разведочных выработках (небольшого сечения) размеры этой зоны составляют обычно 0,2–0,4 м. В крупных выемках могут достигать 1,5–2,0 м. В бе-

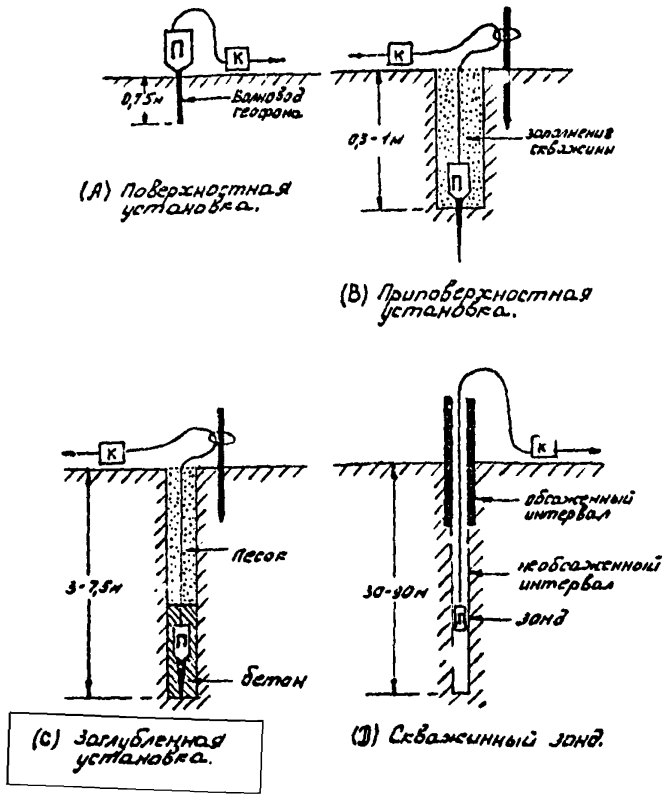


Рис.4.2 Различные методы установки микросейсмических преобразователей при полевых наблюдениях. П - преобразователь, ПУ - предварительный усилитель; К - коммутатор /30/.

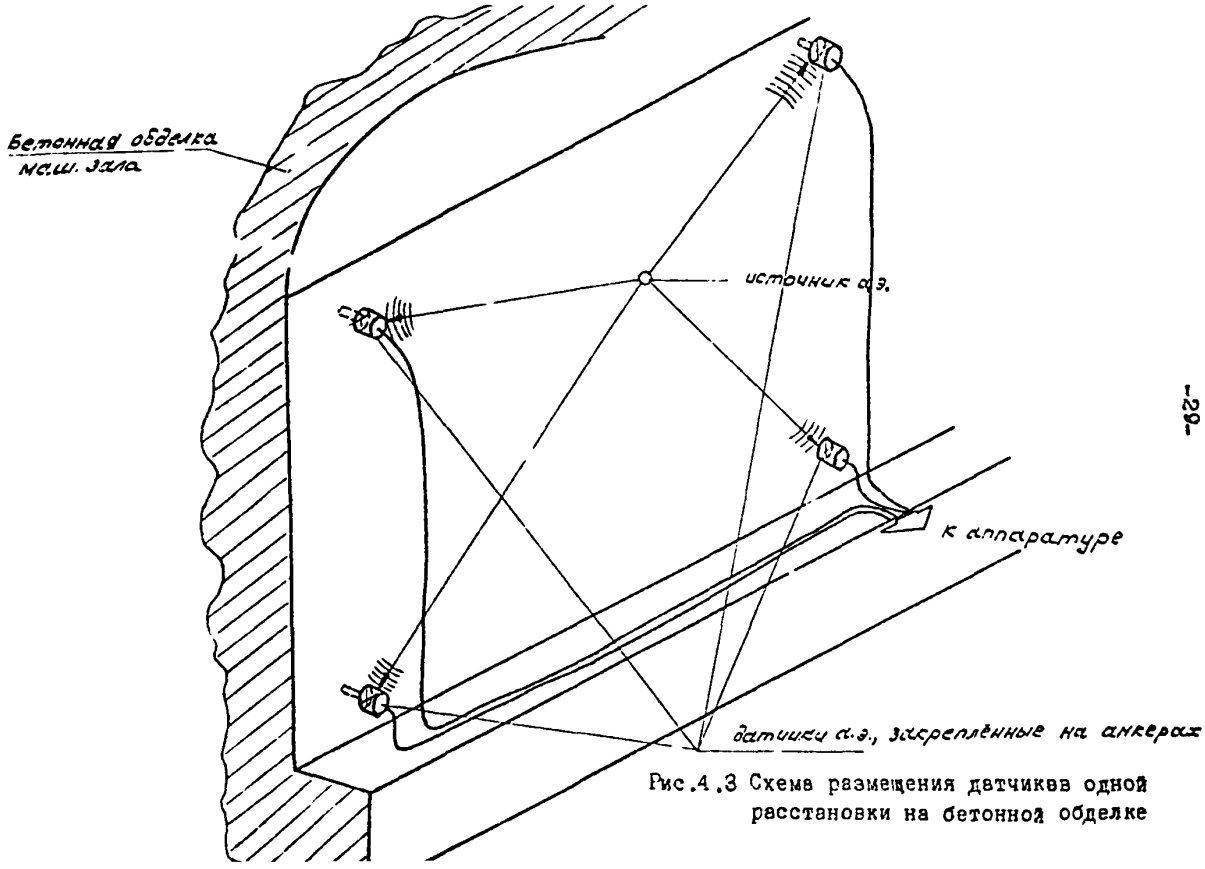


Рис.4.3 Схема размещения датчиков одной расстановки на бетонной обделке

тоне анкер заглубляется на 2-5 см.

4.3. Способы визуализации импульсов АЭ и получения информации. В ранних разработках метода АЭ материалы регистрации представлялись в виде осциллограмм импульсов, записанных на магнитофонную ленту и с помощью шлейфого осциллографа переписанных на фоточувствительную бумагу /I,6/. Визуализированные сигналы (рис.4.4) обрабатывались: определялась амплитуда и частота импульсов, интервалы между импульсами, расчитывались спектры. Подобная методика, слишком громоздкая и трудоемкая, пригодная для научно-исследовательских работ, не подходит для промышленного использования. Первые упрощенные приемы регистрации, внедренные при режимных наблюдениях на шахтах Донбасса /I/, заключались в регистрации и счете импульсов "на слух" оператором с помощью головных телефонов. В дальнейшем усовершенствование методики получения акустико-эмиссионной информации пошло по двум направлениям: во-первых, компьютерной обработки информации в виде аналоговых сигналов, преобразуемых с помощью аналогово-цифровых преобразователей в цифровые коды, и, во-вторых, по пути автоматизированного подсчета числа импульсов, амплитуды, мощности и т.п. В первом случае информация выдается в виде распечаток, во втором - в цифровом виде на светоиндикаторных табло.

4.4. Выбор методики регистрации параметров АЭ. заключается в определении следующих параметров:

- времени ожидания Δt_o ;
- времени регистрации t_p ;
- частоты регистрации f ср;

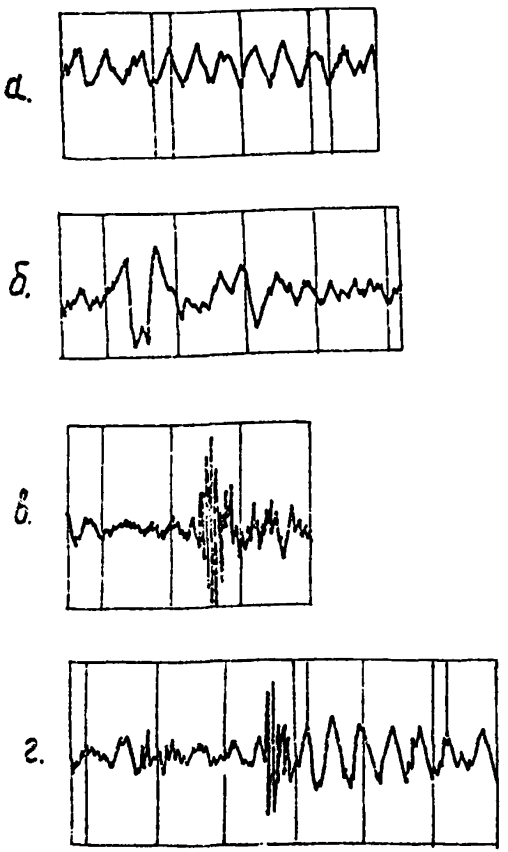


Рис.4.4 Примеры осциллограмм импульсов АЭ,зарегистрированных в отводящем туннеле Кинвали ГЭС: а - импульс помеха 250Гц, б - низкочастотный импульс (треск) 300Гц, в,г - характерные импульсы-трески от трещинообразования 2000Гц. Цена марки на осциллограмме - 0,01с.

– шага измерений $\Delta \ell$.

4.4.I. Выбор времени ожидания Δt_o и регистрации t_p. При прижатии датчика к стенке скважины в зоне контакта датчика с породой возникает концентрация напряжений, которая может привести к локальным структурным нарушениям породы в этой зоне. Кроме того возможно попадание между датчиком и породой мелких частиц, шлама и т.п., которые под давлением датчика растрескиваются создавая импульсы-помехи. Как показывает опыт, указанные процессы длятся около 5 минут после создания давления на датчик. После выдерживания датчика под давлением в течение этого времени приступают к регистрации – прослушиванию и записи полезных сигналов АЭ, которое длится в течение времени t р. При определении времени регистрации считается, что деформирование массива является квазистационарным процессом, отражаемым квазистационарным режимом выделения АЭ. При этом существует некоторое время, средний уровень интенсивности АЭ за которое, характеризуется наименьшей дисперсией в последовательные моменты времени, равные t р. Иными словами величина $\dot{N}$ за каждый интервал t р должна характеризоваться устойчивым значением. Дисперсионный анализ производится до начала измерений в характерной инженерно-геологической зоне массива. Для этого зонд устанавливается в скважине или на поверхности деформируемого массива или бетона и производится непрерывная регистрация интенсивности АЭ в течение 4–5 часов. При этом минутные интенсивности фиксируются в виде ряда наблюдений, являющегося основой для анализа. Полученные значения $\dot{N}_1$ (индекс показывает время, за которое посчитан величина N)

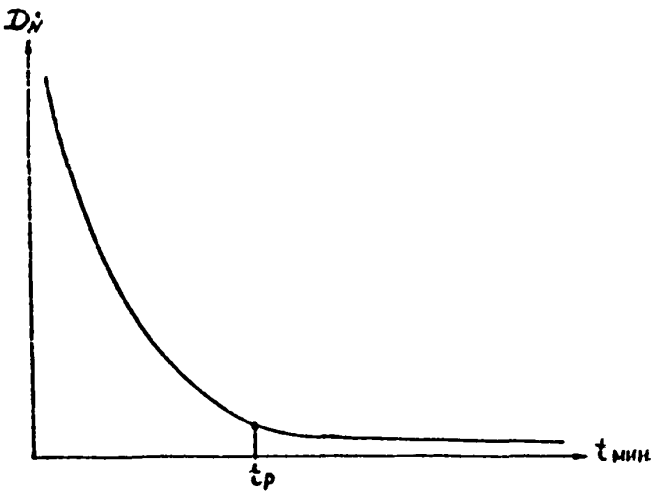


Рис.4.5 Диаграмма для выбора оптимального времени регистрации акустической эмиссии.

заносятся в таблицу (см.Таблицу 4) и производится расчет среднего значения N_i и дисперсии S_{N_i} по стандартной формуле:

$$S_{N_i} = \sqrt{\frac{\Sigma(\bar{N}_i - N_i)^2}{(n-1)}} \qquad (9)$$

Далее величины N в каждые последовательные минутные интервалы суммируются. При этом получается ряд двухминутных значений АЭ N_2 для которых опять расчитывается среднее значение $\bar{N}_2$ и дисперсия S_{N_2}. Далее процедура повторяется суммированием величин N_i за 4, 8, I6 мин и т.д. Строится зависимость дисперсии S_{N_i} от интервала времени суммирования (рис.4.5). Время при котором кривая выходит на асимптоту принимается за минимально необходимый интервал времени регистрации $t_р$. Экспериментально установлено, что чем выше уровень интенсивности АЭ, тем меньше интервал времени регистрации. При исследованиях в глинистых породах Кинвальской ГЭС величина $t_р$ изменялась от 5 до I5 мин. В Рогунских песчаниках и алевролитах - I0 мин.

4.4.2. Определение частоты регистрации. Необходимость решения этого вопроса обусловлена зависимостью частоты регистрируемых от источников волн от расстояния, на которое они распространяются в поглощающей среде, каковой являются горный массив и бетон. Установим датчик АЭ на поверхности массива, (рис.4.6.а), в котором существует акустическая эмиссия в некотором частотном диапазоне $f_н \div f_в$ (рис.4.6.б). При наличии в регистрирующем канале фильтра верхних частот (ФВЧ) с частотой среза f ср, в точке установки приемника будут регистрироваться импульсы, излучаемые из области с границей $\mathcal{L}$, определяемой граничной частотой f ср. Если чувствительность регистрирующего канала позволяет регистрировать импульс с мини-

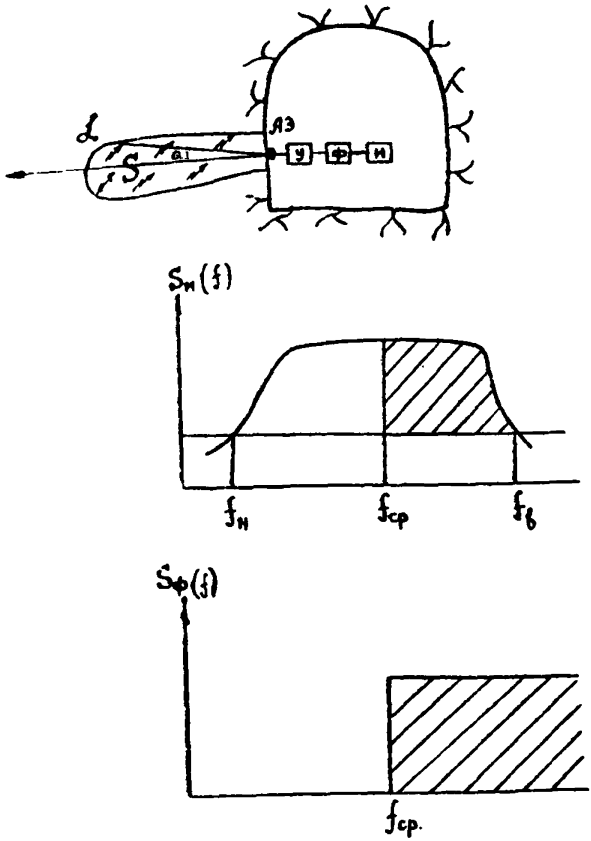


Рис.4.6 Схема безскважинного зондирования массива (а), частотный спектр АЭ, излучаемый породой (б) и частотная характеристика ФВЧ (в) (заштрихована частотная область регистрируемых импульсов).

АЭ - приемник сигналов АЭ, У - усилитель, Ф - фильтр верхних частот (ФВЧ), И - интегратор, S - контролируемая область, $\mathcal{L}$ - ее граница.

мальной амплитудой A_0, то расстояние ℓ на котором амплитуда волны частотой $f_{ср}$ затухнет от величины $A_н$ до A_0 найдется из соотношения

$$\alpha \ell = \ln \frac{A_0}{A_н} \qquad (10)$$

где $A_н$ – амплитуда импульса на границе области ℓ. Учитывая, что в диапазоне частот от герц до десятков килогерц затухание упругой энергии пропорционально квадрату частоты;

$$\alpha = K f^2 \qquad (11)$$

выражение для ℓ запишется:

$$\ell = \frac{\ln\left(\frac{A_0}{A_н}\right)}{f_{ср}^2 K} \qquad (12)$$

Все импульсы с частотами $f \geq f_{ср} (z < \ell)$ регистрируются, а $f \leq f_{ср}$ $(z > \ell)$ не регистрируются, так как полностью затухают. Очевидно, что уменьшая частоту сразу можно прослушивать все более удаленные от стенки глубинные участки массива. По результатам такого зондирования строится зависимость $\dot{N}_0 = \dot{N}_0(f_{ср})$ (рис.4.7б).

С другой стороны существует зависимость $\dot{N}_0 = f(z)$, вид которой зависит от вида распределения $\dot{N} = f(z)$. Например на рис.16 показана зависимость $\dot{N} = f(z)$ для упругого и упруго-пластического распределения напряжений и соответствующего ему распределения $\dot{N}_c = f(z)$. Аналитически эта зависимость выражается следующими формулами:

$$\dot{N} = 0.5 k_1 (z^2 - R_0^2) + C_1 (z - R_0) \quad при\ R_0 \leq z \leq R_e \qquad (13)$$

$$\dot{N} = 0.5 k_1 (R_e^2 - R_0^2) + C_1 (R_e - R_0) + 0.5 k_2 (z^2 - R_e^2) + C_2 (z - R_e) \quad при\ R_e < z < R_p$$

$$\dot{N} = 0.5 k_1 (R^2 - R_0^2) + C_1 (R_e - R_0) + 0.5 k_2 (z^2 - R_e^2) + C_2 (R_p - R_e) + C_3 (z - R_p) \quad при\ z > R_p$$

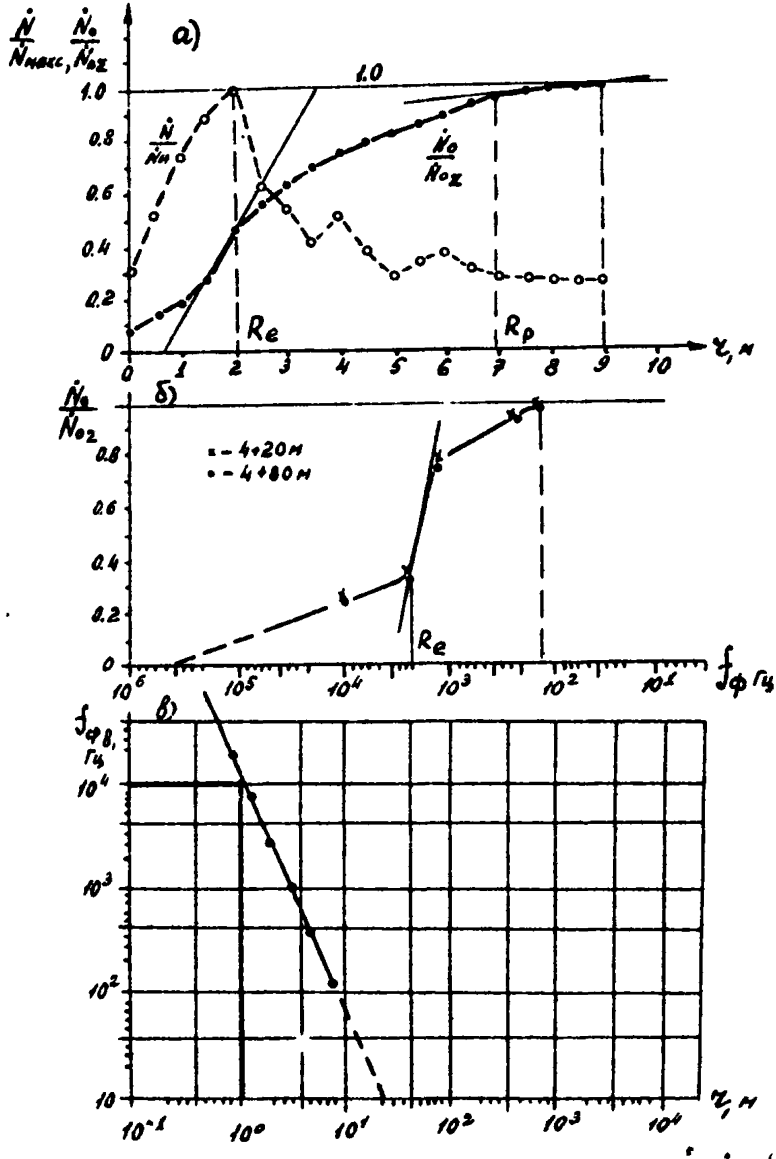


Рис.4.7 Экспериментальные зависимости $\dot{N}/\dot{N}_м = f(z)$ (а), $\dot{N}_0/\dot{N}_{0z} = \varphi(f_{ср_в})$ (б), $f_{ср_в} = \varphi(z)$ (в).

где k_1, k_2 – угловые коэффициенты, C_1–C_3 – константы, определяемые экспериментальным путем.

Практически, определение зависимости $\dot{N}_0 = f(L)$ сводится к определению экспериментальным путем распределения $\dot{N} = f(z)$ (акустико-эмиссионного разреза) и пошагового суммирования интенсивности в соответствии с формулой:

$$\dot{N}_0(z) = \sum_{i=1}^{z/\Delta z} \dot{N}_i(z)\,\Delta z \qquad (14)$$

где: $\dot{N}(z)$ – интенсивность АЭ в интервале глубин $z - z+\Delta z$,

$\Delta z = \Delta l$ – шаг измерения АЭ вдоль оси скважины.

$\dot{N}_0(z)$ – интенсивность АЭ на поверхности (стенке) скважины.

Практическая кривая распределения интенсивности АЭ по скважине и на стенке выработки представлена на рис.4.7,а. Здесь кривые нормируются к максимальному значению интенсивности $\dot{N}_м$, суммарному значению интенсивности на стенке $N_{0\Sigma}$.

На основании двух зависимостей строится третья f ср = $= f(z)$ (рис.4,7,в) позволяющая для заданной детальности измерений z выбрать частоту среза ВЧ f ср.

Данные, представленные на рис.4.7. получены для кимберлитовых глинистых пород. Зависимость интенсивности $\dot{N}_0$ на стенке получена станцией "Гроза-4" применением съемных фильтров ФВЧ. акустико-эмиссионный разрез построен по данным АЭК в скважине, расположенной рядом с точкой прослушивания массива на стенке выработки. Зависимость z от f ср выражается формулой:

$$f\,\text{ср} = -2{,}305 \lg z + 4 \text{ или } f\text{ср} = 10^4 z^{-2{,}305} \qquad (15)$$

Размерность f ср = [Гц], z = [м]

Как видно из (I5) зависимость между величинами $f_{ср}$ и ℓ обратная с показателем степени равным -2,305, близкая к квадратичной. Например, из полученной зависимости следует, что при необходимой детальности измерений I,0м, $f_{ср}$ должна быть IOкГц. Тогда будет регистрироваться АЭ из зоны размером меньше или равной Iм.

4.4.3. Шаг регистрации. При скважинных исследованиях и в туннелях с поверхности стен при выборе шага регистрации исходили из тех соображений, чтобы при выделении аномальных зон на графике распределения интенсивности АЭ вдоль оси скважины или туннеля аномалия описывалась не менее, чем 3-5 точками. Тогда при исследовании строения массива вокруг выработок шаг регистрации не должен превышать величины

$$\Delta\ell = h_p/5 \qquad (I6)$$

где h_p - мощность зоны разгрузки.

Как правило величина зоны разгрузки соизмерима с диаметром выработки. Тогда шаг измерений (максимальный) можно *априори* определить, как $(\emptyset/5)$, где $\emptyset$ - диаметр или пролет выработки. В зонах повышенной трещиноватости целесообразно шаг измерений АЭ уменьшать, увеличивая, соответственно, частоту среза. ФВЧ.

При изучении стен туннелей вдоль оси последних целесообразно за характерный размер принять мощность инженерно-геологических зон или нарушений. Тогда шаг регистрации соответственно будет определяться как $\Delta\ell = \ell/5$, где ℓ - мощность характерной зоны.

Опыт работ ОПИИ Гидропроекта, показывает, что при изучении выработок шаг регистрации составляет не более I,0 м(чаще

всего 0,5 м). Этот шаг регистрации применяется в наземных скважинах при исследовании оползневых массивов. В тунеле Кинвали ГЭС при изучении АЭ в обделке шаг регистрации составлял 10м, в тунелях Рогунской ГЭС-5-10 м.

4.4.4. Определение точки регистрации на контуре выработки. Выбирается в зонах действия максимальных сдвиговых напряжений или изгибающих моментов. Так, для туннеля корытообразного сечения таковым является участок сопряжения свода с боковой стенкой, где наблюдается максимум сдвиговых (или тангенциальных) напряжений а также центральная часть стенки, где действуют максимальные изгибные моменты (рис. 4.8а). При АЭ исследованиях производятся замеры по контуру выработки, строятся эпюры распределения $\dot{N}$, по которым выбирается участок максимальной шумности. Для исключения случайности при выборе точки регистрации такие замеры производятся на 2-3 створах. На рис.4.8б дается пример подобных исследований в обделке отводящего туннеля Кинвали ГЭС.

4.5. Определение строения зоны разгрузки вокруг подземной выработки. Применение метода АЭ для решения этой задачи основано на зависимости ее параметров от характеристик деформационного процесса. Закономерности изменения интенсивности АЭ во времени свидетельствуют об интенсивности (скорости) деформаций в среде и могут служить индикатором стадий ее напряжено-деформированного состояния. Для изучения распределения интенсивности АЭ вокруг выработки разработан способ, основанный на акустико-эмиссионном каротаже скважин (АЭК). Предложенный способ заключается в

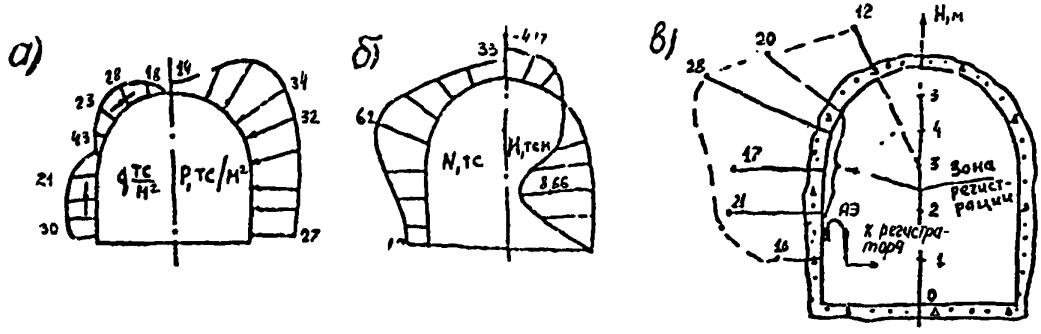


Рис.4.8 Эпюры распределения нормальных (измеренных) и касательных (расчетных) нагрузок на крепь (а); изгибающих моментов и нормальных сил (б); интенсивности АЭ, замеренной в бетонной обделке туннеля (в). (а и б - крепь капитальной выработки на шахте Кочегарка, алевролиты; в - Жинвали ГЭС, аргиллитоподобные глины и глинистые сланцы).

том, что в скважинах, пробуренных с поверхности выработки с помощью перемещающегося вдоль них зонда, регистрируют интенсивность АЭ, возникающую в зоне разгрузки от естественных напряжений, строят график зависимости АЭ от глубины скважины. Обычно, при организации подобных наблюдений разбуривается пояс скважин, что позволяет определять не только распределение напряжений вдоль оси одной скважины, но и конфигурацию поля АЭ вокруг выработки, что дает представление о характере поля напряжений (гидростатическое, одноосное и т.п). Методика измерений описана выше в разделе 4.I. (рис.4.I). По результатам замеров строится график распределения интенсивности АЭ от глубины скважины (рис.4.9). Мощность зоны разгрузки определяется по графику в точке выхода кривой на асимптоту $\dot{N} = \dot{N}_{ф}$.

5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПОДЗЕМНОГО ГИДРОТЕХНИЧЕСКОГО СТРОИТЕЛЬСТВА

5.I. Разработанные методики уже нашли применение при решении практических задач гидроэнергетического проектирования и строительства на ряде объектов в СССР (Кинвали, Худони, Рогунской ГЭС, Загорской ГАЭС).

5.2. Определение характера распределения напряжений вокруг горных выработок произведено в отводящем туннеле Кинвали ГЭС. Изучение более 20 скважин показало, что практически во всех случаях распределение интенсивности АЭ вдоль оси скважин имеет характерный вид с максимумом на глубине 4-5 м (рис.5.I).Как следует из раздела I.6 распределение $\dot{N}$ отражает соответствующее распределение сдвиговых напря-

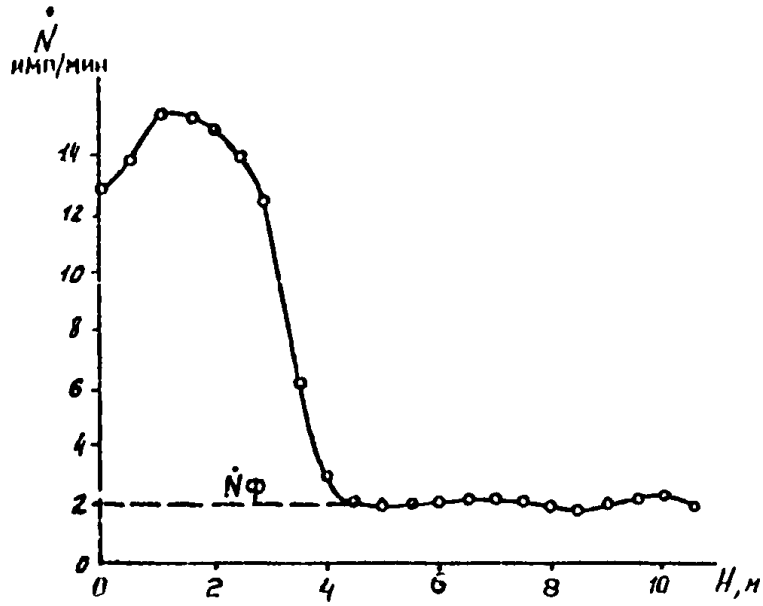
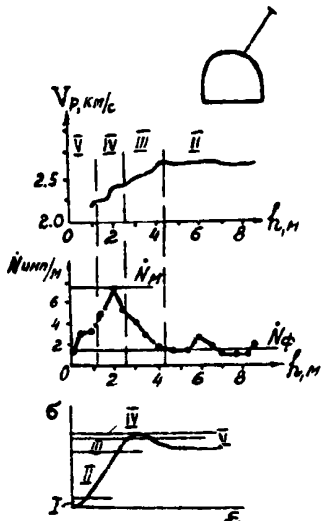


Рис.4.9 График распределения интенсивности АЭ, $\dot{N}$, по глубине скважины.



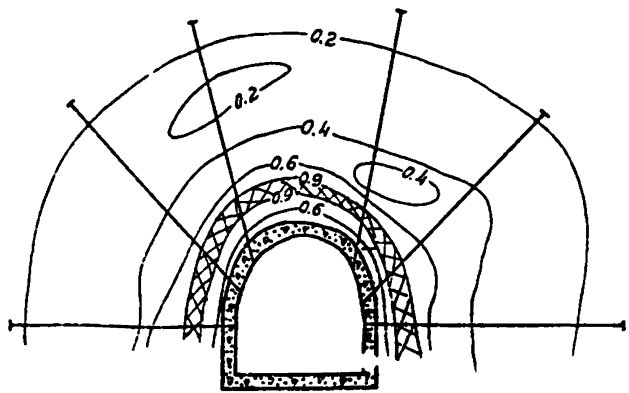


Рис.5.1 Распределение по длине скважины скорости продольных волн (а) и интенсивности акустической эмиссии (б) на ПК 23+60; в) стадии напряженно-деформированного состояния; г) схематизированный разрез туннеля в изолиниях $N/\dot{N}_м$ на ПК 21+54; I - стадия неупругого деформирования, II - квазиупругая стадия, III - упруго-пластическая, IV - стадия разрушения, V - пластическое деформирование; заштрихована зона максимальных значений $\dot{N}$ ($\dot{N}/\dot{N}_м > 0,9$)

кений вдоль оси скважин. В сочетании с распределением скоростей упругих волн приведенные данные свидетельствуют об упруго-пластическом распределении напряжений. По результатам изучения веера скважин удалось построить схематизированный разрез в изолиниях $\dot{N}$. Круговая симметрия изолиний может свидетельствовать о гидростатическом характере поля напряжений в плоскости, нормальной к оси туннеля.

5.5. Контроль за проявлением горного давления на обделку туннеля выполнялся в отводящем туннеле Кинвали ГЭС, транспортном туннеле Рогунской ГЭС, машинных залах Худонской и Рогунской ГЭС. В основе интерпретации данных классификация, представленная в разделе 3.2. Считается, что напряженное состояние обделки туннеля является мерой давления на обделку со стороны массива. По разработанной методике проводились замеры акустической эмиссии в бетонной обделке вдоль всей трассы туннеля. Время регистрации t_p =15 мин, шаг измерения вдоль оси туннеля - 10 м при частоте среза $f_{ср.}$ =50 кГц, контролируется метровая толща обделки. Эпюра распределения $\dot{N}$ вдоль оси туннеля представлена на рис.5.2. Здесь представлены несколько циклов измерений, проведенных в разное время. Первые два цикла, выполненные с интервалом в неделю в июле 1985 года показывают (рис.5.2а) повторяемость измерений. На эпюрах выделяются зоны повышенной интенсивности АЭ, уровень которой выходит за допустимый критерий. На этих участках проведены укрепительные мероприятия: несколько очередей цементации, анкерование массива, после каждого мероприятия производились контрольные замеры

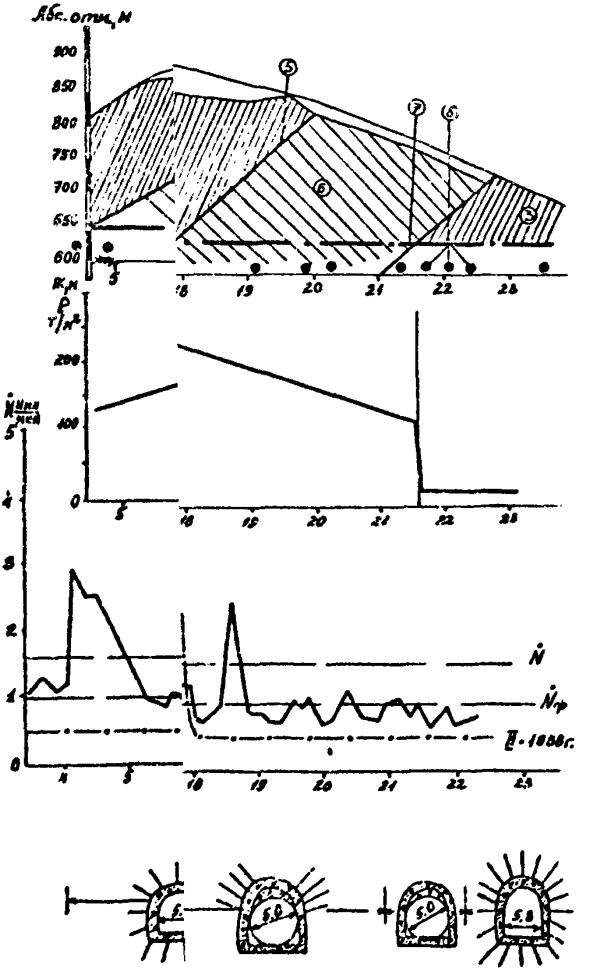


Рис.5 контроля горного да ления
летные эпюры прогнозируемо-
в разные периоды; г) вид

-глинистые сланцы и аргил-
раницы зон различной лито-
асса туннеля; 8-створы
же, в феврале 1988г.;
вх.

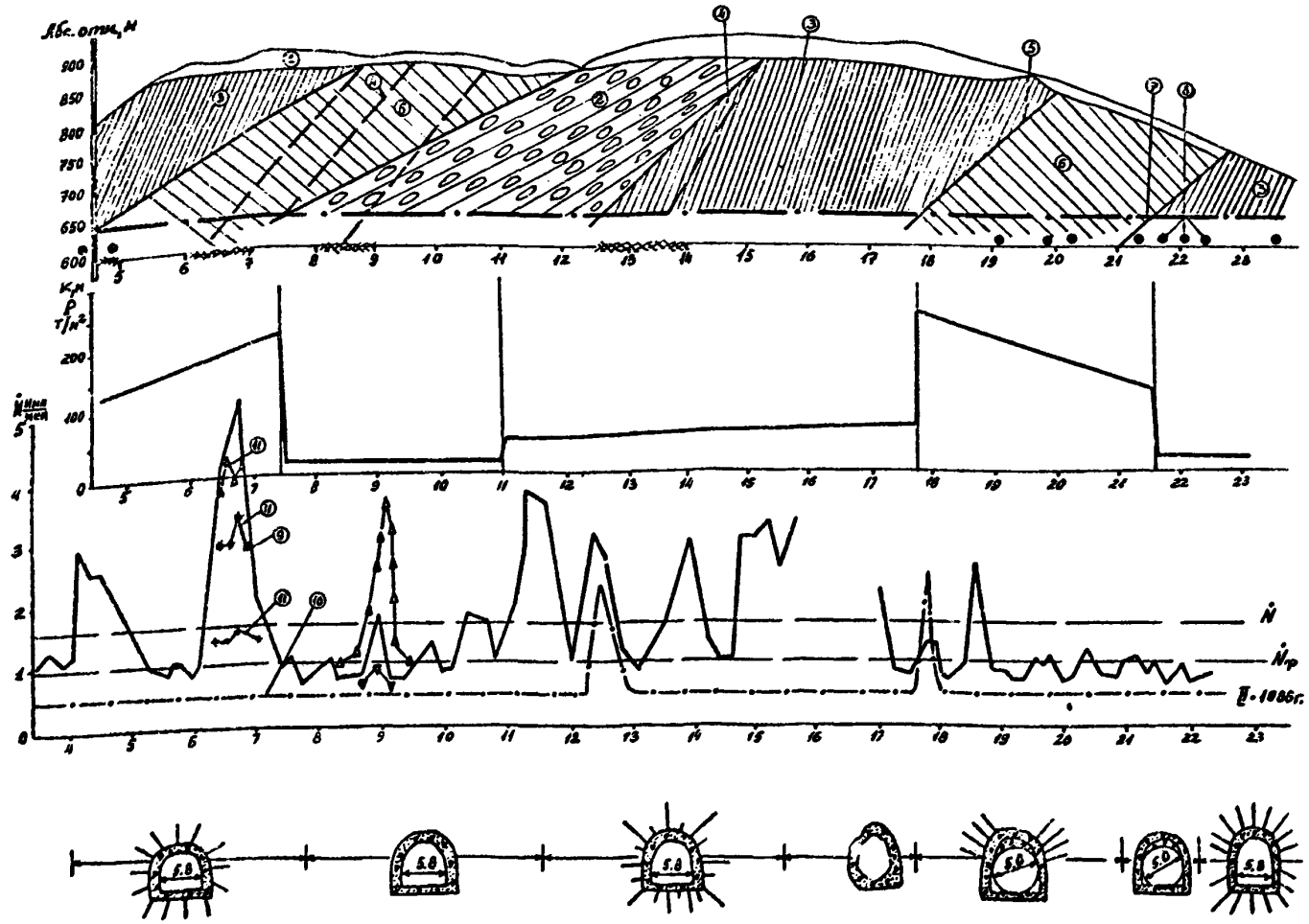


Рис.5.3 Комплексный анализ результатов геофизического прогноза и контроля горного да ления по трассе туннеля: а) геолого-геофизический разрез; б) расчетные эпюры прогнозируемого горного давления; в) эпюры интенсивности АЭ в обделке в разные периоды; г) вид крепления и обделки.

1- четвертичные отложения; 2-глинистые песчаники; 3-глинистые сланцы и аргиллитоподобные глины; 4-альтернативные варианты границ; 5-границы зон различной литологии и сохранности; 6-зоны тектонических нарушений; 7-трасса туннеля; 8-створы ультразвуковых наблюдений; 9-эпюра $\dot{N}$ в июле 1985г.; 10-то же, в феврале 1988г.; 11-промеж уточные контрольные замеры на аномальных участках.

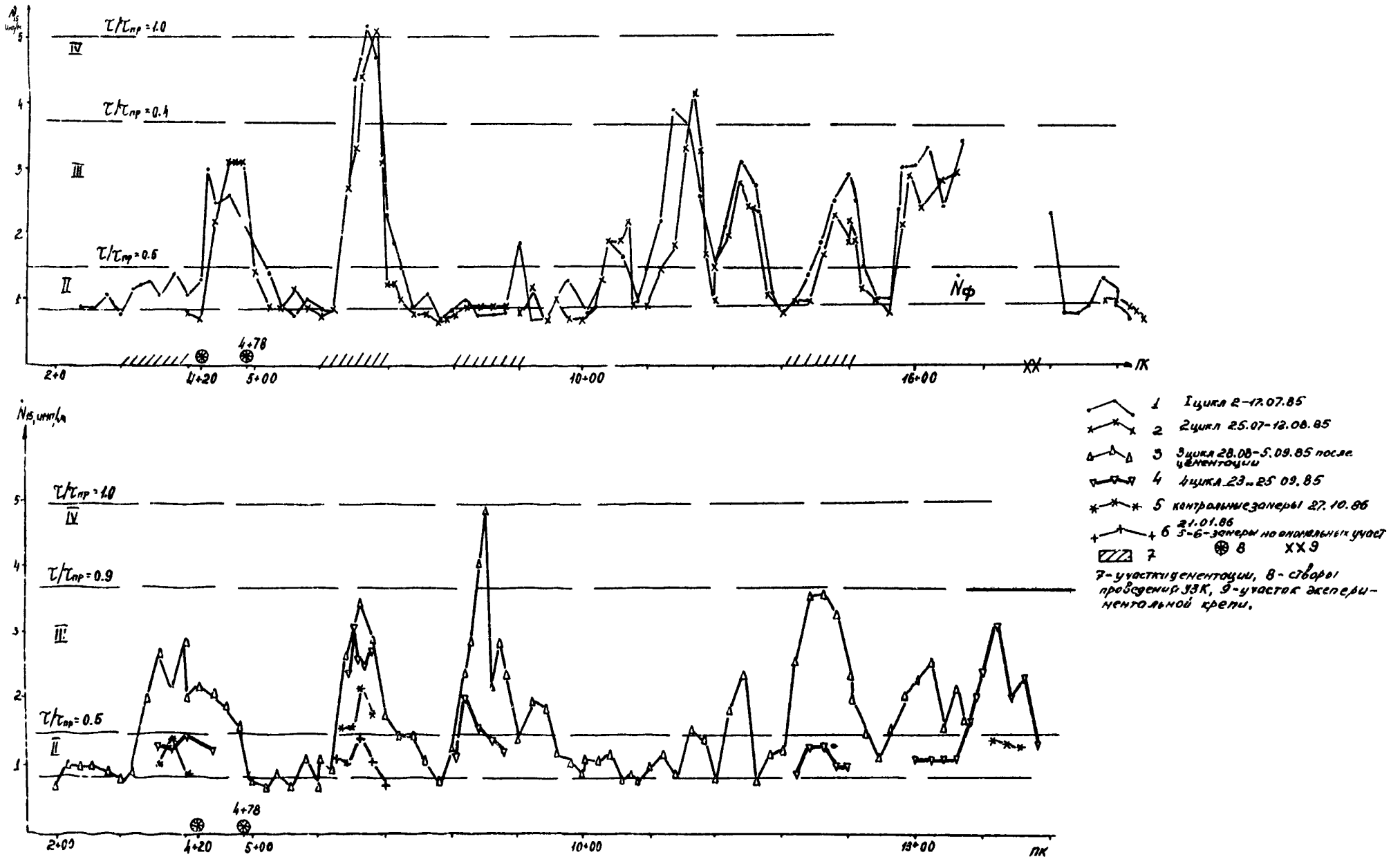


Рис.5.2 Распределение интенсивности АЭ $\dot{N}_{15}$ вдоль трассы туннеля в разные периоды времени. Пунктирные линии – уровни напряженного состояния бетона, римские цифры – стадии состояний .

(рис.5.2б), пока в результате не удалось снизить уровень АЭ до допустимого. Рис.5.3 показывает сопоставление эпюры распределения АЭ с прогнозировавшимися инженерно-геологическими условиями по трассе туннеля (рис.5.3а) и горным давлением на обделку (рис.5.3в). Сопоставление прогнозных данных с результатами АЭ контроля показывают хорошее соответствие. В среднем, повышенные уровни интенсивности АЭ наблюдаются в зонах разломов и низкопрочных пород, в более высокопрочных породах уровень эмиссии ниже. На рис.5.3 показаны схемы крепления туннеля, позволившие добиться снижения АЭ в обделке и стабилизировать деформационные процессы в ней. В контрольном цикле измерений, проведенном в феврале 1988 г. после остановки и опорожнения туннеля данные показывают, что уровень $\dot{N}$ снизился, практически до нуля. за исключением двух участков на ПК I2+70÷I2+80 и I7+90÷I8+00, где допустимый уровень АЭ, пока не достигнут. Пониженный уровень эмиссии на участке между пикетами I7+00÷22+00 объясняется тем, что на данном интервале туннеля к моменту проведения измерений обделка была усилена, за счет вписывания в корытообразную кровлю круговой, диаметром 5 м.

На рис.5.4 показаны временные изменения АЭ в обделке с момента вступления обделки в работу до стабилизации деформаций массива и обделки. Характерно, что графики $\dot{N}=f(t)$ и смещений бетонной стенки $U=f(t)$, а также интенсивности АЭ $\dot{N}$ и скорости деформаций $\dot{U}$ имеют одинаковый вид, показанный на рис.5.5[x)]

---

x) Величины смещений измерены Ереванской лабораторией ГРУЗНИИЭПСа.

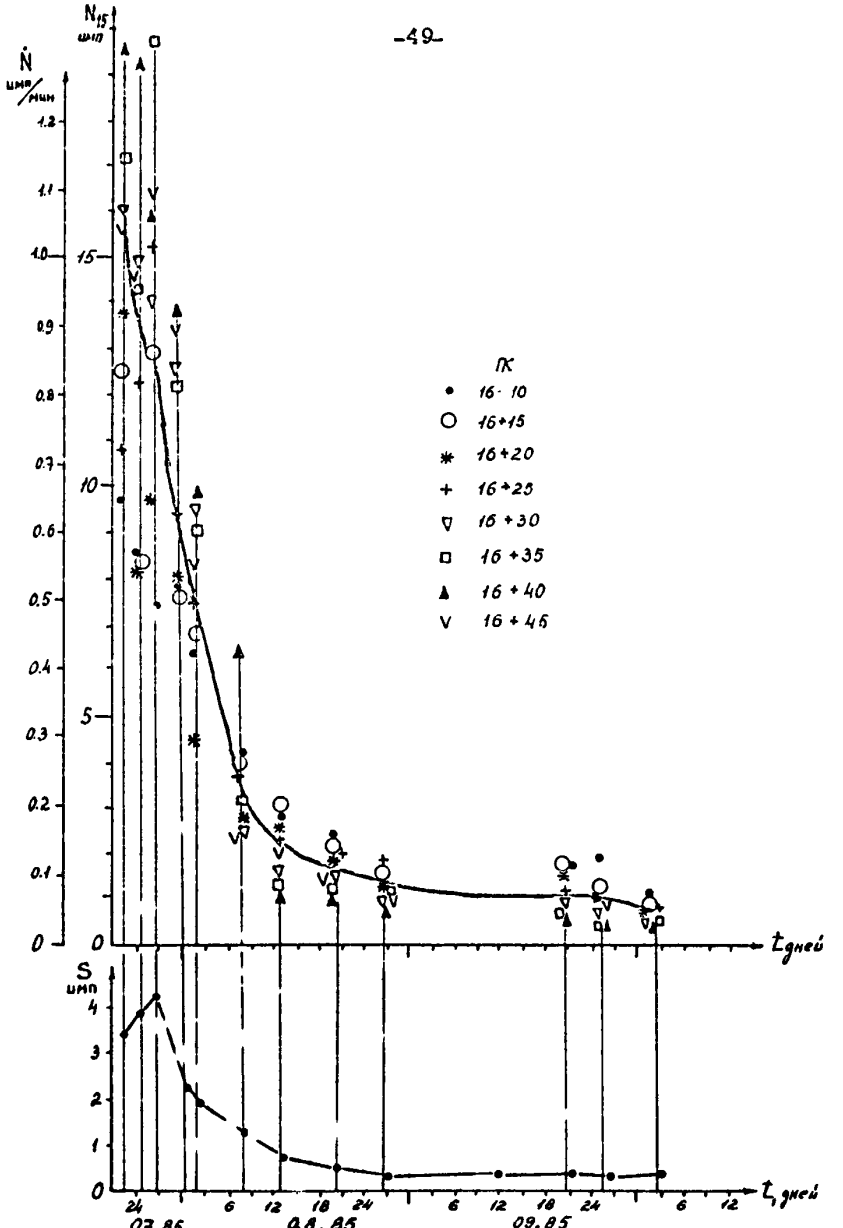


Рис.5.4 Изменение во времени интенсивности АЭ на участке опытной крепи (а) и дисперсии S^2 (б). Сводная кривая (ПК 16+10 ÷ 16+46).

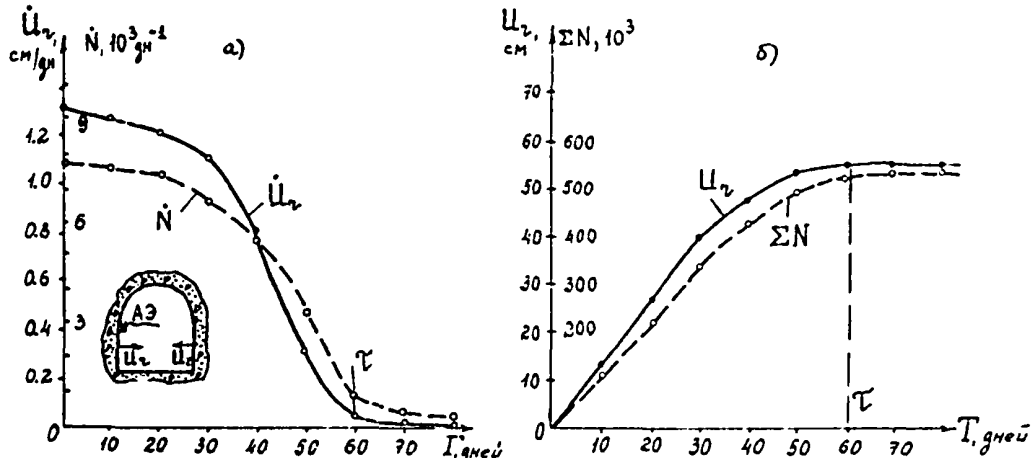


Рис.5.5 Графики изменения во времени скорости смещения контура обделки туннеля $\dot{U}_z$ и интенсивности АЭ $\dot{N}$ (а), а также величины смещений U_z и суммарной АЭ N (б). АЭ – датчик АЭ, $\vec{U}_z$ – вектор смещения, τ – время стабилизации деформаций.

5.4. Контроль в основаниях высоких плотин. Известен опыт применения метода АЭ для контроля за деформационными процессами в основании гравитационной бетонной плотины Пассанте[x)] в Южной Италии /46/. В скважинах, пробуренных из потерн через бетон плотины в скальное основание, в котором стационарно размещены 8 гидрофонов. Записи АЭ производились на 24-канальный регистратор РСМ8КІО. Частотный диапазон регистрации от 0 до 400 Гц (хотя признано целесообразным расширить его до 1000Гц. На основании построенной по данным каротажа и сейсмических исследований трехмерной скоростной модели основания, на ЭВМ по специальной программе производится локализация очагов АЭ. Распределение очагов в сечении и по площади плотины приводится на рис...6. Очевидно, что источники АЭ приурочены, в основном, к приконтактной зоне скального основания и группируются в тонком прослое микашитов, заключенном между биотитовыми и крупнозернистыми гнейсами. АЭ наблюдения компенсируются с регистрацией микросейсмического режима участка водохранилища. Отмечалась связь во времени между возникновением АЭ и микроземлетрясениями. В начальный период наблюдений не замечено связи между заполнением водохранилища и микросейсмическим режимом.

---

x) Плотина возведена на реке Пассанте, высота 70м, объем водохранилища 35 млн.м3. Скальное основание сложено метаморфическими породами: биотитовыми и крупнозернистыми гнейсами микашитами

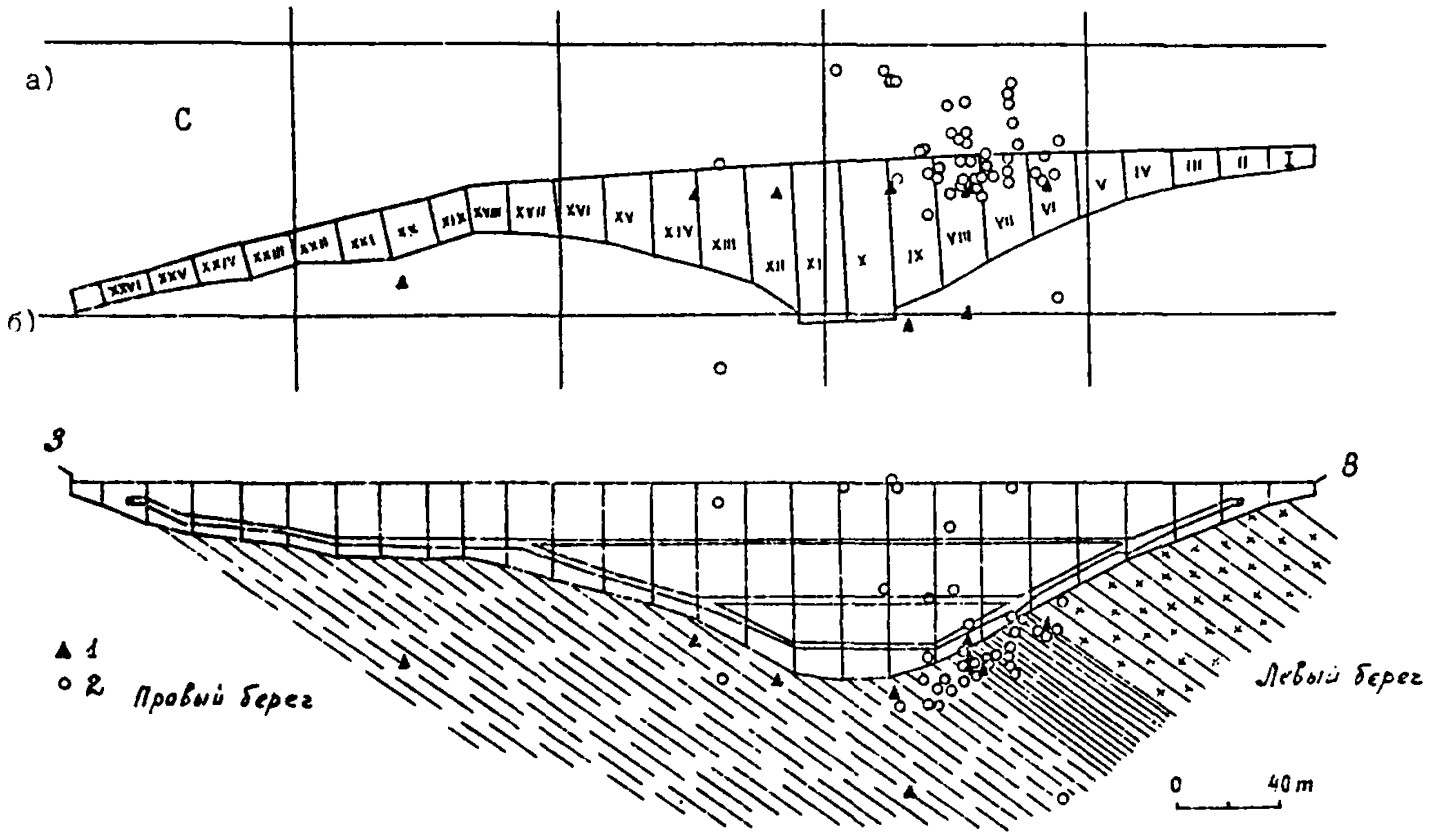


Рис. 5.6 Распределение очагов АЭ по площади (а) и в осевом сечении (б) плотины Лассанте
I - гидрофоны, 2 - очаги АЭ

5. Исследование в оползневом склоне Загорской ГАЭС. Работа проводится с целью контроля за деформационными процессами в оползневом массиве. На первом этапе исследований выделены плоскости скольжения в разрезе оползня, определить которые другими методами было невозможно (рис.5.7). Построены акустико-эмиссионные разрезы скважин в оползневом теле которых выделяются зоны повышенной интенсивности АЭ, приуроченные к слою алевритистых глин, являющихся плоскостями скольжения. При этом из разрезов видно, что в левобережном оползне интенсивность АЭ выше, чем в правобережном, что свидетельствует, соответственно, о более интенсивно протекающих там деформационных процессах. В настоящее время проводятся режимные наблюдения методом АЭ за развитием движений в оползнях Загорской ГАЭС.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод акустической эмиссии в последние годы находит широкое применение для решения практических задач проектирования и строительства инженерных сооружений. К числу наиболее важных задач, актуальных в гидроэнергетике, можно отнести:

- контроль устойчивости подземных выработок;
- оценку напряженно-деформированного состояния и измерения абсолютных значений напряжений в массивах скальных пород;
- контроль горного давления на обделки туннелей и подземных сооружений большого сечения;

x) Наблюдения выполняются В.В.Ждановым

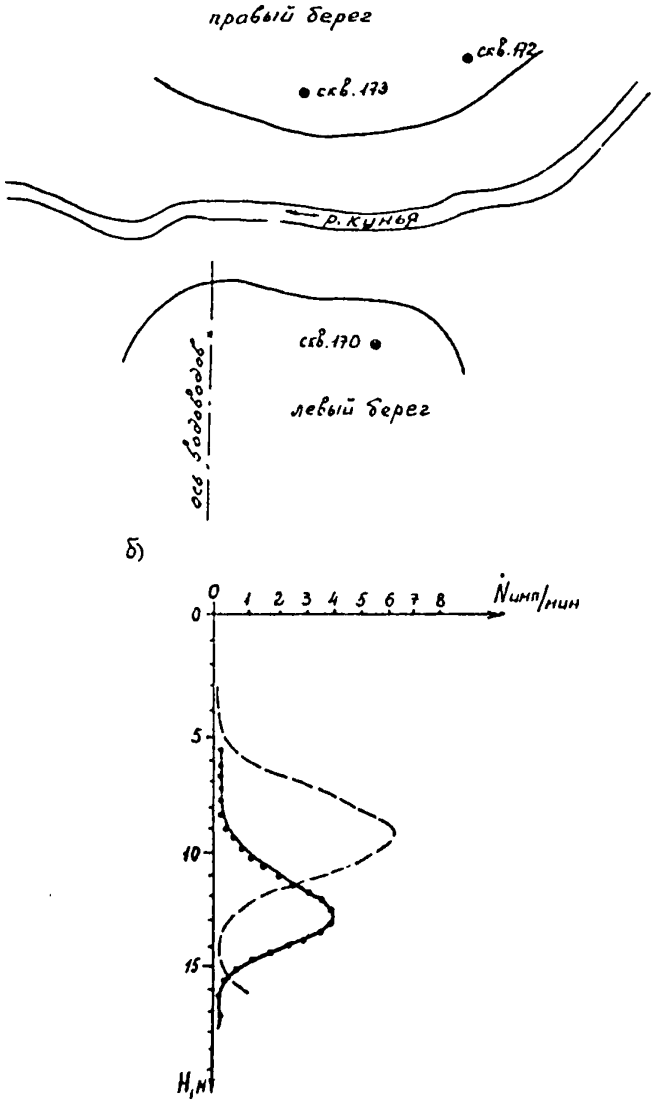


Рис.5.7 Схема наблюдений (а) и акустико-эмиссионные кривые (б) для скважин №172 (1) и №170 (2) на оползневых склонах Загорской ГАЭС (данные Ждянова В.В.)

– контроль сползневых процессов в грунтах и скальных массивах

Некоторые из перечисленных задач нашли уже применение на отдельных объектах гидроэнергетического строительства. Возможность их решения основана на прямой связи параметров АЭ с напряжениям, деформациями и их производными по времени. Разработана методика проведения исследований, определения различных параметров АЭ, обработки результатов и их интерпретации. Дается обзор выпускаемой отечественной и зарубежной аппаратуры.

Список литературы

I. Анциферов М.С., Анциферова И.Г., Каган Л.Я. Сейсмоакустические исследования и проблема прогноза динамических явлений. Наука, М., 1971.

2. Анциферов М.С., Анциферова И.Г., Применение метода акустической эмиссии для оценки состояния угольного массива и прогноза динамических явлений.

3. Богданов П.А. Опыт применения звукометрического метода наблюдения за разрушением массивов горных пород в Кривбасском бассейне. Сб.научных трудов., вып.I. Москва, "Металлургиздат", 1957.

4. Бойко Г.К. Связь между эпюрой горного давления и характером сейсмоакустического режима угольного пласта. С.б: "Применение сейсмоакустических методов в горном деле", М.Наука,1963.

5. Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород, М., Наука,1964

6. Виноградов С.Д. Акустический метод в исследованиях по физике землетрясений. М.Наука,1989г.

7. Виноградов С.Д.Мирзоев К.М., Саломов А.Г. Исследования сейсмического режима при разрушении образца, Душанбе, "Дониш",1975г.

8. Грешников В.А. , Дробот Ю.Б. Акустическая эмиссия. М.изд. стандартов,1976г.

9. Езерский М.Г.Рудяк М.С.,Жданов В.В.Предпосылки применения акустической эмиссии для изучения деформационных процессов в гидротехнических туннелях. Сб.научных

трудов Гидропроекта, вып.II4, М.I986г.

I0.Езерский М.Г.,Рудяк М.С., Жданов В.В.Бочкарева Т.Н. Предпосылки и результаты применения метода акустической эмиссии для контроля за развитием горного давления на обделку гидротехнических туннелей.Сб.научных трудов Гидропроекта, вып.I22, М., I987,с.29-37

II. Езерский М.Г.Поведение сейсмоакустических параметров при подготовке макроразрушения в образцах и массивах горных пород. Автореф.дисс. на соиск.уч.ста.канд.физ.-мат. н.,М.,I985г.

I2. Исследование горного давления геофизическими методами /ред.Ризниченко Ю.В.М.,Наука,I972.

I3. Исследование механизма разрушения бетона с использованием активных и пассивных акустических методов неразрушающего контроля напряженно-деформированного состояния конструктивных материалов с использованием волн напряжений. Тезисы докладов Всесоюзного научно-технического семинара, Хабаровск, I972г.

I4. Константинова А.Г., Сейсмоакустические исследования предвыбросных разрушений угольных пластов. М.Наука,I977г.

I5. Мансуров В.А. Хрупкое разрушение горных пород. Фрунзе, Илим.I I984г.

I6. Панасьян Л.Л., Петровский М.А. Об использовании эффекта Кайзера для оценки напряжений вгорных породах. "Инженерная геология", № .., I984, II4-II9.

I7. Петухов И.М.- Смирнов В.А. и др.Геофизические исследования горных ударов., М., Недра,I975г.

I8. Постоев Т.П. Некоторые результаты сейсмоакустических наблюдений на оползневом участке в Зеравшанской долине. Сб. "Проблемы изучения экзогенных геологических инженерно-геологических процессов", ВСЕГИНГЕО, М.,I972г.

I9. Рекомендации по изучению напряженного состояния горных пород геофизическими методами. Ред. Завич А.И., Чубинич Б.Д, Москва -Белград,I986г.

20.Ржкин И.Д., Запольский В.П., Богданов П.А.,Звукометрический метод проявления горного давления, М. Металлургиздат,I956.

2I.Ржевский В.В. Мишиков В.С.Акустические методы исследования и контроля горных пород в массиве.М.Наука,I973г.

22. Соболев Г.А.Предвестники сейсмических явлений. Прогноз землетрясений, № 4,М., Д., "Донш",I983.с.I20-I37

23. Соболев Г.А., Семерчан А.А. и др.Предвестники разрушения большого образца горной породы.

24. Темник И.Л., Исследование упругих импульсов в бетоне, возникающих за счет образования микротрещин при длительном осевом нагружении.

25. Турчанинов И.А., Панин В.И.Геофизические методы определения и контроля напряжений в массиве.Л.Наука,I976.

26. Blaha P.,Novosad S. Geoacoustic method of slope movement investigation. Geol.bull.,Przuzkum, 2o,NIO,p.p.294-297.

27. Cadmen J.,Goodmen R. Landslide noise. Science,V.I58, N3805, I967,p.p.II82-II84.

28. Hardy H.R.et al. Creep and microseismic activity in geological materials. Proc. of the IIth Symph.on rock mech., Berkly, I969,p.p.372-4I3.

29.Hardy H.R.et al. Application of acoustic emission in fundamental studies of salt behaviour. Proc. of the 15th Symp. on Salt, Humburg,1978.

30. Hardy H.R. Monitoring the stability of geologic structures using nearsurface microseismic trunsdusers.Proc. of the 1th Conf. of AE/MA. Trans.Tech.Publ.,1976.

31.Kaneko K.,Inoue I. et al. Monitoring the stability of rock structures by means of acoustic wave attenuation. Proc.of the Int.Congr.on ISRM,Montrue,1978.

32.Kaiser S.Erkentnisse und folgerungen aus der messung von geräuschen werkstoffen arch eisenhutten wesen,1953,24, p.p.43-45.

33.Kurita K.,Fujii N. Stress memory of cristalline rocks in acoustic emission.Geophis.Res.Lett.,1979, 6,p.p.9-12.

34.Koerner R.M.,Lord A.E.Acoustic emission monitoring of earth dam stability. Water Power, Dam Construction,V.28., N4,1976,p.p.45-49.

35.Koerner R.M.,Lord A.E. et al. Acoustic emission studies of soil masses in the laboratory and field. Proc.of the 2th Conf on AE/MA in geol.struct.,Truns.Tech.Publ.,1980,p.p.290-38.

36.Koerner R.M. et al. The chalenge of field monitoring of soil structures using AE-methods.Proc.of the 2th Conf. on AE/MA in geol.struct.Trans.Tech.Publ.,1980,p.p.275-289.

37.Koerner R.M. et al. Acoustic emission behaviour of cohesive soils. Journ.of Getech.Eng.Div.ASCE, V.103,837-850.

38.Lord A.E.,Koerner R.M. Fundamental studies of acoustic emission in soil. Proc.of the 1th conf. on AE/MA,1976.

39.Meister D. Microacoustic studies in salt rock. Proc. of the 2d Conf. on AE/MA in geol.struct.,I980,p.p.259-273.

40.Mogy K. Study of elastic shocs caused by the fractur of geterogeneouse materials and its relations to earthqakes phenomena. Bull.Earthquakes Phenomena Res.Inst.Tikio Univ., V. 40,I962,p.I25-I73.

4I.McCouly. Microsonic detection of landslides.T.R.B., 58I,I976,p.p.25-30.

42.Obert L.,Duval W. Microseismic method of determining the stability of underground opening.Bull.Bureau Mines,n573, I957.

43.Richardson. Using AE techniques in laboratory investigations on salt behaviour.Proc.of the 2 Conf. on AE/MA, Trans.Tech.Pabl.,I980,p.p.63-77

44.Roberts D.A.Measuaring acoustic emission from salt during creep. Proc.of the 2d Conf.on AE/MA,I980,p.p.79-86.

45.Polloc A.A. Metals and rocks: AE physics and technology in common and in contrast. Proc. of the Ith Conf. on AE/MA.Trans.Tech.Publ.,I976,p.383-400.

46.Carabelli E.,Federici P. et al. AE/MA in the dam area: a study in South Italy.,I989.

С О Д Е Р Ж А Н И Е

	стр.
ВВЕДЕНИЕ	3
I. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ	5
2. ПРИНЦИПЫ РЕГИСТРАЦИИ АЭ И АППАРАТУРА ДЛЯ ПРОВЕДЕНИЯ АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ	17
3. АКУСТИКО-ЭМИССИОННЫЕ КРИТЕРИИ СТАДИЙ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ	22
4. МЕТОДИКА ИЗМЕРЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭ В НАТУРНЫХ УСЛОВИЯХ	25
5. ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА АКУСТИЧЕСКОЙ ЭМИССИИ ДЛЯ РЕШЕНИЯ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАДАЧ ПОДЗЕМНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА	42
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	53
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	56

Заказ I242 Тираж I00 экз.

Отпечатано в объединении "Гидропроект"

gost.e-ecolog.ru