РАО «ЕЭС РОССИИ»

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

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАТУРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПОСТОЯННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА ВИБРАЦИЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

П 73 – 2000
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2000

gost.e-ecolog.ru

РАО «ЕЭС РОССИИ»

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

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО НАТУРНЫМ ИССЛЕДОВАНИЯМ И ПОСТОЯННЫМ НАБЛЮДЕНИЯМ ЗА ВИБРАЦИЕЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ

П 73 – 2000
ВНИИГ

Санкт-Петербург
2000

УДК 626/627.03.001.42 + 621.311.21

Настоящие Рекомендации разработаны впервые. В Рекомендациях изложены методика и порядок проведения динамических исследований в строительных конструкциях и сооружениях, требования к виброизмерительному оборудованию, приведены критерии оценки допустимого уровня колебаний.

Рекомендации предназначены для инженерно-технических работников энергопредприятий, научно-исследовательских и проектных организаций.

Рекомендации разработаны в ОАО "ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева" канд. техн. наук И.С.Калицевой.

© ОАО "ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева", 2000

ПРЕДИСЛОВИЕ

В настоящее время возросло влияние динамических явлений на безопасность и нормальную эксплуатацию гидротехнических сооружений ГЭС, вызванное естественным старением сооружений и оборудования электростанций, накоплением повреждений от близких к предельным эксплуатационных воздействий, большими удельными расходами водосбросных сооружений, большими единичными мощностями энергетического оборудования.

Действующая система надзора за безопасностью гидротехнических сооружений включает требования по учету динамических явлений и регламентирует, главным образом, общие принципы организации и проведения наблюдений.

В этих документах отсутствуют подробные методические рекомендации по технике проведения, интерпретации и правильной оценке результатов вибрационных наблюдений, которые были бы ориентированы на эксплуатационный персонал и позволяли осуществлять правильную оценку состояния сооружений. В результате накопленный многолетний опыт по методике и технике вибрационных испытаний совершенно не реализован в практике эксплуатации сооружений.

При составлении данных рекомендаций использованы результаты выполнения многолетних научно-исследовательских работ по проведению натурных испытаний и оценке динамических характеристик элементов гидротехнических сооружений электростанций при эксплуатационных динамических воздействиях.

При составлении руководства были учтены замечания и предложения специалистов ОАО»Ленгидропроект», ОАО»НИИЭС», Санкт-Петербургского Государственного Политехнического университета, специалистов Братской ГЭС, Колэнерго и ряда других организаций.

1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

1.1. Настоящие рекомендации распространяются на организацию натурных исследований и постоянных наблюдений за вибрацией основных гидротехнических сооружений (бетонных плотин, зданий ГЭС, насосных станций, трубопроводов, напорных бассейнов, водозаборных башен и т.п.) и механического оборудования гидротехнических сооружений (затворы, сороудерживающие решетки, подъемные механизмы и др.).

Рекомендации предназначаются для эксплуатационного персонала гидравлических, тепловых атомных электростанций, а также научно-исследовательских и проектных организаций.

1.2. Рекомендации разработаны в соответствии с требованиями действующих нормативных документов:

СНиП 2.06.01.86 "Гидротехнические сооружения. Основные положения проектирования";

СНиП 2.06.08-87. Бетонные и железобетонные конструкции гидротехнических сооружений;

Положение об отраслевой системе надзора за безопасностью гидротехнических сооружений электростанций РД 34.03.102-88;

Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации: РД 34.20.501-95, 15-е издание;

Типовая инструкция по эксплуатации гидротехнических сооружений русловых (приплотинных) гидроэлектростанций [1];

Пособие для изучения "Правил технической эксплуатации станций и сетей [2];

Внесены ОАО «ВНИИГ им.Б.Е.Веденеева»	Утверждены РАО «ЕЭС России» Письмо № 02-1-03-4/626 от 03.07.98.	Срок введения III кв. 2000 г.

Рекомендации по определению динамических нагрузок, передаваемых вертикальным гидроагрегатом на сооружение. П 37-88 / ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева;

ГОСТ 12327-66. Машины электрические. Остаточные неуравновешенности роторов. Нормы и методы измерений;

Система стандартов безопасности труда. Вибрационная безопасность. Общие требования;

Типовой динамический паспорт гидротехнических сооружений [3];

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

1.3. Термины и их определения, использованные в настоящих рекомендациях, приняты в трактовке ГОСТ 19185-73.

1.4. Целью проведения натурных исследований и постоянных наблюдений является:

1) оценка вибрационного состояния основных конструктивных элементов сооружений;

2) определение динамических характеристик сооружения для прогнозирования его поведения при возможном изменении динамических нагрузок вследствие реконструкции, смены оборудования и т.п.;

3) оценка состояния сооружений и динамических воздействий для установления допустимости и надежности нормальной эксплуатации сооружений.

1.5. Натурные динамические исследования проводятся с привлечением специализированных организаций.

1.6. Ответственной за проведение и обработку постоянных наблюдений за вибрациями является администрация гидроузла, которая может своим приказом поручить эту работу гидротехнической службе, гидроцеху либо любой другой службе, ответственной за состояние сооружений.

2. ДИНАМИЧЕСКИЕ НАГРУЗКИ

2.1. Общие положения.

2.1.1. Для гидросооружений каждого вида характерны те или иные динамические явления, связанные со специфическими для этих сооружений нагрузками.

2.1.2. Глухие бетонные и железобетонные плотины не требуют учета динамических явлений, если в них не встроены и не расположены в непосредственной близости от них какие-либо устройства или сооружения, являющиеся источниками динамических воздействий. В частности, таким источником может быть транспорт, если по плотине проходит шоссейная или железная дороги.

2.1.3. Водосливные плотины и механическое оборудование испытывают динамические воздействия от пульсаций гидродинамического давления со стороны пропускаемых через них потоков и возбуждение от колебаний основания, возникающих при гашении энергии в нижнем бьефе. Секции водосливной плотины, примыкающие к зданию ГЭС, испытывают от него возбуждение, передающееся через грунт или через сопрягающий устой.

2.1.4. Здания приплотинных ГЭС испытывают, главным образом, воздействия, передающиеся через опорные части работающих гидроагрегатов. Ограждающие конструкции проточных частей здания ГЭС и напорные трубопроводы, идущие от плотины к зданию ГЭС, испытывают воздействие от пульсаций гидродинамического давления со стороны потока.

2.1.5. Здания русловых ГЭС испытывают суммарные динамические воздействия, характерные для приплотинной ГЭС и для того типа плотины, которую это здание заменяет. Особенно сложные воздействия испытывают здания совмещенных и водосливных ГЭС, так как они объединяют функции здания ГЭС и водосливной плотины. Так в зданиях ГЭС, встроенных в водослив, динамические явления, связанные с гашением энергии в нижнем бьефе, требуют обязательного учета.

2.1.6. Судоходные шлюзы и причальные сооружения испытывают динамические воздействия от вибрации затворов, либо от работы расположенных на них механизмов, либо от колебаний рядом расположенных сооружений.

2.1.7. Прочие гидросооружения - лесосплавные лотки, плотоходы, рыбопропускные и водозаборные сооружения не испытывают сколько-

нибудь существенных для сооружения в целом динамических воздействий, связанных с эксплуатацией. Кроме перечисленных эксплуатационных динамических нагрузок сооружения испытывают динамические нагрузки от проходящего через сооружения автомобильного и железнодорожного транспорта, а также промышленных взрывов.

2.2. Динамические нагрузки от гидроагрегатов.

2.2.1. Динамические нагрузки от гидроагрегатов [4-6] условно делятся на нагрузки, передаваемые через опорные части гидроагрегатов поддерживающим их конструкциям, и на гидродинамические нагрузки, действующие на поверхности проточных трактов гидротурбинных блоков.

2.2.2. Стационарные динамические нагрузки, передающиеся через опорные части гидроагрегата в нормальных эксплуатационных режимах, возникают:

1) из-за механической неуравновешенности ротора, неуравновешенности магнитных полей, а также асимметрии проточного тракта турбин появляется гармоническая горизонтальная составляющая нагрузки с частотой, равной числу оборотов агрегата в секунду, называемой оборотной;

2) из-за пульсаций скорости потока и, соответственно, давления на рабочее колесо турбины возникают составляющие динамической нагрузки, имеющие частоты: лопастную $f_{лс} = f_{об} \cdot n_{лс}$, где $n_{лс}$ – число лопастей рабочего колеса турбины и лопаточную $f_{лк} = f_{об} \cdot n_{лк}$, где $n_{лк}$ – число лопаток направляющего аппарата;

3) из-за вибраций активного железа генератора и других явлений, связанных с частотой перемен знака напряжения в сети, возникают, так называемые, сетевые частоты 50 и 100 Гц.

Кроме перечисленных составляющих нагрузки радиально-осевые турбины развивают, как правило, еще одну составляющую, имеющую двойную оборотную частоту.

Амплитуды динамических нагрузок на каждой из указанных выше частот определяются по П 37-88 в зависимости от номинальной мощности гидроагрегата, номинального напора и их вариаций в реальных условиях. При этом характерным является увеличение этих амплитуд при некоторых значениях отдаваемых мощностей, наиболее неблагоприятных по условиям обтекания лопастей рабочего колеса.

При работе нескольких агрегатов их воздействие складывается [7] случайным образом. Общее число вариантов $N_ф$ зависит от числа агрегатов N_a и числа пар полюсов $N_п$ следующим образом

$$N_ф = \left(2N_п\right)^{\left(N_a - 1\right)}.$$

Таким образом, нагрузки от гидроагрегатов и вибрации от них являются ярко выраженными случайными явлениями и их оценку целесообразно выполнять соответствующими методами.

Составляющие динамической нагрузки, имеющие лопаточную, статорную и сетевые частоты, как правило, сравнительно малы по амплитуде, практически потребность в их учете может возникнуть лишь в редких случаях (см. П 37-88).

2.2.3. Нестационарные динамические нагрузки возникают при пуске и остановке агрегатов, когда указанные выше частоты и соответствующие им амплитуды меняются от нуля до стационарных значений.

2.3. Динамические нагрузки от работы водосливов [8].

Плотина и механическое оборудование при сбросе воды испытывают динамические воздействия от пульсаций гидродинамического давления со стороны пропускаемых через них потоков и возбуждение от колебаний грунта, возникающих при гашении энергии в нижнем бьефе. Кроме того, затворы и конструкции, несущие эти затворы, не только воспринимают нагрузки от потока, но и, совершая колебания, оказывают обратное влияние на кинематические характеристики потока, вследствие чего между ними возникает динамическое взаимодействие. Закономерности явлений, возникающих в процессе такого взаимодействия, определяются гидродинамическими характеристиками потока и характеристиками колеблющихся упругих конструкций.

2.4. Динамические нагрузки, вызываемые движением автомобильного и железнодорожного транспорта [9].

2.4.1. При движении поезда главными факторами динамического воздействия подвижной нагрузки на сооружение являются следующие:

1) скорость движения нагрузки (эффект скорости). Этот фактор определяет силы инерции, возникающие от движения поезда по криволинейной траектории;

2) неуравновешенность локомотивов, которая определяет силы инерции, возникающие от периодического движения элементов локомотивов (противовесы, кривошипно-шатунные механизмы, поршни и т.п.);

3) удары колес вследствие неровностей пути и на бандажах колес. Эти неровности можно разделить на закономерные и случайные. К закономерным неровностям относятся стыки рельсов, переломы профиля пути на опорах мостов или сопрягающих устоях плотин и выбоины на бандажах колес подвижного состава; к случайным – всякого рода неровности и выбоины на рельсах, возникающие в результате неравномерного износа;

4) колебания надрессорного строения подвижного состава, которые приводят к периодическому изменению давления на ось. Эти колебания вызываются ударами колес о неровности пути;

5) влияние подвижного состава, которое определяет горизонтальные силы воздействия подвижной нагрузки, возникающие от извилистого в плане движения вагонов и локомотивов из-за коничности бандажей.

2.4.2. Увеличение интенсивности движения автомобильного транспорта и веса подвижной нагрузки приводит к необходимости учета динамических явлений, вызванных движущимися автомобилями. В целом эти явления представляют собой сочетание вынужденных и сопровождающих их свободных колебаний. Степень проявления последних зависит в основном от неупругого сопротивления материала конструкций. Вынужденные колебания происходят преимущественно с частотами, близкими к частотам собственных колебаний автомобиля, которые возникают и поддерживаются при его движении по неровному пути.

2.5. Динамические нагрузки от взрывов [10].

2.5.1. Наиболее регулярный характер имеют промышленные взрывы в карьерах камня, расположенных в окрестностях электростанций.

2.5.2. Взрывные волны действуют на конструкцию сооружения как кратковременные динамические нагрузки.

Характер этих нагрузок зависит от веса заряда взрывчатых веществ (ВВ) в одном взрыве, характеристик ВВ, времени задержки между отдельными взрывами, назначения взрыва (обрушение, рыхление, выброс, камуфлет и т.п.), характеристик взрываемых пород, расстояния от карьера до сооружения, геологических и физико-механических характеристик массива пород, через который передаются сейсмические волны от места

взрыва к сооружению, от механических характеристик основания и самого сооружения.

3. МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. При разработке методики динамических исследований (ДИ) необходимо различать следующие три группы сооружений по нагрузкам, рассчитанные:

на воздействие эксплуатационных динамических нагрузок – I группа;

на сооружения, рассчитанные на сейсмические и другие особые воздействия – II группа;

на сооружения, рассчитанные на оба вида воздействий – III группа.

3.2. Работы по организации динамических испытаний выполняются в три этапа:

1. Подготовительный этап.

2. Натурные испытания сооружений.

3. Обработка результатов, их анализ и выдача заключения.

3.3. Во время подготовительного этапа

1) выявляются:

диапазон частот динамических воздействий, которым подвергается сооружение во время эксплуатации или может подвергнуться в результате сейсмических или других особых воздействий;

амплитуды, места приложения и линии действия сил, соответствующих этим частотам;

амплитуды ожидаемых динамических напряжений, виброперемещений, виброускорений, либо других нормируемых кинематических параметров вибрации, вызываемых этими силами;

2) намечается методика проведения испытаний;

3) осуществляется подбор средств измерения вибраций;

4) осуществляется подбор средств возбуждения вибраций.

3.4. Для сооружений I группы по нагрузкам оценка допустимости динамических явлений выполняется по шести критериям:

общей устойчивости, прочности и деформативности сооружения (3 критерия);

выносливости конструктивных элементов сооружения и оборудования;

выполнения санитарных норм по воздействию вибраций на персонал;

допустимости вибраций для технологического оборудования, особенно для средств автоматики и контроля режимов энергетического оборудования.

3.5. Для сооружений I группы по нагрузкам разработка методики ДИ сводится к определению мест измерения параметров динамических явлений, вызванных эксплуатационными динамическими нагрузками, к выявлению наиболее неблагоприятных по этим явлениям режимов работы эксплуатационного оборудования и других эксплуатационных устройств, являющихся источником динамических воздействий, к выбору методик измерения и обработки результатов измерения этих явлений и, наконец, к выбору методики оценки их допустимости.

3.6. Выбор методик по п.3.5. должен выполняться отдельно для каждого из критериев, указанных в п.3.4.

3.7. При отсутствии внешних признаков неблагополучия в напряженно-деформированном состоянии сооружения (трещин, отслоений бетона или штукатурки, протечек и т.п.) допускается заменить инструментальное исследование параметров динамических явлений по устойчивости, прочности и выносливости визуальным обследованием (с помощью оптических приборов) наиболее напряженных конструкций.

3.8. Для сооружений II группы по нагрузкам (см. п.3.1) оценка допустимости динамических явлений выполняется по первым из двух критериев, указанных в п. 3.2. Если электростанция отнесена к группе объектов, обеспечивающих гарантированное энергоснабжение при природных бедствиях, то проверка выполняется также по последнему из критериев, указанных в п. 3.4.

3.9. Для сооружений II группы по нагрузкам разработка методики включает:

определение элементов сооружения, которые предположительно будут находиться в наиболее неблагоприятном напряженно-деформированном состоянии при сейсмических либо других особых воздействиях;

установление зависимости напряженно-деформированного состояния вышеуказанных элементов от нормируемых параметров сейсмических и других особых воздействий и динамических характеристик сооружения, которые могут быть выявлены в ходе ДИ (частоты и формы собственных колебаний, амплитудно-частотные характеристики и т.п.) и установление (на основе этой зависимости) границ допустимости изменения параметров динамических характеристик;

при необходимости проверки последнего из критериев, указанных в п.3.4, необходимо также установление зависимости уровней колебаний технологического оборудования, чувствительного к вибрациям, от нормируемых параметров сейсмических и других особых воздействий и динамических характеристик сооружения, которые могут быть выявлены в ходе ДИ;

выбор мест установки виброизмерительной аппаратуры и средств возбуждения вибраций, исходя из возможности такой установки и обеспечения нормальной работы этих аппаратуры и средств, также из возможности определения необходимых динамических характеристик при таком выборе мест.

3.10. Для сооружений III группы по нагрузкам ДИ проводятся по объединенной методике, включающей все испытания, необходимые для сооружений I и II групп по нагрузкам.

3.11. При решении методических вопросов, перечисленных в пп. 3.4-3.10, рекомендуется использование справочных данных [6, 11 – 13].

4. ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА

4.1. Подбор виброизмерительной аппаратуры является сложной инженерно-метрологической задачей, решение которой рекомендуется поручать специализированным организациям. При отсутствии такой возможности следует руководствоваться рекомендациями, приведенными ниже.

4.2. Подбор виброизмерительной аппаратуры начинают с определения диапазона частот, в пределах которых необходимо произвести измерение вибраций, точнее – низшей и верхней частот этого диапазона.

4.3. Низшую частоту диапазона измеряемых частот для сооружений первой группы по нагрузкам рекомендуется выбирать наименьшей из двух:

равной половине низшей из частот вынужденных колебаний; для конструкций здания ГЭС низшая из частот вынужденных колебаний обычно равна жгутовой частоте, т.е. средней частоте соударений вихревого жгута в отсасывающей трубе со стенками; для конструкций водосбросных сооружений и гасителей энергии эта частота может определяться как частота первого максимума спектра пульсаций нагрузки в соответствии с данными справочного пособия [13];

равной половине низшей из собственных частот сооружения.

4.4. Нижнюю частоту диапазона измеряемых частот для сооружений второй группы по нагрузкам рекомендуется выбирать равной половине низшей из собственных частот сооружения.

4.5. Верхнюю частоту диапазона измеряемых частот для сооружений всех групп по нагрузкам рекомендуется принимать равной удвоенной частоте самой высокочастотной составляющей из значимых частот спектра динамических нагрузок. Для зданий ГЭС, трансформаторных помещений, конструкций распредустройства и т.п. эту частоту рекомендуется принимать равной 200 Гц. Для конструкций водосбросных сооружений, гасителей энергии и т.п. эту частоту рекомендуется принимать не ниже 20 Гц.

Для сооружений, проверяемых на воздействие тектонических землетрясений, эту частоту допускается принимать равной 10 Гц.

4.6. Выбор измеряемого параметра динамических явлений, как правило, определяется нормируемым параметром или критерием допустимости. Так, например, для контроля напряженно-деформированного состояния рекомендуется измерять непосредственно деформации и виброперемещения для сопоставления их величин, определяемых также и через формы собственных колебаний. Для проверки допустимости вибраций по воздействию на персонал рекомендуется измерять виброскорости колебательного движения. А для проверки допустимости вибраций по воздействию на технологическое оборудование рекомендуется измерять виброперемещения, виброскорости или виброускорения в зависимости от критерия допустимости вибраций для каждого из типов оборудования.

При проведении ДИ с помощью вибраторов, равно как и в других случаях, когда колебания носят гармонический характер, допускается производить измерение одного, любого из параметров вибрации – виброперемещения, виброскорости или виброускорения, т.к. в этом случае между ними существует простая взаимно однозначная зависимость.

4.7. В качестве первичных измерительных вибропреобразователей для определения кинематических параметров вибраций используются индукционные и пьезоэлектрические датчики.

Для большинства случаев измерения вибрации гидросооружений (бетонные плотины, здания ГЭС и др.) пригодны вибрографы с рабочей полосой частот от 1 до 200 Гц и коэффициентом увеличения порядка 500-3000.

4.8. Для измерения динамических деформаций элементов строительных конструкций используются тензорезисторы.

4.9. Для многоканальной записи электрических сигналов от вибродатчиков широко применяются светолучевые осциллографы, магнитографы и быстродействующие самописцы. Наибольшие возможности дает регистрация выходных сигналов датчиков в цифровом коде в памяти ЭВМ с обработкой их по заданным программам и выдачей результатов в графической и табличной форме.

5. ВИБРОВОЗБУДИТЕЛЬНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ

5.1. Одним из методов определения основных динамических характеристик сооружения (собственных частот, форм собственных колебаний, логарифмического декремента затухания) является возбуждение колебаний с помощью вибраторов.

5.2. При необходимости применения вибровозбудительных средств их параметры определяются по следующим рекомендациям:

диапазон частот, в пределах которого должно быть обеспечено возбуждение вибраций, определяется по тем же правилам, что и для виброизмерительной аппаратуры (см. раздел 4);

амплитуда силы, развиваемой вибратором, на нижней частоте определяется по формуле:

$$P_{\text{н}} = \max\left(P_{\text{н}i}\right) = \max\left(\frac{A_j}{\sigma_{ji}}\right),$$

где A_j – амплитуда надежно регистрируемых колебаний в точке (на порядок больше порогового уровня датчика, установленного в этой точке и не менее, чем в 3 раза больше фонового уровня колебаний в этой точке);

σ_{ji} – функция влияния, т.е. перемещение в точке j от единичной силы,

приложенной в точке *i*, где установлен вибратор; при этом для определения силы выбирается наибольшее значение из полученных по всему множеству точек *ji*;

амплитуда силы, развиваемой вибратором на верхней частоте, определяется по формуле:

$$P_{\text{в}} = \max\left(P_{\text{в}i}\right) = \max\left(m_i \omega_{\text{в}}^2 A_j n_{ji}\right),$$

где m_i – масса сооружения, приведенная к точке i установки вибратора при прогнозируемой на основе расчетов форме колебаний, соответствующей круговой частоте $\omega_{\text{в}}$, являющейся верхней частотой диапазона частот, в котором проводятся ДТИ с помощью этого вибратора; n_{ji} – определяемое по прогнозируемой форме колебаний отношение амплитуды колебаний в точке i к амплитуде колебаний в точке j; как и в предыдущем случае выбирается наибольшее значение по всему множеству точек *ji*.

Для ориентировки полезно иметь ввиду, что фоновые уровни вибраций на уровне гребня глухих бетонных плотин обычно характеризуются амплитудами виброперемещений от 1-2 до 3-4 мкм, на водосливных секциях при неработающих водосбросах – теми же амплитудами, а при работающих (в зависимости от режима) в несколько раз большими; на конструкциях здания ГЭС уровни вибраций характеризуются амплитудами виброперемещений от нескольких до десятков микрометров.

Для надежной регистрации уровней вибрации, возбуждаемой вибраторами, необходимо возбуждать колебания с амплитудами не менее, чем в три раза превосходящими фоновые.

5.3. Рекомендуется применение дебалансных вибраторов с электроприводом, допускающим регулирование частоты в пределах всего необходимого диапазона частот и с переменным дебалансом, чтобы получать требуемую амплитуду силы как на низких, так и на высоких частотах. Однако, в ряде случаев для перекрытия всего диапазона частот оказывается необходимым применение двух и более вибраторов с разными параметрами.

5.4. Если необходимо испытание сооружения не только на горизонтальную, но и на вертикальную составляющую динамических нагрузок, то рекомендуется применение вибраторов, дающих такую возможность без замены и сложной переналадки, в частности, вибраторов с переключаемым направлением возбуждающей силы.

5.5. Для крепления вибраторов на всех площадках, где необходимо возбуждение динамических нагрузок, устраиваются стальные закладные рамы требуемых размеров и несущей способности. При проектировании закладных рам рекомендуется обеспечить напряжение, не превышающее в их элементах, соприкасающихся с бетоном, 10 МПа.

5.6. Крепление вибратора к закладным рамам рекомендуется выполнять с помощью болтов, шпилек либо электросваркой. В последнем случае конструкция закладной рамы должна обеспечивать изоляцию бетона от высоких температур.

6. ПРОВЕДЕНИЕ НАТУРНЫХ ДИНАМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

6.1. При проведении ДИ, в зависимости от вида сооружения и способа возбуждения его колебаний, рекомендуется использовать различные методики.

6.2. При проведении ДИ сооружений, содержащих источники эксплуатационных динамических нагрузок (здания ГЭС, водосбросы и т.п.), рекомендуется первоначально с использованием легкой переносной измерительной аппаратуры провести рекогносцировочное обследование уровней колебаний конструкций в различных точках сооружения при разных режимах источников динамических нагрузок. После этого по результатам рекогносцировки на наиболее неблагоприятных по уровням вибрации секциях сооружения проводятся детальные исследования с применением синхронной регистрации вибраций в необходимом количестве точек на всех наиболее неблагоприятных режимах.

6.3. Для выявления наиболее неблагоприятного источника вибраций рекомендуется проводить испытания поочередно при работе только одного источника динамических нагрузок, либо, если это невозможно, то при различных комбинациях этих источников, дающих возможность путем сопоставления установить наиболее неблагоприятный источник.

6.4. При проведении ДИ сооружений с помощью специальных средств возбуждения вибраций рекомендуется обследовать на каждом сооружении все характерные его секции. Например, при обследовании глухой бетонной плотины, имеющей большую протяженность, рекомендуется обследовать секции наибольшей, средней и наименьшей высоты.

6.5. Рекомендуется проводить каждое ДИ два раза в год – в начале весны и осени, в моменты минимального и максимального раскрытия межсекционных швов, а на подпорных сооружениях с водохранилищами

годичного или многолетнего регулирования – в моменты минимального (желательно УМО) и максимального (НПУ или ФПУ) уровней воды в водохранилище.

В начале весны в допаводковый период минимального стока обычно удается кроме того в широких пределах маневрировать режимами каждого гидроагрегата от полной остановки до кратковременного набора полной мощности.

6.6. На водосбросных сооружениях рекомендуется проводить ДИ в паводковый период, когда складывается наиболее благоприятная возможность создавать различные сочетания работающих и неработающих водосбросов.

6.7. При проведении ДИ с целью прогнозирования наибольших уровней вибрации на рабочих местах персонала или в местах установки технологического оборудования, чувствительного к вибрациям, датчики устанавливаются на обследуемых конструкциях и вблизи источников динамических нагрузок для установления связи между их режимами.

6.8. При проведении ДИ с целью прогнозирования устойчивости сооружения и напряжений в его теле датчики необходимо разместить на сооружении так и в таком количестве, чтобы по их синхронно записанным показаниям можно было построить формы колебаний сооружения на каждой частоте, особенно – на резонансных частотах, либо характерных частотах вынужденных колебаний от эксплуатационных нагрузок.

6.9. Исследованию колебаний сооружения или строительной конструкции должно предшествовать составление программы испытаний. В программе указываются: объект и цель испытаний, типы виброизмерительной аппаратуры, точки и направление измерения вибраций, необходимые режимы источников вибрации, замеренные величины при испытании, необходимое время для испытаний, в какой форме должны быть выданы результаты испытаний. Программа утверждается администрацией, ответственной за эксплуатацию обследуемого сооружения.

6.10. При измерениях вибрации сооружения пользуются методикой ступенчатого изменения режимов источников вибрации.

6.11. При исследованиях колебаний, вызванных работой агрегатов, записи производятся при различных нагрузках и их сочетаниях на агрегатах.

6.12. При проведении ДИ сооружений, подверженных динамическим нагрузкам, особенно от гидроагрегатов, учитывая случайность соотно-

шения фаз нагрузок от каждого агрегата при каждом его пуске, рекомендуется выполнять многократные измерения вибраций после остановок и повторных пусков агрегатов.

6.13. При исследовании колебаний водосливных плотин затворы исследуемой секции кратковременно поднимаются ступенями на определенную высоту. При каждом из положений производится запись колебаний.

7. ОРГАНИЗАЦИЯ ПОСТОЯННЫХ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ВИБРАЦИЕЙ

7.1. В соответствии РД 34.20.501-95 и [2] в зависимости от условий эксплуатации рекомендуется проводить постоянные динамические исследования на бетонных плотинах I класса, подвергающихся существенным динамическим воздействиям. Кроме того, при изменении условий эксплуатации и появлении повышенных вибраций на конструкциях гидросооружений проводятся наблюдения по специально разработанным программам.

7.2. На гидротехнических сооружениях I и II класса размещение аппаратуры для постоянного наблюдения за динамическими явлениями обычно предусматривается в техническом и рабочем проекте гидроузла.

7.3. Применяются следующие методы организации работ:

а) установка "закладной" аппаратуры – датчики вместе с кабелем закладывают в бетон сооружения в строительный период; в дальнейшем их извлечение и замена практически невозможны;

б) использование съемной аппаратуры – в строительный период закладывают в бетон только гнезда и приспособления, предназначенные для установки измерительной аппаратуры.

7.4. Состав применяемой аппаратуры, количество датчиков и размещение их на сооружении определяются целями исследований и конструктивными особенностями сооружения. Поэтому проект размещения аппаратуры требует каждый раз индивидуального подхода и должен составляться с привлечением специализированных организаций.

7.5. При составлении проекта размещения датчиков давления следует опираться на результаты модельных и натурных исследований пульсации давления, выполненных на сооружениях, близких по конструкции.

7.6. Для определения количества датчиков каждого типа следует ограничиться разумным минимумом, достаточным для решения поставленных задач.

7.7. При выполнении подготовительных строительно-монтажных работ необходим постоянный авторский надзор со стороны представителей организации, выполняющей исследования.

7.8. При постоянных динамических исследованиях, как показывает опыт, более предпочтительной оказывается схема с использованием съемной аппаратуры.

7.9. При проведении исследований водосбросных сооружений и зданий ГЭС рекомендуется располагать аппаратуру в средней части сооружения для того, чтобы уменьшить влияние на исследуемые процессы боковых сопряжений с соседними сооружениями.

7.10. Количество вибродатчиков и их расположение на сооружении должны обеспечить возможность определения формы колебаний сооружения.

7.11. Тензодатчики монтируют в тех местах конструкции, где по расчетам должны наблюдаться наибольшие деформации. Некоторое количество их следует предусмотреть на участках возможных концентраций напряжений.

7.12. При производстве самих измерений ставится задача получить возможно более полную информацию с помощью созданной сети датчиков. Обычно измерения организуют в несколько циклов. При выполнении натурных динамических исследований сооружений с применением приборов, смонтированных на сооружении, в целях охвата возможно большего диапазона изменения условий опыта, всегда стремятся проводить испытания, меняя режимы источников вибрации по определенной программе, составленной специализированной организацией и согласованной со службой эксплуатации сооружений.

7.13. Повторяя циклы измерений при изменяющихся динамических нагрузках, напоре, горизонтах бьефов и пр., получают данные о влиянии этих условий на динамическое состояние сооружений.

7.14. При оценке допустимости тех или иных динамических явлений в сооружениях следует пользоваться рекомендациями раздела 9 настоящего документа и справочными данными П 37-88 и [12, 13].

8. МЕТОДИКА ОБРАБОТКИ ДАННЫХ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

8.1. Методика обработки экспериментального материала зависит от характера зарегистрированных процессов и поставленных задач. Ниже приведены практические рекомендации по обработке применительно к нескольким типам колебательных процессов, с которыми часто приходится встречаться при экспериментальных исследованиях вибрации сооружений.

8.2. Обработка виброграмм периодических колебаний, определение частоты, амплитуды, а также фазового сдвига (относительно других гармонических колебаний) на осциллографической кривой не представляет трудностей.

Для повышения точности определения частоты рекомендуется брать для обработки участок осциллограммы, соответствующий нескольким периодам колебаний.

Амплитуда перемещения (скорости, ускорения) при частоте колебаний f

$$A = \frac{\beta\left(2A_{\text{осц}}\right)}{2V(f)},$$

где $2A_{\text{осц}}$ – двойная амплитуда (размах) осциллографической кривой; $V(f)$ – значение амплитудно-частотной характеристики вибрографа (велосиграфа, акселерографа) на частоте f; β – коэффициент загрубления.

Амплитуды двухкомпонентных колебаний определяются раздельно для каждой компоненты, для чего проводят огибающие колебания. В этом случае низкочастотная компонента имеет двойную амплитуду $2A_1$, а высокочастотная – $2A_2$.

При сложной форме кривой вибрации также проводятся огибающие кривые вибрации. Амплитуда основной гармоники здесь равна $2A_1$, а другой – $2A_2$.

Амплитуды трехкомпонентных колебаний можно установить методом огибающих: на основную гармонику с амплитудой $2A$ накладываются две компоненты, составляющие биения. Как известно, при биениях сумма амплитуд составляющих гармоник равна размеру "горба" кривой биения, а разность амплитуд - размеру суженной части, т.е.

$$c = 2A_1 + 2A_2; \quad d = 2A_1 - 2A_2,$$

откуда

$$2A_2 = \frac{c-d}{2}; \qquad 2A_1 = \frac{c+d}{2}.$$

Определение скорости и ускорения при вибрации. В ряде случаев необходимо знать скорость и ускорение смещения конструкции при вибрации, что позволяет оценить, например, по ускорению уровень вибрации (в децибелах), а также дополнительные усилия на конструкцию от ее действия, так как сила равна массе, умноженной на ускорение: $P=ma$, где m – масса; a – ускорение. Масса, нагружающая данную конструкцию, в большинстве случаев, известна, а ускорение определяется по кривой вибрации. В первом приближении ветвь интересующей нас кривой вибрации может быть заменена синусоидой, тогда скорость и ускорение определяются так:

$$V = A\omega \cos\omega t, \quad a = -A\omega^2 \sin\omega t,$$

где A – амплитуда данной ветви кривой вибрации; ω – круговая частота, 1/с; $\omega = 2\pi / T$; T – период колебания, с.

8.3. Обработка записей случайных процессов.

Характеристиками случайных процессов являются:

1. Среднее по ансамблю значение случайной величины

$$\bar{x} = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2\pi} \int_{-T}^{T} x(t)dt;$$

так как на осциллограмме амплитуды вибрации принимают значение + и −, то среднее значение функции в отрезке времени −T, +T принимают равным нулю. Размерность $\bar{x}$ такая же, как и размерность исследуемой величины.

2. Среднее квадратичное отклонение случайной величины σ или дисперсия σ^2

$$\bar{x}^2(t) = \sigma^2 = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} \left[x(t)\right]^2 dt.$$

3. Корреляционная функция процесса

$$R_x(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau)x(t)dt.$$

При наличии двух случайных процессов $x(t)$ и $y(t)$ взаимная корреляционная функция $R_{xy}(\tau)$ определяется как

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T\to\infty} \frac{1}{2T} \int_{-T}^{T} x(t+\tau)y(t)dt.$$

Корреляционная функция характеризует степень связи между собой случайных функций в моменты t и $t+\tau$.

Очевидно, что $R_x(0) = \sigma_x^2 = \bar{x}^2(t)$. Размерность корреляционной функции соответствует квадрату размерности измеряемой величины.

Коэффициентом корреляции двух случайных величин $x(t)$ и $y(t)$ называется отношение их корреляционного момента к среднему геометрическому их дисперсий:

$$r_{xy} = \frac{K_{xy}}{\sqrt{D_x D_y}} = \frac{K_{xy}}{\sigma_x \sigma_y}.$$

Коэффициент корреляции – безразмерная величина и модуль его не может быть больше единицы.

4. Спектральная плотность случайной функции, которую получают, применяя преобразование Фурье. Она является распределением по частотам мощности случайной функции.

$$S_x(\omega) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{\infty} R_x(\tau) e^{-j\omega\tau} d\tau = \frac{2}{\pi} \int_{0}^{\infty} R_x(\tau) \cos\omega\tau d\tau.$$

Значение спектральной плотности с частотой ω количественно характеризует долю возмущений с этой частотой в общем случайном процессе.

Обработка записей стационарных случайных процессов производится с привлечением методов корреляционного спектрального анализа.

9. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ ДОПУСТИМОГО УРОВНЯ КОЛЕБАНИЙ

9.1. Общие положения.

Допустимый уровснь колебаний сооружений, подвергающихся динамическим воздействиям, определяется:

а) физиологическим воздействием колебаний на людей;

б) несущей способностью (прочностью, устойчивостью и выносливостью конструктивных элементов колеблющихся конструкций);

в) влиянием колебаний на технологическое оборудование.

9.2. Санитарные нормы на вибрацию.

9.2.1. Действующие в настоящее время санитарные нормы на вибрацию приведены в ГОСТ 12.1.012-90.

9.2.2. В зависимости от категории вибрации нормируемыми показателями вибрационной нагрузки на оператора, находящегося на рабочем месте, являются одночисловые параметры или спектр вибрации, установленные нормами Минздрава СССР.

9.2.3. Для гидротехнических сооружений, находящихся в эксплуатации, рекомендуется вибрационную нагрузку, действующую на оператора, определять через спектр вибрации. В этом случае нормируемыми показателями общей вибрации являются среднеквадратичные значения виброускорения (виброскорости) или их логарифмические уровни в третьоктавных полосах со среднегеометрическими частотами: 0,8; 1,0; 1,2; 1,6; 2,0; 2,5; 3,15; 4,0; 5,0; 6,3; 8,0; 10,0; 12,5; 16; 20; 25; 31,5; 40; 50; 63; 80 Гц.

9.2.4. В соответствии с санитарными нормами на гидротехнических сооружениях следует рассматривать следующие три категории вибраций:

3 тип "а" – общая технологическая вибрация, воздействующая на операторов стационарных машин и оборудования или передающаяся на рабочие места, не имеющие источников вибрации;

3 тип "б" – общая технологическая вибрация, передающаяся на рабочие места в складах, столовых, бытовых, дежурных и других производственных помещениях, где нет генерирующих вибрацию машин;

3 тип "в" – вибрация на рабочих местах работников умственного труда и персонала, не занимающегося физическим трудом.

9.2.5. Нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на операторов для категорий вибрации 3 "а" и 3 "в" при длительности вибрационного воздействия 8 часов приведены соответственно в табл. 1-2.

Для категории 3 "б" нормой вибрационной нагрузки являются указанные в табл. 1 нормы, значения которых умножены на 0,4, а уровни уменьшены на 8 дБ.

9.2.6. Норму вибрационной нагрузки на оператора при длительности воздействия менее 8 часов (480 мин.) определяют по формуле

$$u_t = u_{480}\sqrt{\frac{480}{T}},$$

где u_{480} – норма вибрационной нагрузки для длительности вибрации 480 мин; T – длительность воздействия вибрации.

При $T < 30$ мин в качестве нормы принимают значение, вычисленное для $T = 30$ мин.

9.2.7. При ремонте и реконструкции в проектировочных расчетах строительных конструкций на рабочих местах в производственных помещениях при гармонической и полигармонической вибрации, если в пределах каждой октавной полосы находится не более одной составляющей, используют амплитуду виброперемещения. Допустимые амплитуды виброперемещений для частот гармонических составляющих, соответствующих среднегеометрическим частотам октавных полос, приведены в табл. 2.

Для частот, отличных от указанных в таблице, допустимые амплитуды виброперемещения определяются интерполяцией. При полигармонической вибрации допустимые амплитуды виброперемещения находят по табл. 2 для каждой составляющей по ее частоте.

Таблица 1

Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора

Средне-геометри-ческие частоты полос, Гц	Нормативные значения							
	виброускорения				виброскорости			
	$м \cdot с^{-2}$		дБ		$м \cdot с^{-1} \cdot 10^{-2}$		дБ	
	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.
	Общая вибрация, категория 3, тип «а»							
1,6	0,09		99		0,9		105	
2,0	0,08	0,14	98	103	0,64	1,3	102	108
2,5	0,071		97		0,46		99	
3,15	0,063		96		0,32	0,45	96	
4,0	0,056	0,1	95	100	0,23		93	99
5,0	0,056		95		0,18		91	
6,3	0,056		95		0,14		89	
8,0	0,056	0,11	95	101	0,12	0,22	87	93
10,0	0,071		97		0,12		87	
12,5	0,09		99		0,12		87	
16,0	0,112	0,20	101	106	0,12	0,20	87	92
20,0	0,140		103		0,12		87	
25,0	0,18		105		0,12		87	
31,5	0,22	0,40	107	112	0,12	0,20	87	92
40,0	0,285		109		0,12		87	
50,0	0,355		111		0,12		87	
63,0	0,445	0,80	113	118	0,12	0,20	87	92
80,0	0,56		115		0,12		87	

Продолжение таблицы 1

Средне-геометри-ческие частоты полос, Гц	Нормативные значения							
	виброускорения				виброскорости			
	$м \cdot с^{-2}$		дБ		$м \cdot с^{-1} \cdot 10^{-2}$		дБ	
	в1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/ окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.	в 1/3 окт.	в 1/1 окт.
	Общая вибрация, категория 3, тип «в»							
1,6	0,0125		82		0,13		88	
2,0	0,0112	0,02	81	86	0,09	0,18	85	91
2,5	0,01		80		0,063		82	
3,15	0,009		79		0,045		79	
4,0	0,008	0,014	78	83	0,032	0,063	76	82
5,0	0,008		78		0,025		74	
6,3	0,008		78		0,02		72	
8,0	0,008	0,014	78	83	0,016	0,032	70	75
10,0	0,01		80		0,016		70	
12,5	0,0125		82		0,016		70	
16,0	0,016	0,028	84	89	0,016	0,028	70	75
20,0	0,02		86		0,016		70	
25,0	0,025		88		0,016		70	
31,5	0,032	0,056	90	95	0,016	0,028	70	75
40,0	0,04		92		0,016		70	
50,0	0,05		94		0,016		70	
63,0	0,063	0,112	96	101	0,016	0,028	70	75
80,0	0,08		98		0,016		70	

Таблица 2

Санитарные нормы спектральных показателей вибрационной нагрузки на оператора. Локальная вибрация

Среднегеометрические частоты октавных полос, Гц	Нормативные значения в направлениях			
	виброускорения		виброскорости	
	$м \cdot с^{-2}$	дБ	$м \cdot с^{-1} \cdot 10^{-2}$	дБ
8	1,4	123	2,8	115
16	1,4	123	1,4	109
31,5	2,7	129	1,4	109
63	5,4	135	1,4	109
125	10,7	141	1,4	109
250	21,3	147	1,4	109
500	42,5	153	1,4	109
1000	85,0	159	1,4	109

9.3. Оценка допустимости динамических явлений по их влиянию на общую устойчивость, прочность и выносливость конструктивных элементов.

9.3.1. При обработке результатов измерений с целью прогнозирования устойчивости, прочности и выносливости сооружений рекомендуется по выявленным формам вынужденных колебаний определять силы инерции собственных масс сооружения и оборудования и проверять устойчивость и прочность сооружения при суммарном квазистатическом действии статических и динамических (в том числе инерционных) нагрузок в наиболее неблагоприятных сочетаниях.

9.3.2. При проверке общей устойчивости на сдвиг компоненты расчетных амплитуд динамических сил, параллельных равнодействующей статических сдвигающих сил, арифметически добавляют к статическим, а компоненты расчетных амплитуд динамических сил, параллельных равнодействующей нормальных к поверхности сдвига сил, арифметически вычитают из статических.

При проверке общей устойчивости на опрокидывание вокруг определенной точки моменты расчетных амплитуд всех динамических сил арифметически суммируют с моментом статических опрокидывающих сил.

При таком способе суммирования получается оценка коэффициента запаса устойчивости "снизу", т.е. этот коэффициент реально не может быть ниже вычисленного, а фактическая устойчивость всегда выше или равна расчетной.

Если расчетная устойчивость, вычисленная таким способом, оказывается менее нормативной, то необходимо выполнение второй стадии расчетов, с учетом реально возможных соотношений фаз динамических сил.

9.3.3. При оценке прочности и выносливости колеблющейся конструкции наиболее распространен метод, связанный с вычислением внутренних усилий по расчетной форме колебаний на основе измерения амплитуды в одной из точек конструкции и с использованием данных статического расчета конструкции на прочность. В этом случае оценка конструкции по условиям ее прочности и выносливости при действии динамической нагрузки может быть сделана в соответствии с расчетными положениями инструкций [14,15], П 37-88 и нормативных документов [6, 11, 15].

9.3.4. Если амплитуды колебаний невелики, то нет необходимости в определении внутренних динамических усилий. Нижняя граница амплитуд колебаний, за пределами которой колебания можно считать безопасными, не прибегая к специальным расчетам, определяется отношением линейного размера конструктивного элемента к его динамическому перемещению [11].

Если наибольшее динамическое перемещение балки перекрытия и подобных конструкций, совершающих колебания, связанные с изгибом (за вычетом перемещений ее опор), не превышает 1/40000 длины пролета, то при проверке несущей способности конструкции можно не учитывать динамических нагрузок.

Если по результатам измерений выяснилось, что для колонн и стен здания разность горизонтальных динамических перемещений нижнего и верхнего концов колонны (стены) не превышает 1/40000 высоты, то динамические нагрузки можно не учитывать при проверке несущей способности этих конструкций.

9.3.5. Помимо ограничения колебаний по несущей способности предъявляются требования по ограничению динамических прогибов [11]. Это требование основывается на необходимости обеспечения достаточной жесткости сооружения в его совместной работе на статические и динамические нагрузки.

В табл. 3 приводятся данные по ограничению колебаний строительных конструкций предельно допустимым динамическим прогибом.

9.3.6. Для грубой оценки несущей способности конструкций, подверженных действию эксплуатационных динамических нагрузок, можно считать, что колебания, не опасные для людей, как правило, не опасны и для несущих конструкций.

Так выполнение очень жестких санитарно-гигиенических и технологических требований по ограничению уровня колебаний конструкций, на которых находятся люди или чувствительное к вибрациям оборудование, является достаточным и для обеспечения несущей способности конструкций.

Таблица 3

Амплитуды колебаний конструкций, соответствующие предельно допустимому динамическому прогибу

Частота, Гц	Амплитуда, мм	Частота, Гц	Амплитуда, мм
1	10	10	0,1
2	2,5	15	0,067
3	1,111	20	0,05
4	0,626	25	0,04
5	0,4	50	0,02
6	0,278	75	0,013
7	0,156	100	0,01

Примечание. Для промежуточных значений частот колебаний амплитуды определяются формулами: а) для частот колебаний от 1 до 10 Гц $a_0=10/n_0$; б) для частот колебаний от10 до 100 Гц $a_0=1/n_0$. Здесь n_0- частота вынужденных колебаний, Гц; a_0 - допускаемая амплитуда колебаний конструкции от нагрузки, мм.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Типовая** инструкция по эксплуатации гидротехнических сооружений русловых (приплотинных) гидроэлектростанций. - М.: СПО " Союзтехэнерго", 1979.

2. **Пособие** для изучения "Правил технической эксплуатации электрических станций и сетей" (14-е издание, изменение №3). - М.-СПб, 1992.

3. **Типовой** динамический паспорт гидротехнических сооружений электростанций и инструкция по его заполнению. РАО "ЕЭС России", СПб, 1995.

4. **Владиславлев Л.А.** Вибрация гидроагрегатов гидроэлектрических станций. - М.: Энергия, 1972.

5. **Использование** водной энергии / Под ред. Д.С.Щавелева. - Л.: Энергия, 1976.

6. **Динамический** расчет специальных инженерных сооружений и конструкций: Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г.Корнеева, А.Ф.Смирнова. - М.: Стройиздат, 1986.

7. **Цейтлин А.И., Гусева Н.И.** Статические методы расчета сооружений на групповые динамические воздействия. - М.: Стройиздат, 1979.

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

9. **Брик А.Л., Давыдов В.Г., Савельев В.Н.** Эксплуатация искусственных сооружений на железных дорогах. - М.: Транспорт, 1990.

10. **Справочник** взрывника / Под ред. Б.Н. Кутузова. - М.: Недра, 1988.

11. **Динамический** расчет зданий и сооружений: Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г. Корнеева, И.М. Рабиновича. - М.: Стройиздат, 1984.

12. **Динамический** расчет на специальные воздействия: Справочник проектировщика / Под ред. Б.Г. Корнеева, И.М. Рабиновича. - М.: Стройиздат, 1981.

13. **Максимов Л.С., Шейнин И.С.** Измерение вибраций сооружений: Справочное пособие. - Л.: Стройиздат, 1974.

14. **Инструкция** по расчету несущих конструкций промышленных зданий и сооружений на динамические нагрузки. - М.: Стройиздат, 1970.

15. **Руководство** по проектированию виброизоляции машин и оборудования. - М.: Стройиздат, 1972.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

1. Общие положения. 4

2. Динамические нагрузки. 6

2.1. Общие положения. 6

2.2. Динамические нагрузки от гидроагрегатов. 7

2.3. Динамические нагрузки от работы водосливов 8

2.4. Динамические нагрузки, вызываемые движением автомобильного и железнодорожного транспорта. 8

2.5. Динамические нагрузки от взрывов 9

3. Методика проведения динамических исследований 10

4. Измерительная аппаратура 12

5. Вибровозбудительное оборудование 14

6. Проведение натурных динамических исследований 16

7. Организация постоянных наблюдений за вибрацией 18

8. Методика обработки данных натурных наблюдений 20

9. Критерии оценки допустимого уровня колебаний 22

9.1. Общие положения. 22

9.2. Санитарные нормы на вибрацию 23

9.3. Оценка допустимости динамических явлений по их влиянию на общую устойчивость, прочность и выносливость конструктивных лементов 27

Список литературы. 30

Научный редактор *Л. В. Мошков*
Редактор *Т. С. Артюхина*
Технический редактор *Т. М. Бовичева*
Компьютерная верстка *Н. Н. Седова*

Лицензия ЛР № 020629 от 14.01.98.
Подписано в печать 28.02.2000. Формат 60x84 1/16.
Печать офсетная. Печ.л. 2,0. Тираж 300. Зак. 40.

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

gost.e-ecolog.ru