Открытое акционерное общество
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е.ВЕДЕНЕЕВА»

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ТУННЕЛЕЙ

П 94 – 2001
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2001

gost.e-ecolog.ru

Открытое акционерное общество
«ВСЕРОССИЙСКИЙ НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ГИДРОТЕХНИКИ имени Б.Е.ВЕДЕНЕЕВА»

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРОВЕДЕНИЮ ГИДРАВЛИЧЕСКИХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИССЛЕДОВАНИЙ ТУННЕЛЕЙ

П 94 – 2001
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2001

УДК 626/627.03.001.42+627.842

В Рекомендациях рассмотрены виды натурных гидравлических наблюдений, фиксируемые с их помощью гидравлические характеристики туннелей и воздействия на их элементы. Устанавливаются организация и состав работ по натурным наблюдениям и исследованиям, требования к оснащению КИА и их типы. Выявляется роль визуальных осмотров, определяются признаки состояния сооружения и его элементов. Даются рекомендации о хранении результатов наблюдений. Приводится методика обработки и анализа данных натурных исследований, рассматривается вопрос о диагностировании состояния туннелей.

Рекомендации предназначены для гидротехнических служб электростанций, научных и других организаций, участвующих в работах по контролю за гидравлическими условиями работы туннелей.

© ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева», 2001

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основная задача проведения натурных гидравлических наблюдений и исследований гидротехнических туннелей состоит в получении данных, необходимых для контроля их надежности. Для решения этой задачи должны быть разработаны единые методы обработки, анализа и диагностики гидравлических условий работы гидротехнических туннелей.

При проектировании гидротехнических туннелей основными гидравлическими задачами, которые приходится решать, являются: определение пропускной способности или потерь напора на их тракте, оценки режимов течения и степени заполнения поперечного сечения или колебаний уровней воды, расчет гидродинамических нагрузок на элементы туннеля, предупреждение недопустимого развития кавитационного или абразивного износа.

Цель диагностики по данным натурных наблюдений и исследований состоит в оценке указанных гидравлических явлений в туннелях, установлении их влияния на надежность и долговечность обделок и облицовок, а также на устойчивость вмещающей туннели породы. Полученные в результате натурных исследований гидродинамические нагрузки используются для контроля устойчивости, прочности и долговечности элементов туннелей.

"Рекомендации по проведению гидравлических натурных наблюдений и исследований туннелей" составлены с учетом опыта проектирования, строительства и эксплуатации гидротехнических туннелей в отечественной и зарубежной практике.

Рекомендации разработаны в ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева» кандидатами техн. наук А.М. Швайнштейном и Г.А. Судольским.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

Назначение рекомендаций и область их применения

1.1. В настоящих Рекомендациях изложены основные положения по организации и проведению натурных гидравлических наблюдений и исследований гидротехнических туннелей. Они проводятся на основании п. 1.11 СНиП 2.06.01-86 и п.1.5 СНиП 2.06.09-84. В период эксплуатации гидротехнических туннелей натурные наблюдения и исследования позволяют выявить основные гидравлические характеристики условий их работы, выработать и осуществить мероприятия по улучшению этих условий, своевременно установить характер повреждений и определить объем необходимых ремонтных работ, продлить срок службы сооружений, а в отдельных случаях предотвратить аварии.

1.2. Гидротехнические туннели применяются для подвода, отвода и сброса воды. По назначению, определяющему задачи натурных гидравлических наблюдений и исследований их состояния, следует различать следующие типы туннелей:

для подвода или отвода воды в целях энергетики, водоснабжения, ирригации или переброски стока;

для сброса, спуска или выпуска воды и наносов из водохранилищ.

1.3. Сложность натурных наблюдений в гидротехнических туннелях обусловлена значительной протяженностью трактов, достигающей в ряде

Внесены ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева»	Утверждены РАО «ЕЭС России» письмо № 02-1-03-4/622 от 03.07.98.	Срок введения в действие I кв. 2002 г.

случаев десятков километров, необходимостью в большинстве случаев опорожнения и специального освещения для визуальных обследований и трудной доступностью, особенно на участках со значительными уклонами дна.

1.4. На основании настоящих Рекомендаций для соответствующего гидротехнического туннеля должна быть составлена местная производственная инструкция по проведению натурных наблюдений и измерений, обеспечивающая контроль за состоянием сооружения и его надежную эксплуатацию. В местной инструкции должны быть учтены требования, предъявляемые к гидротехническим туннелям СНиП 2.06.01-86 и 2.06.09-84 , а также положения по их эксплуатации, изложенные в РД 34.20.501-95.

1.5. Натурные наблюдения и исследования за гидравлическими условиями работы гидротехнических туннелей являются составной частью комплекса наблюдений и исследований этих сооружений. Они должны проводиться в периоды строительства, пуска и эксплуатации сооружений и сравниваться с параметрами, установленными в технической документации.

1.6. Настоящие Рекомендации предназначаются для использования службами эксплуатации гидротехнических сооружений гидроузлов, научных и других организаций, участвующих в работах по контролю гидравлических условий работы гидротехнических туннелей.

Виды гидравлических натурных наблюдений и исследований и фиксируемые с их помощью характеристики туннелей и воздействия на их элементы

1.7. Для контроля за состоянием гидротехнических туннелей, предназначенных для пропуска и сброса расходов воды, осуществляются следующие натурные наблюдения и исследования:

наблюдения за гидравлическими условиями работы;

визуальный осмотр обтекаемых поверхностей, в том числе фиксация их состояния с помощью различного вида съемки: геодезической, фотографической, стереофотограмметрической и киносъемки;

подводные обследования;

измерения осредненной и пульсационной составляющей давления;

определение уровней воды, в том числе их колебаний, на входе, выходе и на тракте туннелей;

измерение скоростей воды и воздуха;

оценка эрозии: кавитационной и абразивной.

1.8. Наблюдения за гидравлическими условиями работы туннелей, ограничивающиеся в большинстве случаев оценками состояния потока на

входе и выходе из сооружения, позволяют установить возникновение существенных отклонений гидравлического режима работы туннеля от предусмотренного проектом.

1.9. Визуальный осмотр туннелей дает возможность установить общее состояние обтекаемых поверхностей перед и после пропуска расходов:

наличие дефектов производства строительных работ (неровностей и раковин бетонной обделки, выступов на облицовке);

размеры неровностей участков туннеля, выполненных без обделки, и появление вывалов скалы на этих участках;

повреждения и разрушения обделок и облицовок при силовом, кавитационном или абразивном воздействиях;

коррозию металлических облицовок;

обрастание обтекаемых поверхностей.

Визуальный осмотр сопровождается обмерами характерных элементов обтекаемых поверхностей туннелей с применением на криволинейных поверхностях специальных шаблонов.

1.10. Подводные обследования применяют в основном для экстренных осмотров сооружения, а также при невозможности его опорожнения.

1.11. Натурные измерения осредненных и пульсационных составляющих давления позволяют определить следующие характеристики гидравлических условий работы гидротехнических туннелей:

гидродинамические нагрузки на внутреннюю их поверхность;

потери напора;

уровенный режим (заполнение поперечного сечения туннелей, существенные колебания уровней воды, например, в уравнительных резервуарах и бассейнах, появление частично напорных режимов течения);

появление кавитации.

1.12. Непосредственными измерениями уровней воды также могут быть определены их колебания и заполнение туннелей.

1.13. Измерения скоростей течения воды дают возможность установить пропускную способность туннелей, а скорости течения воздуха в аэрационных галереях и шахтах регистрируют для определения расхода воздуха, подводимого в туннели для обеспечения устойчивости режима течения или устранения кавитационных явлений [1, 2].

1.14. Измерения аэрации потока у обтекаемых поверхностей позволяют контролировать возможность возникновения кавитации и кавитационной эрозии.

Цель и задачи рекомендаций

1.15. Целью Рекомендаций является выбор параметров для оценки состояния гидротехнического туннеля соответствующего назначения и требований к организации исследований и наблюдений, обработке и анализу их данных. Анализ контролируемых параметров должен выявить причины отклонения состояния туннеля от проектного, оценить его долговечность и необходимость устранения повреждений и ремонта.

1.16. Для реализации цели настоящих Рекомендаций необходимо установить следующее:

оценить достоверность и представительность натурных данных;

определить фактические гидравлические условия работы сооружения;

выявить специфику изменения пропускной способности или потерь напора на тракте туннеля, режима течения и колебаний уровней воды, действующих нагрузок и возможность кавитационных и абразивных воздействий, а также отличия всех этих характеристик от предусмотренных проектом;

определить по данным натурных наблюдений неблагоприятные явления и воздействия на тракте туннелей; установить наличие, характер и причины повреждений и разрушений элементов туннелей, возможность их прогноза и развития;

выбрать диагностические параметры и признаки, которые характеризуют состояние сооружения и обосновывают необходимость изменения условий его эксплуатации или ремонта;

определить из всей совокупности заложенной в гидротехнических туннелях КИА те датчики, которые непосредственно или на основании простейших диагностических зависимостей давали бы сведения о состоянии сооружения.

1.17. Анализ силовых воздействий на обделки и скальную выломку, выполненную без обделок, а также их напряженного состояния следует производить как на основе данных настоящих Рекомендаций, так и "Рекомендаций по анализу данных и контролю состояния подземных сооружений и выработок ГЭС"(*) и Рекомендаций П91-2001.

---

*) Готовятся к публикации.

Нормативные ссылки

1.8. В тексте Рекомендаций используются следующие нормативные документы:

ГОСТ 19185-73. Гидротехника. Основные понятия. Термины и определения.

СНиП 2.06.01-86. Гидротехнические сооружения речные. Основные положения проектирования. М.: Стройиздат, 1989.

СНиП 2.06.09-84. Туннели гидротехнические. М.: Стройиздат, 1985.

Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД 34.20.501-95. 15-е издание (переработанное и дополненное). М., 1996.

ТУиН. Глубинные водосбросы и водоспуски гидроузлов (гидравлические расчеты): ВСН 38-70. М.: Энергия, 1972.

Рекомендации по учету кавитации по проектированию водосбросных гидротехнических сооружений: П 38-75/ВНИИГ, 1976.

Рекомендации по организации и проведению натурных наблюдений и исследований воздействия потока на гидравлические сооружения и русло рек в нижнем бьефе: П70-78/ВНИИГ. 1978.

Рекомендации по компоновке затворных камер и расчетам гидродинамических воздействий потока на плоские, сегментные и дисковые затворы гидротехнических сооружений: П 84-79/ВНИИГ, 1980.

Рекомендации по анализу данных и контролю состояния водосбросных сооружений и нижних бьефов гидроузлов: П 75/ВНИИГ. 2000.

Рекомендации по диагностическому контролю термофильтрационного состояния сооружений подземных ГЭС и массивов, вмещающих скальных грунтов: П 91/ВНИИГ. 2001.

Терминология

1.19. Терминология настоящих Рекомендаций принята согласно ГОСТ 19185-73.

2. ОРГАНИЗАЦИЯ И СОСТАВ РАБОТ ПО НАТУРНЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ И ИССЛЕДОВАНИЯМ

2.1. При организации натурных наблюдений и исследований необходимо учитывать "Правила безопасности при строительстве подземных гидротехнических сооружений" [3].

Наблюдения за условиями работы и осмотр состояния конструкции туннелей необходимо проводить в процессе эксплуатации туннелей всех классов. Для гидротехнических туннелей I-III классов обязательно предусматриваются инструментальные исследования. Состав и объем натурных гидравлических исследований зависит от класса туннеля, его назначения, гидрологических условий и требований экологии в районе гидроузла.

При проведении натурных исследований необходимо руководствоваться проектом размещения и закладки КИА, инструкциями по составу этих исследований, по производству замеров и уходу за приборами. Ответственность за организацию и проведение натурных наблюдений и исследований возлагается на дирекцию ГЭС, она может передавать ее проектной или какой-либо другой организации.

2.2. Для проведения натурных исследований туннелей необходимо своевременно, преимущественно на ранних стадиях строительства, осуществить закладку КИА и кабельных линий к ней. В дальнейшем необходимо контролировать состояние этой аппаратуры; замена датчиков при эксплуатации туннеля в большинстве случаев затруднительна.

2.3. Установка КИА, а также проведение гидравлических натурных наблюдений и исследований должны выполняться силами подразделения, которое занимается натурными наблюдениями. Это подразделение выполняет исследования с помощью соответствующих контрольно-измерительных приборов, выявляет объем ремонтных работ, а также мероприятия по обеспечению безопасной работы сооружения и оснащению его дополнительными контрольно-измерительными приборами.

2.4. В обязанности указанного подразделения входит:

а) получение приборов, кабеля и других материалов, необходимых для установки приборов;

б) контрольная проверка приборов перед установкой, своевременная закладка их в соответствии с проектом;

в) содержание в надлежащем порядке пультов наблюдения, выводов кабелей и установленных приборов;

г) составление исполнительных чертежей расположения приборов и их коммуникаций;

д) регулярное снятие показаний с приборов и осмотр сооружения в соответствии с местной инструкцией;

е) первичная обработка данных наблюдений, их анализ, а в случае необходимости, привлечение к этому анализу проектных и научно-исследовательских организаций;

ж) хранение в установленном порядке всего первичного материала наблюдений.

Подразделение, отвечающее за проведение натурных наблюдений, руководствуется, например, комплектом документации в соответствии с Приложениями 3-5.

2.5. При проведении натурных наблюдений и исследований в туннелях необходимо располагать паспортами приборов, протоколами их контрольных градуировок, результатами наблюдений и исследований на предыдущих этапах.

2.6. Наблюдения проводятся как при пуске туннеля в эксплуатацию, при пропуске расходов, так и после пропуска. Для изучения особенностей гидравлической работы туннеля, уточнения фактических нагрузок, выявления причин отклонения основных характеристик работы туннеля от допустимых значений, а также для выяснения и совершенствования методик расчета и моделирования выполняются специальные исследования. Для этого может применяться метод ступенчатого изменения гидравлического режима работы туннеля. Одна из методик натурных исследований представлена в [4].

3. ТРЕБОВАНИЯ К ОСНАЩЕНИЮ КИА

3.1. Для получения необходимой информации о фактическом состоянии туннелей на его тракте необходимо предусматривать достаточное количество контрольно-измерительной аппаратуры. Типы и количество применяемой КИА для каждого конкретного туннеля необходимо детально обосновать при разработке программы натурных исследований. Следует использовать такую КИА, которая ранее уже была опробована в натурных условиях. Новые приборы и устройства следует устанавливать в опытном порядке.

Для удобства осмотра туннелей на их стенах и своде должны быть нанесены несмываемой краской пикетные знаки, входные и выходные порталы туннелей должны быть оборудованы реперами и марками, а также водомерными рейками.

Схемы размещения первичных датчиков и вторичных преобразователей, а также приборов на тракте туннеля необходимо разрабатывать на основании проектных материалов, результатов лабораторных гидравлических исследований или анализа расчетных данных и литературы. Для проведения натурных исследований КИА следует прежде всего размещать на участках туннелей, работающих в особо трудных или недостаточно изученных условиях (входной и выходной участки, камера затворов и т.д.).

3.2. При проведении натурных исследований и наблюдений необходимо контролировать ряд параметров, характеризующих состояние туннеля, в зависимости от его назначения и условий работы. Для размещения датчиков КИА на тракте туннеля следует ориентироваться на данные табл. 3.1 с учетом местных условий и класса сооружения. Типовые схемы размещения приборов КИА на различных участках тракта туннеля даны, например, в [4, 5].

3.3. Фиксировать уровни воды в бьефах в основном возможно только вблизи входного оголовка и выходного сечения туннеля. Для этого следует использовать самописцы уровня или определять указанные уровни по водомерным рейкам (см. п.3.1.). Вблизи этих же зон возможно осуществлять измерение скоростей потока, например, с помощью гидрометрических вертушек и на основе этих данных следует определять расход. Фиксацию уровней воды в безнапорных туннелях возможно осуществлять с помощью дистанционных датчиков уровня. Общее число таких датчиков, в зависимости от длины туннеля и его класса капитальности, обычно не должно превышать 5-10.

3.4. Датчики давления должны быть предусмотрены для контроля гидродинамического давления на обтекаемых потоком поверхностях туннеля.

Осредненное давление следует контролировать с помощью пьезометров, располагая их устья по длине туннеля преимущественно на дне и боковых стенах. Эти данные могут быть использованы, например, для оценок потерь напора по длине тракта. Осредненное давление необходимо контролировать у выходного сечения туннеля. При безнапорном или частично напорном режиме течения в туннеле для того, чтобы зафиксировать вакуумы, необходимо располагать устья вакуумометров на своде туннеля. Для определения глубин потока при таких режимах течения следует использовать данные о пьезометрических напорах на дне туннеля.

Датчики давления должны быть установлены на участках обтекаемой поверхности туннеля, где возможно существенное понижение давления и ожидается значительное гидродинамическое воздействие. Расстояние

Таблица 3.1.

Параметры, контролируемые при натурных исследованиях туннеля

Назначение	Участок тракта	Элементы поперечного сечения	Контролируемые параметры
Водосбросной напорный туннель	входной оголовок	БС С	2*, 3* 2*, 3*, 4, 5
	затворная камера	Д БС С	2, 4, 5, 6 2*, 3*, 4, 5 2*, 3*, 4, 5, 6
	прямолинейный с металлической облицовкой	Д БС С	2, 3, 4, 5 2, 3, 4, 5 2*, 3*, 4, 5
	прямолинейный с бетонной обделкой	Д БС С	4, 5, 6 4, 5 2*, 3*, 4, 5, 6
	прямолинейный без обделки	С	2, 3*
	поворота в плане	БС С	2*, 3*, 4, 5 2
	поворота в вертикальной плоскости	Д БС С	2*, 3*, 4, 5 2 2*, 3*, 4, 5
	концевой	Д С	1, 2 2*, 3*, 4, 6
Безнапорный водосбросной туннель	на всей длине тракта	Д БС	1*, 2*, 3, 4, 5, 6* 2, 4, 6*
Туннель, подводящий воду к турбинам	на всей длине тракта	Д БС С	2*, 3*, 5 2 2, 3
Отводящий туннель ГЭС	на всей длине тракта	Д БС	1, 2, 5 2
Уравнительный резервуар	–	–	1*, 2*

Обозначения: Д – дно; БС – боковые стены; С – свод; 1- уровни воды; 2, 3 – осредненная и пульсационная составляющие пьезометрического напора; 4 – уровень ультразвукового шума при кавитации; 5 – глубина эрозии; 6 – содержание воздуха; сноска у цифр (*) – возможно проведение специальных исследований для сопоставления модельных и натурных данных.

между этими датчиками не должно превышать радиус корреляции, который определяется на основании данных модельных исследований или расчетным путем [6]. Датчики обычно располагают в двух взаимно перпендикулярных направлениях: вдоль и поперек потока. В особо ответственных случаях некоторые датчики давления следует дублировать (ставить по два) в каждой измерительной точке из-за возможного повреждения их влекомыми потоком твердыми телами: льдом, бревнами, камнями, строительным мусором и т.д.

3.5. Датчики ультразвукового кавитационного излучения (акустического шума) необходимо использовать для контроля кавитации в туннеле. Эти датчики следует устанавливать в локальных зонах существенного понижения давления: во входных оголовках, в затворных камерах, на участках поворота тракта и т.д.

Датчики эрозии следует предусматривать на участках тракта туннеля, где возможны разрушения при воздействии кавитационной эрозии или на дне туннеля для контроля абразивной эрозии.

В состав наблюдений при выполнении кавитационных исследований должны быть включены измерения содержания воздуха в пристенном слое потока. Для наиболее опасных с точки зрения кавитационной эрозии участков и для выходного сечения туннеля следует предусматривать измерения эпюры содержания воздуха по глубине потока. Датчики аэрации также следует размещать в ряде створов по длине тракта туннеля и за воздухоподводящими устройствами, расход воздуха в которых также необходимо контролировать.

3.6. При проведении натурных наблюдений следует учитывать существенное удаление наблюдательных пунктов от створов измерений из-за значительной длины туннеля. Нужно стремиться обеспечить наименьшую длину кабельных линий от датчиков до этих пунктов. Для защиты кабеля от механических повреждений рекомендуется прокладывать его в лотках из швеллеров или уголков, приваренных либо к арматуре, либо к специальным стержням, заделанным в бетоне. Эти лотки вместе с кабелем заливаются битумом или цементным раствором. Бронированный силовой кабель может быть проложен непосредственно в бетоне.

Временные или постоянные пункты для снятия отсчетов по приборам следует выносить в потерны или в специально предназначенные помещения, обеспечивающие необходимые условия для работы вторичной аппаратуры.

3.7. При выходе части КИА в процессе эксплуатации из строя или в случае необходимости в дополнительных измерительных створах, которая выявилась в процессе анализа результатов начального этапа измерений, следует дооснастить сооружение.

4. ТИПЫ КИА

4.1. Измерительные приборы (первичные преобразователи - датчики, вторичные преобразователи и регистрирующие приборы), которые используются в практике натурных наблюдений и исследований туннелей, приведены в табл. 4.1. Этот перечень приборов может использоваться для предварительной оценки возможностей применявшейся ранее в натурных исследованиях аппаратуры. Ряд этих датчиков выпускался промышленностью малыми сериями или изготавливался непосредственно в научно-исследовательских организациях.

При комплектации КИА их можно заменять на аналогичные и имеющиеся в наличии. Ряд технических характеристик рассматриваемых приборов приведен, например, в П 70-78/ВНИИГ и в [7, 8], а некоторые сведения о приборах для анализа воздушного потока представлены в [9]. Данные измерений могут обрабатываться с помощью комплексов статистической обработки [10].

4.2. Для регистрации уровней воды могут применяться, например, самописцы поплавкового типа с горизонтально расположенным барабаном.

Измерения осредненного давления на обтекаемых поверхностях туннеля могут выполняться, например, пьезометром, представляющим собой отрезок трубы, устье которой заделано заподлицо с этой поверхностью. В устье трубы может быть заложен двух- или трехслойный фильтр. Для наблюдения за показаниями этих пьезометров трубы от них выводятся в пункты наблюдения, где производится снятие отсчетов по измерительным рейкам (в случае стеклянных трубок) или с помощью опускных приборов.

Для измерения гидродинамического давления используются в основном датчики индуктивного типа с чувствительным элементом в виде плоской мембраны, которые преобразуют механическое воздействие в электрические сигналы.

Начало кавитации регистрируется с помощью первичных преобразователей для фиксирования ультразвукового кавитационного излучения, чувствительными элементами которых являются пьезокерамические пластинки.

Таблица 4.1

Приборы для различных видов наблюдений

№№ пп	Вид наблюдений или измеряемая величина	Прибор	Тип прибора	Разрешающая способность, рабочая полоса частот
1	Уровень воды в туннеле	Измеритель уровня дистанционный Самописец уровня воды длительного действия	ИУ ГР-38 ГР-116	От ±0,05 до ±0,20 м ±0,01 м
2	Осредненный пьезометрический напор (давление) воды и воздуха (вакуум)	Пьезометр Пьезометр-вакуумометр Пружинный манометр	- - -	±0,1 м (1 кПа) ±0,1 м (1 кПа) менее ±0,1 м (1 кПа)
3	Осредненный и пульсационный пьезометрический напор (давление)	Измеритель осредненного пьезометрического напора (давления) Измеритель пьезометрического напора (давления)	ОПТ-С ДД-10	±0,1 м (1 кПа) в диапазоне пьезометрического напора 0+100 м ±0,1 м (1 кПа) в диапазоне частот 0-50 Гц
4	Осредненный пьезометрический напор (давление) на площадке	Измеритель осредненного и пульсационного напора (давления) на площадке	ОПП-С	±0,04 м (0,4 кПа) в диапазоне пьезометрического напора 0+30 м ±0,1 м (1 кПа) в диапазоне пьезометрического напора 0+100 м ±0,1 м (1 кПа) в диапазоне частот 0+150 Гц
5	Кавитационное излучение	Ультразвуковой шумомер	ДУЗ	10+500 кГц
6	Кавитационный и абразивный износ	Дистанционный измеритель эрозии металла Дистанционный измеритель разрушения бетона	ДЭМ ДРБ	0,5+30 мм с шагом от 0,5 до 4 мм 3+400 мм с шагом от 3 до 50 мм
7	Скорость течения и содержание в потоке воздуха	Измеритель скорости и содержания воздуха в пристенном слое	ИСА-7	Скорость ±0,1 м/с, аэрация ±5%
8	Скорость течения воды или воздуха	Трубка Пито Вертушка	- ГР-21 м ГР-55	2% не более 5%
9	Содержание воздуха	Датчик аэрации	-	±5%
10	Аэрация на границе потока	Измеритель аэрации на границе потока	ИАГ	±20%
11	Скорость потока воздуха	Анемометр		3+5%

Принцип действия первичных преобразователей эрозии основан на последовательном размыкании ее токопроводящих элементов, размещенных послойно в специально предусмотренных шурфах.

Принцип действия датчиков аэрации потока основан на измерении электрического сопротивления газожидкостной смеси для определения содержания в ней воздуха. Датчики могут устанавливаться в потоке вблизи обтекаемой потоком поверхности или заподлицо с ней.

При производстве гидрометрических наблюдений используются вертушки, число оборотов лопастного винта которых зависит от скорости потока.

4.3. Промежуточные преобразователи служат для усиления сигналов от первичного преобразователя (датчика) с целью согласования со входным диапазоном регистрирующих приборов и преобразования их в форму, удобную для регистрации и обработки. Характеристики ряда серийно изготовляемых промежуточных преобразователей даны в П70-78/ВНИИГ и в [8].

4.4. Приборы регистрации позволяют контролировать показания соответствующего процесса, например, по стрелочному индикатору, фиксировать экстремальные и промежуточные значения контролируемого фактора, а также записывать непрерывную реализацию процесса.

Регистрацию процесса пульсации давления следует осуществлять непосредственно на ПВМ с определенным шагом, который должен быть выбран на основе методических опытов или прогноза частотного диапазона процесса. В некоторых случаях возможна предварительная регистрация процесса с помощью измерительного магнитофона с последующим воспроизведением и регистрацией на ПВМ. Возможны и непосредственные измерения статистических характеристик пульсации давления с помощью аналоговых приборов. Аналогичным образом возможно регистрировать информацию, полученную от датчиков других типов КИА.

4.5. КИА необходимо периодически калибровать. Периодичность калибровки зависит от назначения и типа прибора, условий его работы и должна определяться местной инструкцией.

5. ПЕРИОДИЧНОСТЬ НАБЛЮДЕНИЙ. РОЛЬ ВИЗУАЛЬНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ. ХАРАКТЕРНЫЕ ПРИЗНАКИ СОСТОЯНИЯ СООРУЖЕНИЯ ИЛИ ЕГО ЧАСТИ

5.1. Гидротехнические туннели, предназначенные для пропуска воды, в зависимости от класса сооружения в первые годы эксплуатации должны осматриваться один раз в 1-3 года, а затем через 5 лет и в дальнейшем по

мере необходимости. Сроки осмотра детально должны быть определены местной инструкцией.

5.2. Внеплановые осмотры туннелей должны проводиться в следующих случаях:

при непредусмотренных изменениях потерь напора и, соответственно, пропускной способности;

при видимых изменениях условий течения на тракте, в том числе на входе и выходе из туннеля;

после пропуска каждого из 2-3 паводковых расходов через водосбросные туннели, а в дальнейшем после пропуска расходов, близких к расчетным;

при непредусмотренных существенных изменениях осредненных и пульсационных составляющих давления или расхода воздуха, подводимого в водосбросные туннели;

при поступлении сигналов о кавитационной эрозии.

5.3. Визуальные оценки и подводные обследования позволяют, как указано в п.п.1.9-1.10, установить общее состояние гидротехнических сооружений. В ряде случаев в результате осмотров и обмеров, геодезической съемки и сопоставления состояния сооружения на предыдущих этапах эксплуатации и при текущем осмотре устанавливается необходимость устранения повреждений, восстановления эксплуатационных характеристик и ремонта сооружений и уточняется программа последующих инструментальных обследований при его опорожнении или в период пропуска воды.

5.4. Состояние гидротехнических туннелей при проведении визуальных осмотров и подводных обследований необходимо оценить, исходя из следующих признаков:

кавитационный износ бетона [11] проявляется на начальном этапе образованием поверхностных разрушений за возбудителем кавитации (неровностями поверхности, пазами затворов, различными конструктивными элементами, за которыми наблюдается отрывное течение), прежде всего возникают мелкие раковины у поверхности, обтекаемой потоком, где в цементном растворе остаются пузырьки воздуха. Постепенно происходит разрушение растворной составляющей бетона поверхностного слоя, обнажается крупный заполнитель. По мере разрушения защитного слоя бетона образуется кавитационная каверна, обнажается и может быть разорвана арматура. При продолжительном воздействии кавитации на поверхности бетона ниже основной каверны по течению возникает цепочка вторичных каверн;

кавитационные повреждения металлических облицовок [11] начинаются с образования мелких каверн на поверхности, затем образуются бо-

роздки неправильной формы и поверхность металла становится неровной. На конечной стадии кавитационных разрушений металлические листы облицовки могут быть повреждены на всю толщину и даже оторваны. В последнем случае разрушение анкерной арматуры, заделанной в бетон, происходит без образования шеек;

абразивный износ поверхности бетона [12] сопровождается разрушением растворной составляющей поверхностного слоя бетона, обнажается его крупный заполнитель, а поверхность крупного заполнителя становится гладкой (отшлифованной). Абразивный износ проявляется прежде всего на значительных участках площади лотка туннеля [13], а также на нижней части вогнутых участков поворотов в горизонтальной плоскости, т.е. на участках воздействия влекомых потоком частиц грунта;

обрастание поверхностей туннеля [14] происходит при образовании на его поверхности слоя живых организмов, суживающих поперечное сечение. Это обрастание может иметь вид сплошной щетки, на ощупь такая поверхность мягкая и скользкая;

коррозия металлических облицовок сопровождается образованием у поверхности рыхлого слоя и существенным увеличением шероховатости;

разрушение металлических облицовок под действием гидродинамических нагрузок происходит с образованием шеек при разрыве анкерной арматуры.

5.5. При проведении инструментальных наблюдений в гидротехнических туннелях контролируется ряд параметров гидравлических условий работы сооружений. По указанным параметрам составлены диагностические признаки (параметры) условий работы туннелей, приведенные в табл. 5.1. Совокупность диагностических параметров позволяет оценить на основе данных измерений конкретные состояния туннелей, которые определяют гидравлические критерии их надежной работы. Эти критерии даны в табл. 5.2.

6. ХРАНЕНИЕ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ И ИЗМЕРЕНИЙ

6.1. Первичная обработка показаний приборов производится на месте службой натурных наблюдений или привлекаемыми специалистами по соответствующим инструкциям. Служба натурных наблюдений должна обеспечить надежное хранение отчетно-исполнительной документации по КИА и всего первичного материала наблюдений.

Таблица 5.1

Гидравлические параметры надежной работы гидротехнического туннеля

Контролируемые параметры	Диагностические параметры (признаки)
Уровни воды (положение пьезометрической линии) в бьефах; расходы воды	Коэффициент расхода напорного или незатопленного безнапорного туннеля или коэффициент скорости безнапорного туннеля, входной оголовок которого подтоплен
Пьезометрические напоры; расходы воды	Пьезометрические напоры в измеряемых точках; потери напора на трение по длине (коэффициенты гидравлического трения и коэффициенты местных потерь напора)
Статистические характеристики пьезометрического напора: среднее значение, среднее квадратическое отклонение, характеристики закона распределения, коэффициенты пространственных корреляций, функции авто- и взаимноспектральной плотности	Вероятность достижения пьезометрическим напором, измеренным датчиком, значения, соответствующего давлению парообразования; значения нагрузок на элементы туннеля и соотношение их преобладающих частот с частотами собственных колебаний рассматриваемого элемента (в конечном итоге экстремальные значения напряжений)
Колебания уровней воды	Экстремальные значения уровней воды
Пьезометрические напоры; распределение скоростей	Параметр кавитации рассматриваемых элементов туннелей или неровностей
Уровень ультразвукового шума при кавитации	Экстремальный уровень кавитационного шума
Глубина кавитационной или абразивной эрозии	Допускаемая глубина эрозии
Содержание воздуха в пристенном слое потока воды	Содержание воздуха в пристенном слое, позволяющее предотвратить кавитационные явления
Расход (скорость) воздуха в аэрационных устройствах	Необходимое количество воздуха, предотвращающее смену режимов течения и кавитацию; допускаемые скорости течения воздуха в аэрационных устройствах

Таблица 5.2

Гидравлические критерии надежной работы гидротехнических туннелей

Условия надежной работы	Диагностируемое состояние	Диагностические признаки (параметры)	Критерии надежности
Превышение гребня плотины над уровнем верхнего бьефа	Пропускная способность	Расчетные значения коэффициента расхода или коэффициента скорости	Расчетный и поверочный расходы при проектных отм. УВБ
Оптимальный напор гидроагрегата	Потери напора	Коэффициенты гидравлического трения и местных потерь напора	Значение коэффициента расхода
Прочность	Напряженное состояние (статические или динамические нагрузки)	Экстремальные значения напряжений, эпюры их распределения (экстремальные значения гидродинамических нагрузок)	Предельные значения напряжений в контролируемых точках (предельные значения нагрузок)
Допустимые режимы течения	Колебания уровней воды	Экстремальные значения уровней воды	Предельные значения уровней воды
Устойчивость безнапорного режима течения	Наполнение	Экстремальное наполнение и максимальный расход (скорость) воздуха, подводимого на тракт	Предельные наполнение и расход (скорость) воздуха в аэрационных устройствах
Долговечность	Начало кавитации	Экстремальный уровень ультразвукового шума	Повышение уровня ультразвукового шума
	Кавитация	Экстремальное значение осредненного или мгновенного вакуума	Допустимое значение осредненного или мгновенного вакуума
	Кавитация и кавитационная эрозия	Характерные пьезометрические напоры и скорости вблизи рассматриваемого элемента (параметры кавитационной эрозии)	Критические параметры кавитации и кавитационной эрозии
	Кавитационная эрозия	Содержание воздуха в пристенном слое потока воды	Необходимое содержание воздуха в пристенном слое
	Кавитационная эрозия	Время работы рассматриваемой зоны при мгновенном пьезометрическом напоре, соответствующем давлению парообразования	Допустимое время работы при давлении парообразования по сравнению с инкубационным периодом материала
	Кавитационная или абразивная эрозия	Максимальная глубина эрозии	Допустимая глубина эрозии

6.2. Служба натурных наблюдений обязана иметь журнал авторского надзора для внесения в него указаний об исправлении замеченных недостатков в установке КИА, проведении наблюдений и обработке результатов.

6.3. При проведении контрольных градуировок приборов КИА можно использовать для записи результатов формы таблицы, которая дается П 70-78/ВНИИГ: в приложении 1 для примера приведена форма журнала контрольных градуировок датчиков давления. Контрольные градуировки следует по возможности выполнять до и после каждой серии наблюдений для конкретного прибора. Величина максимального калибровочного сигнала должна быть несколько выше наибольших ожидаемых значений измеряемой величины (устанавливаемых на основе предварительных расчетов или данных модельных исследований и сопоставления их с предыдущими натурными измерениями). Диапазон градуировки должен быть разбит на несколько участков рядом промежуточных значений первичного сигнала.

Показания приборов при проведении каждого вида натурных наблюдений можно заносить в специальные журналы, например, в соответствии с формами, представленными в приложениях 2 – 5.

6.4. Ежегодно результаты наблюдений необходимо представлять в виде технического отчета, в котором кратко излагаются основные результаты наблюдений и четко формулируются рекомендации по режимам эксплуатации туннеля, по организационным и ремонтным мероприятиям, характеру наблюдений и т.д.

6.5. Для хранения данных натурных наблюдений рекомендуется использовать ПЭВМ, для которых следует составить специальные программы – базы данных наблюдений.

7. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ И АНАЛИЗ ДАННЫХ НАТУРНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ. ДИАГНОСТИРОВАНИЕ СОСТОЯНИЯ ТУННЕЛЕЙ

Общие сведения об обработке данных натурных исследований. Принципы диагностирования

7.1.При обработке данных натурных исследований должны строиться зависимости изменения соответствующих параметров. Форма этих зависимостей определяется видом измерений, назначением сооружения, характером изменения контролируемого параметра в пространстве и во времени, расположением датчиков и т.д.

7.2. Для получения указанных зависимостей необходимо, чтобы измеряемые величины были достоверны, а объем измерений был достаточным. Достоверность данных измерений определяется их точностью, обусловленной типом применяемых датчиков, погрешностью первичной и вторичной аппаратуры, ошибками операторов при снятии отсчетов. При обработке данных измерений должны быть использованы методы математической статистики, позволяющие выявить случайные и систематические ошибки и разброс данных, отражающий фактический отклик сооружения на гидродинамические воздействия.

7.3. По совокупности контролируемых гидравлических параметров составляются диагностические признаки и параметры. Набор этих признаков характеризует конкретные состояния сооружения (см. табл. 5.2).

7.4. Натурные данные необходимо анализировать по характеру их изменения во времени, и на основании диагностических признаков должны быть выявлены фактические гидравлические условия работы туннеля и причины их отличий от проектных. Далее должны уточняться предельные значения показателей диагностических состояний, необходимость корректировки условий эксплуатации туннелей и их ремонта.

Пропускная способность

7.5. Пропускная способность туннеля, сбрасывающего воду в нижний бьеф вместе с другими сооружениями гидроузла, устанавливается в зависимости от уровней воды и режимов течения в бьефах, а также открытия затворов.

7.6. При определении пропускной способности гидротехнических туннелей необходимо фиксировать:

а) для напорных туннелей – уровни воды в верхнем бьефе и уровни воды на выходе из туннеля или пьезометрическое давление для сечения в створе, расположенном выше выходного сечения по течению на $(1...3)h_т$, где $h_т$ – высота туннеля. Второй из указанных способов возможен, если выходной участок туннеля выполнен цилиндрическим;

б) в туннелях, работающих на части длины в фиксированно напорном, а на другой части длины в фиксированно безнапорном режиме течения - уровни воды в верхнем бьефе и уровни воды на выходе из напорного участка или пьезометрический напор у выходного сечения также, как в п.7.6а;

в) для безнапорных туннелей с незатопленным входом и отсутствием подтопления со стороны нижнего бьефа – уровни воды на подходе к туннелю;

г) для безнапорных туннелей с затопленным входом и с подтоплением со стороны нижнего бьефа – уровни воды на подходе к туннелю и на расстоянии $(3...5)h_1$ от входного сечения, где h_1 – минимальная глубина ниже входного сечения по течению.

7.7. Расходы воды на подходе к туннелям измеряются гидрометрическими методами и приборами, методом контрольного отверстия (в этом случае желательно использовать гидроагрегаты) [15] или по перепаду пьезометрического напора для характерных створов на входном оголовке или до и после местного гидравлического сопротивления напорного туннеля (например, поворота тракта, расширения или сужения его). Этот перепад должен быть определен на модели экспериментально при автомодельном течении по числу Рейнольдса. При работе входного оголовка безнапорного туннеля по схеме водослива может использоваться пьезометрический способ измерения расхода, рассмотренный в [15].

7.8. На основании определения уровней и расходов воды строятся кривые пропускной способности туннелей. Для напорных туннелей или в случае, если напорный режим течения предусмотрен на части длины туннеля, соответствие между расходом воды и уровнями устанавливается по следующей формуле (рис. 7.1,*а*):

$$Q = \mu\omega_p\sqrt{2g(T_0 - \Pi)}, \qquad (7.1)$$

где Q – расход; μ – коэффициент расхода, отнесенный к расчетной площади поперечного сечения ω_p, в качестве которой удобно во многих случаях принимать площадь выходного сечения;

$T_0 = \nabla_{УВБ} + V_0^2/2g - \nabla_Д$, $\nabla_{УВБ}$ и $\nabla_Д$ – отметки уровня верхнего бьефа на подходе к туннелю и его дна в сечении у выхода, в котором измеряется пьезометрический напор или глубина воды; V_0 – скорость течения на подходе

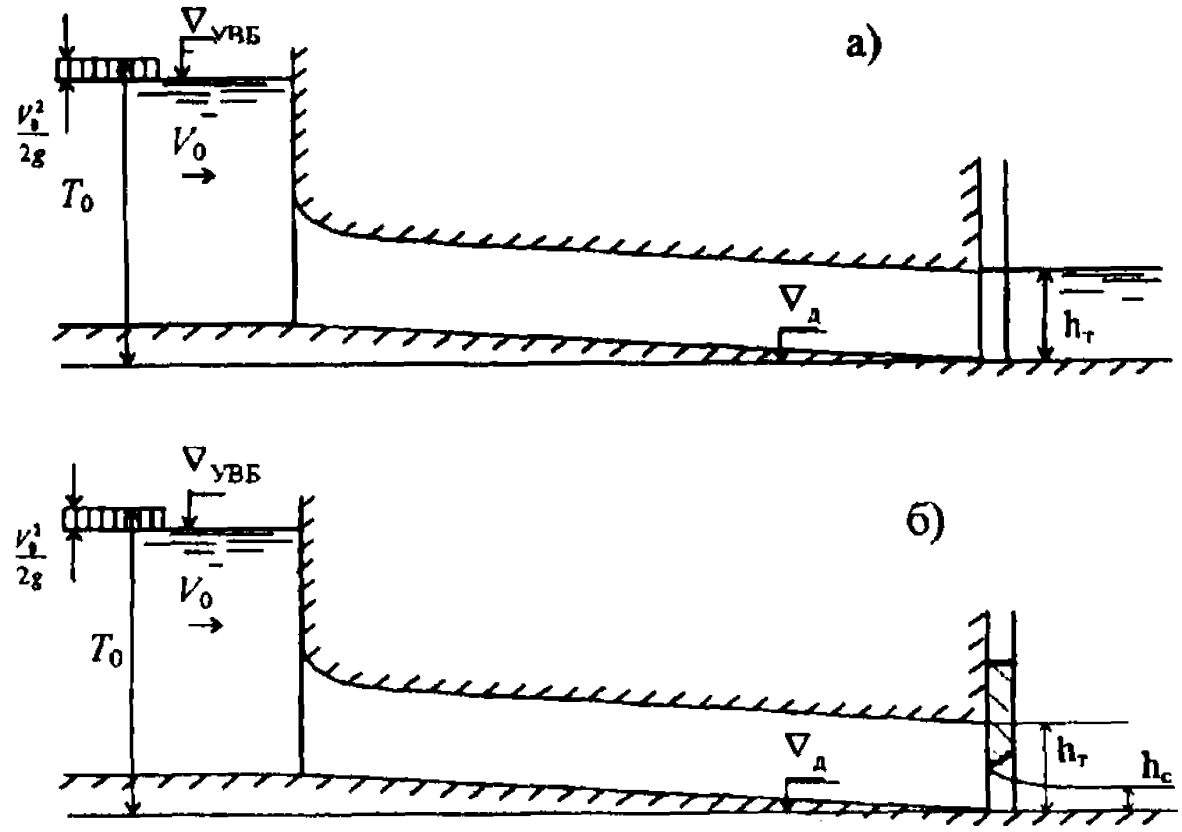
а)
∇УВБ
$\frac{V_0^2}{2g}$
V_0
T_0
∇д
$h_т$
б)
∇УВБ
$\frac{V_0^2}{2g}$
V_0
T_0
∇д
$h_т$
h_c

Рис.7.1.

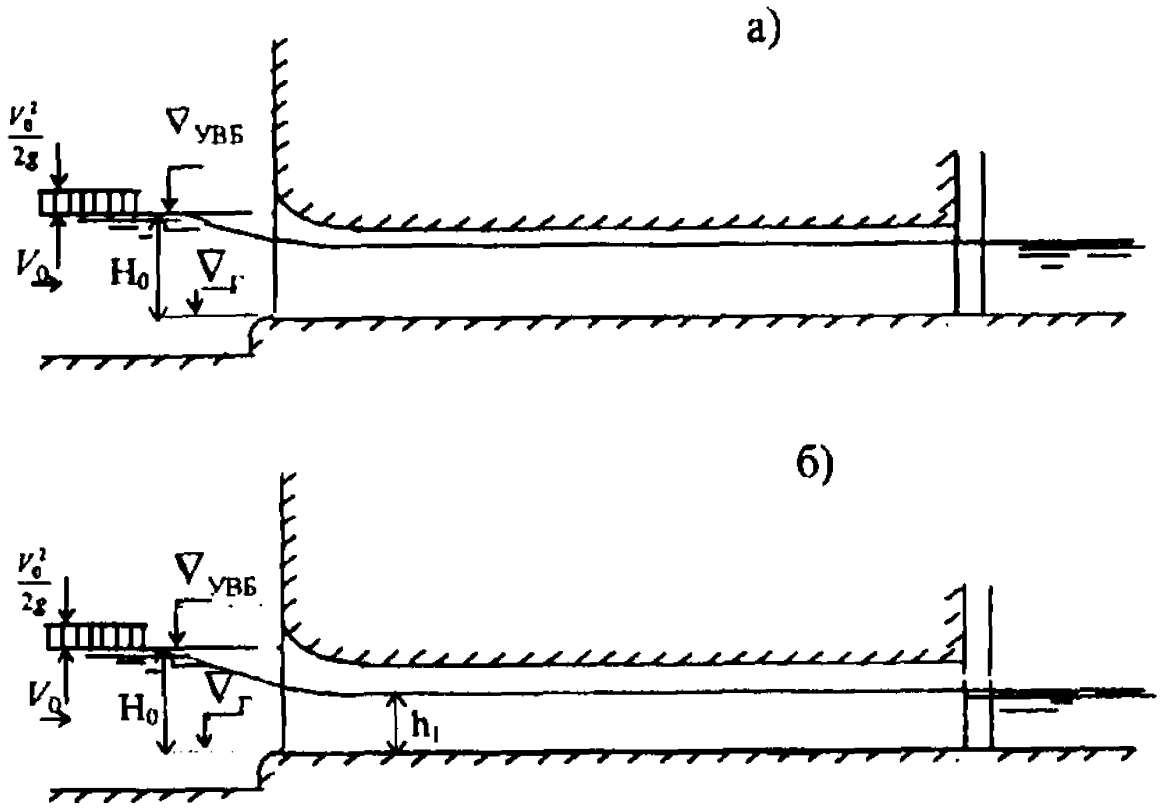
а)
$\frac{V_0^2}{2g}$
∇УВБ
V_0
H_0
∇г
б)
$\frac{V_0^2}{2g}$
∇УВБ
V_0
H_0
∇
h_1

Рис.7.2

к туннелю; $П$ – средняя удельная потенциальная энергия потока в расчетном сечении водосброса. Значения $\nabla_{УВБ}$ целесообразно устанавливать на расстоянии $(1\div10)h$ (h – высота туннеля за входным оголовком) выше входного сечения туннеля по течению или от наружной стены его крайнего входного отверстия. Значения $П$ определяются в зависимости от способа измерения пьезометрического напора или глубины, конструкции сопряжения выходного сечения с трактом за ним и условий подтопления со стороны нижнего бьефа:

при измерении пьезометрического напора p/γ

$$П = p/\gamma; \tag{7.2}$$

при измерении уровня воды за подтопленным со стороны нижнего бьефа выходным сечением туннеля

$$П = \nabla_в - \nabla_д,$$

где $\nabla_в$ – отметка уровня воды сразу же за выходным сечением;

при неподтопленном выходном сечении

$$П = \chi \cdot h_т, \tag{7.3}$$

где $h_т$ – высота выходного сечения; $\chi = 1$ при гладком сопряжении дна выходного сечения туннеля с отводящим трактом, $\chi = 0{,}75$ – при сопряжении дна выходного сечения туннеля с отводящим трактом уступом, к которому подводится воздух.

7.9. Формула (7.1) может использоваться при частичном открытии затворов (рис.7.1,*б*), установленных в конце напорного участка туннеля. В качестве расчетной должна быть принята площадь сжатого сечения при истечении из-под затвора или какая-либо другая, но это обстоятельство должно быть учтено при определении коэффициента расхода. В этом случае необходимо принимать $П = h_c$.

7.10. Коэффициенты расхода напорного туннеля при пропуске расходов и фиксированном открытии затворов, установленных в его выходном сечении, остаются постоянными, если не внесено запланированных изменений в его конструкцию. Если же в процессе эксплуатации коэффициент расхода напорного туннеля становится отличным от первоначального значения, то это является признаком происшедших изменений условий его эксплуатации.

7.11. Для безнапорных туннелей, входной оголовок которых работает как водослив, соответствие между расходом и напором устанавливается по следующим зависимостям (рис. 7.2):

при неподтопленном истечении

$$Q = \varepsilon m b \sqrt{2 g H_0^{3/2}}\ ; \tag{7.4}$$

при подтопленном истечении

$$Q = \varphi b h_1 \sqrt{2 g (H_0 - h_1)}, \tag{7.5}$$

где ε, m, φ – коэффициенты сжатия, расхода и скорости водослива; b – ширина водосливного оголовка; h_1 – глубина воды в туннеле на расстоянии около $5h_1$ от входного сечения; $H_0 = \nabla_{УВБ} + V_0^2 / 2g - \nabla_г$; $\nabla_{УВБ}$ – отметка уровня верхнего бьефа на подходе к безнапорному туннелю, которую целесообразно регистрировать на расстоянии $(3 \div 10)H_{макс}$ выше входного сечения туннеля по течению или от наружной стены его крайнего пролета; $\nabla_г$ – отметка гребня водосливного оголовка; $H_{макс}$ – напор на гребне входного оголовка, соответствующий максимальному сбросному расходу.

7.12. На основе формул (7.4) и (7.5) должны быть получены зависимости $\varepsilon m = f(\nabla_{УВБ})$ и $\varphi = f(\nabla_{УВБ})$. Отклонение от этих зависимостей в последующем является показателем изменившихся условий эксплуатации безнапорного гидротехнического туннеля.

Потери напора

7.13. При контроле потерь напора по длине участков напорных туннелей постоянного поперечного сечения или на участках плавно изменяющегося течения в безнапорных туннелях, работающих при относительно низких числах Фруда, по данным измерений осредненных пьезометрических напоров необходимо устанавливать значения коэффициента гидравлического трения по следующей формуле:

$$\lambda_D = \frac{(\nabla_i - \nabla_{i+1}) 4R}{l_i V^2 / 2g}, \tag{7.6}$$

где ∇_i и ∇_{i+1} – отметки уровней воды в пьезометрах, расположенных на участке длиной l_i, на котором отсутствуют местные сопротивления; R – гидравлический радиус; V – средняя скорость течения.

Если измерение осредненных пьезометрических напоров ведется с помощью датчиков, то вместо разностей уровней воды в пьезометрах в формулу (7.6) должна быть введена разность пьезометрических напоров для этих датчиков, определенная для одной и той же горизонтальной плоскости сравнения.

7.14. В процессе эксплуатации коэффициент гидравлического трения по длине указанных выше участков туннелей должен оставаться постоянным, что является диагностическим признаком отсутствия изменений в условиях эксплуатации.

Аналогичным образом могут оцениваться коэффициенты местных потерь напора.

7.15. Измерения потерь напора в энергетических туннелях осуществляются практически постоянно. Изменение этих потерь может происходить постепенно (истирание обделок наносами, обрастание поверхности). При внезапном изменении потерь напора по длине или местных необходимо по возможности быстро установить и устранить причину этого явления, чтобы избежать потерь выработки энергии или предотвратить аварию гидроагрегата.

Статические и динамические нагрузки

7.16. Для оценки нагрузки на обделки и облицовки гидротехнических туннелей должны производиться измерения осредненных пьезометрических напоров и следующих характеристик его пульсаций, зафиксированных датчиками:

значения среднеквадратического отклонения σ_p и коэффициента пространственной корреляции r в случае квазистатического приложения нагрузки на элемент сооружения (его собственные частоты в 2-3 раза выше преобладающих частот воздействия);

значения σ_p и r, а также функции авто- и взаимноспектральной плотности в случае динамического приложения нагрузки на элемент сооружения (частоты собственных колебаний близки к преобладающим частотам воздействия).

Для определения стандарта пульсационной нагрузки, воздействующей на элемент сооружения площадью F, необходимо использовать следующее выражение:

$$\sigma_н^2 = \left(\sum \sigma_{pi}\sigma_{pj}r_{ij}\Delta F_i \Delta F_j\right)\Big/ F^2, \qquad (7.7)$$

где ΔF – площадь прямоугольника, каждая из сторон которого равна расстоянию между датчиками; i и j – номера створов измерения.

Квазистатическая нагрузка на элемент сооружения определяется как

$$P = \overline{P} \pm A_{н}, \tag{7.8}$$

где $\overline{P}$ – осредненная составляющая нагрузки, рассчитываемая по пьезометрам или датчикам как объем тела давления, $A_{н}$ – амплитуда пульсации нагрузки, устанавливаемая по формуле, аналогичной приведенной ниже формуле (7.10), в которой вместо $\sigma_{р}$ вводится $\sigma_{н}$.

7.17. Определение динамического воздействия на элемент сооружения по данным измерений датчиками должно проводиться на основании специальных руководств, например [1] или П84-79/ВНИИГ. Вопрос о допустимости приложения той или иной нагрузки к элементу туннеля диагностируется на основе расчета напряжений, а критерием надежности являются их предельные значения.

Колебания уровней воды и наполнение поперечного сечения туннеля

7.18. Существенные колебания уровней воды в уравнительных резервуарах ГЭС измеряются с помощью датчиков или самописцев уровня. Диагностическими параметрами таких колебаний являются:

максимальные значения уровней воды, ограниченные отметкой гребня шахты или камеры резервуара;

минимальные значения уровня воды, ограниченные отметкой свода напорного туннеля.

7.19. При обработке данных о колебаниях воды в уравнительном резервуаре должны быть получены зависимости максимального и минимального уровней от расхода гидроагрегатов и времени закрытия направляющего аппарата. Эти зависимости необходимо использовать при корректировке расчета неустановившегося движения в системе гидроагрегат – напорный туннель – уравнительный резервуар.

Если в результате испытаний этой системы или указанных корректировочных расчетов будет установлено, что уровни воды могут выйти за установленные пределы, то необходимо принять меры по уменьшению размаха этих колебаний (режимные ограничения, дополнительное сопротивление на тракте уравнительного резервуара и т.д.).

7.20. Наполнение безнапорных туннелей измеряется с помощью пьезометров и датчиков давления. Если такие туннели пропускают воду при

значительных скоростях течения (число Фруда, определенное по гидравлическому радиусу $Fr_R > 5$), для обеспечения устойчивости течения может появиться необходимость в подводе воздуха в пространство над потоком воды [1, 2]. Расход (скорость) воздуха, как правило, контролируется в пределах воздухоподводящих устройств с помощью трубок Пито, анемометров или вертушек. Наполнение туннеля и расходы (скорости) воздуха в аэрационных устройствах являются в этом случае диагностическими параметрами.

7.21. При обобщении данных натурных наблюдений необходимо строить кривые наполнения туннеля при фиксированном открытии затвора в зависимости от расхода воды. Также в зависимости от расхода воды определяется расход (скорость) воздуха в аэрационных устройствах. Полезно для этих устройств устанавливать соответствие между скоростями воздуха и перепадом давления между входом и выходом. Следует учитывать, что скорости течения в аэрационной шахте (галерее) не должны превышать в соответствии с ВСН 38-70 и [16] 60 м/с, лишь в отдельных случаях (в основном для временных сооружений) допускают повышение этих скоростей до 90-100 м/с.

7.22. Об устойчивости безнапорного режима течения свидетельствует достаточный запас между свободной поверхностью воды и сводом туннеля. При существенных скоростях потока устойчивость течения может быть проверена на основе данных [2, 16]. Отсутствие во время эксплуатации тунельного водосброса существенных изменений скорости воздуха в шахте при фиксированных расходах воды и частичных открытиях затворов и сохранение соответствия между скоростью воздуха и перепадом давления на аэрационной шахте указывает на нормальные условия функционирования системы для подвода воздуха.

Если устанавливается возможность появления в туннеле непредусмотренного проектом частично напорного режима течения или затрудняются условия подвода воздуха, то необходимо произвести осмотр и анализ условий работы сооружения и внести коррективы при его эксплуатации.

Кавитация. Кавитационная и абразивная эрозия

7.23. Контроль кавитации и кавитационной эрозии на обтекаемых поверхностях туннелей производится различными методами; выбор метода зависит от задачи прогноза и наличия соответствующей аппаратуры в распоряжении персонала ГЭС или другой организации, выполняющей исследования.

7.24. Начальная стадия кавитации устанавливается по увеличению уровня ультразвукового шума. Такая оценка является качественной, так как с ее помощью не удается установить развитие кавитации.

7.25. Возникновение кавитации возможно прогнозировать на основе измерений осредненных или мгновенных значений пьезометрических напоров, зафиксированных соответственно пьезометрами или датчиками давления. Для первого из этих случаев пульсационная составляющая пьезометрического напора может быть определена по данным литературы или по аналогам. При обработке данных измерений пульсаций пьезометрического напора должны быть получены с помощью ПЭВМ или аналоговых приборов значения их среднеквадратического отклонения (стандарта) σ_p и закон распределения этих пульсаций. В ряде случаев для анализа данных такого рода исследований необходимо знание интервала между нулями пульсационного процесса τ_0 [1, 6], который может быть получен непосредственно по осциллограмме пульсаций, либо рассчитан по специальной программе на ПЭВМ, или получен на основании функции спектральной плотности.

Условия возникновения кавитации заданной обеспеченности определяются следующим неравенством для мгновенного пьезометрического напора:

$$p/\gamma = \bar{p}/\gamma - A, \tag{7.9}$$

где p/γ – осредненный пьезометрический напор; A – амплитуда пульсаций пьезометрического напора, которая в зависимости от обеспеченности экстремального значения амплитуды F_0 может быть определена по следующей формуле [2], справедливой при законе распределения пульсаций, близком к нормальному:

$$A = \sigma_p \left\{ 2 ln \left[\frac{t_*}{2 ln(1/F_0)} \right] \right\}^{1/2}, \tag{7.10}$$

где $t_* = T/\tau_0$; T – продолжительность работы сооружения при рассматриваемом режиме.

7.26. Оценка возможности появления кавитации или кавитационной эрозии на элементах конструкции туннеля может осуществляться на основе измерения осредненных пьезометрических напоров при известной характерной скорости течения $V_{хар}$. Кавитация и кавитационная эрозия возникают, если параметр кавитации меньше его критических значений

$$K = \frac{H_{хар} + H_а - H_к}{V_{хар}^2 / 2g} < K_{кр}; \qquad (7.11)$$

$$K = \frac{H_{хар} + H_а - H_к}{V_{хар}^2 / 2g} < K_{крэ}, \qquad (7.12)$$

где $H_{хар}$ – характерный для данного элемента пьезометрический напор, измеряемый пьезометром; $H_а$ и $H_к$ – пьезометрические напоры, соответствующие атмосферному давлению и давлению парообразования.

Критические параметры кавитации и кавитационной эрозии для различных элементов туннелей (пазов затвора, быков в камерах затворов и т.п.) приводятся в [4, 23].

7.27. Контроль кавитационной эрозии на обтекаемой поверхности может осуществляться, если датчиком фиксируется содержание воздуха в пристенном слое потока воды. Развитие кавитационной эрозии предотвращается, если это содержание составляет по данным П 38-75/ВНИИГ и [11] не менее 7-8%.

7.28. Приближенный контроль за кавитационной эрозией может осуществляться, если датчиками регистрируется мгновенный пьезометрический напор. Полученный в результате таких измерений закон распределения мгновенного давления позволяет установить время работы сооружения при давлениях, равных или ниже давления парообразования. Кавитационная эрозия может наблюдаться, если указанное время становится больше инкубационного периода материала, из которого выполнены обтекаемые поверхности туннеля. Данные по инкубационным периодам и методике таких оценок даны в [1, 17].

7.29. Непосредственный контроль кавитационной и абразивной эрозии осуществляется с помощью специальных датчиков. При обработке их показаний должна строиться зависимость эрозии от скорости течения.

7.30. Поступление сигналов датчиков эрозии – абразивной и кавитационной – свидетельствует также о необходимости изменения условий работы сооружения. Решение о дальнейшей эксплуатации туннеля должно быть принято после его осмотра, фиксации размеров повреждений и проведенных с их учетом расчетов прочности, а также уточнения прогноза дальнейшего развития эрозии.

П Р И Л О Ж Е Н И Я

Приложение 1

Журнал контрольных градуировок датчиков давления

Дата градуировки	№ датчика по исполнительной схеме	Номер канала вторичного прибора	Величина калибровочного сигнала, м	Отсчет по прибору, В	Масштабный коэффициент		
					Максимальная чувсвительность, м/В	Минимальная чувствительность, м/В	Средняя чувствительность, м/В

График градуировочной кривой

Приложение 2

Журнал измерений датчиками кавитации

Номер записи	№ датчика по исполнительной схеме	Гидравлический режим		Номер канала вторичного прибора	Уровень сигнала	Примечание
		Отм.УВБ, отм.УНБ, м	Расход воды, $м^3/с$			

Приложение 3

Журнал измерений гидродинамического давления датчиками

№ записи	№ датчика по исполнительной схеме	Гидравлический режим		№ канала вторичного прибора	Чувствительность регистр. канала (масштаб записи), м/В	Интервал дискретизации по времени, с	Время записи (количество значений), с
		Отм. УВБ, отм. УНБ, м	Расход воды, $м^3/с$				

Приложение 4

Журнал наблюдений кавитации и эрозии

№ записи	№ датчика по исполнительной схеме	Гидравлический режим		Скорость потока (расчетная), м/с	Глубина эрозии, мм	Примечание
		Отм. УВБ, отм. УНБ, м	Расход воды, $м^3/с$			

Приложение 5

Журнал наблюдений аэрации потока

№ записи	№ датчика по исполнительной схеме	Гидравлический режим		Расположение датчиков по глубине потока	Чувствительность датчика	Показания регистрирующего прибора, В	Содержание воздуха, %	Скорость потока (по расчету), м/с
		Отм.УВБ, отм. УНБ, м	Расход воды, $м^3/с$					

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гидравлические** расчеты водосбросных гидротехнических сооружений. Справочное пособие. М.: Энергоатомиздат, 1988.

2. **Гидравлические** расчеты туннельных и трубчатых водосбросов гидроузлов. Рекомендации для проектирования / Под ред. Гунько Ф.Г. М.: Энергия, 1974.

3. **Правила** безопасности при строительстве подземных гидротехнических сооружений. М.: Недра, 1989.

4. **Комплексные** натурные гидравлические исследования водосбросных сооружений / Л.А. Гончаров, В.А. Комаров, Л.Д. Лентяев и др. // Сб. научных трудов Гидропроекта. М., 1983. Вып. 91. С. 9-20.

5. **Руководство** по проектированию гидротехнических туннелей. М.: Стройиздат, 1982.

6. **Лятхер В.М.** Турбулентность в гидросооружениях. М.: Энергия, 1968.

7. **Каталог** приборов для производства гидрологических и гидравлических исследований. Будапешт, 1976.

8. **Максимов Л.С., Шейнин И.С.** Измерение вибрации сооружений. Л.: Стройиздат, 1974.

9. **Горлин С.М.** Экспериментальная аэромеханика. М.: Высшая школа, 1970.

10. **Гальчук В.Я., Соловьев А.П.** Техника научного эксперимента. Л.: Судостроение, 1982.

11. **Воробьев Г.А.** Защита гидротехнических сооружений от кавитации. М.: Энергоатомиздат, 1990.

12. **Горенбейн В.Я.** Износостойкость облицовок гидротехнических сооружений. М.: Энергия, 1967.

13. **Совершенствование** конструкций туннелей для пропуска строительных расходов / В.Л. Куперман, В.М. Мостков, В.Ф. Илюшин и др. // Гидротехническое строительство. 1975. № 8. С. 2-6.

14. **Кавешников Н.Т.** Эксплуатация и ремонт гидротехнических сооружений. М.: Агропромиздат, 1989.

15. **Пропускная** способность водосбросов гидроэлектростанций / Серков В.С., Воробьев А.С., Гурьев А.П., Байчиков Л.Н. М.: Энергия, 1974.

16. **Слисский С.М.** Гидравлические расчеты высоконапорных гидротехнических сооружений. М.: Энергоатомиздат, 1986.

17. **Швайнштейн А.М., Лейбович В.А., Судольский Г.А.** Воздействие потока на боковые стены при расширении его за напорным участком водосброса / Известия ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева. 1990. Т. 225. С. 89-94.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. Общие положения. 4
Назначение рекомендаций и область их применения. 4
Виды гидравлических натурных наблюдений и исследований и фиксируемые с их помощью характеристики туннелей и воздействия на их элементы. 5
Цель и задачи рекомендаций 7
Нормативные ссылки 8
Терминология 8

2. Организация и состав работ по натурным наблюдениям и исследованиям 9

3. Требования к оснащению КИА. 10

4. Типы КИА 14

5. Периодичность наблюдений. Роль визуальных наблюдений. Характерные признаки состояния сооружения или его части . . . 16

6. Хранение данных натурных наблюдений и измерений. 18

7. Методика обработки и анализ данных натурных исследований. Диагностирование состояния туннелей. 22
Общие сведения об обработке данных натурных исследований. Принципы диагностирования. 22
Пропускная способность. 22
Потери напора. 26
Статические и динамические нагрузки. 27
Колебания уровней воды и наполнение поперечного сечения туннеля 28
Кавитация. Кавитационная и абразивная эрозия 29

Приложения. 32

Список литературы 34

Редактор *Т.С. Артюхина*
Корректор *Т.М. Бовичева*
Компьютерная верстка *Н.Н. Седова*

Лицензия ЛР № 020629 от 14.01.98.
Подписано к печати 09.10.2001. Формат 60x90 1/16.
Бумага типографская № 1. Печать офсетная.
Печ.л. 2,25. Тираж 300. Заказ 182.

Издательство и типография ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева».
195220, Санкт-Петербург, Гжатская ул., 21.

gost.e-ecolog.ru