

КАНАДСКАЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКАЯ АССОЦИАЦИЯ
(CANADIAN ELECTRICAL ASSOCIATION)

Технологический и эксплуатационный отдел

Март 1993 г.
Монреаль

ОТРЫВ ТУРБИННОЙ КРЫШКИ ГИДРОАГРЕГАТА № 1
НА ГЭС «ГРАНД РЭПИДС» (GRAND RAPIDS)

У. Л. ПАВЛИКЕВИЧ (W. L. PAWLIKOWICH)

ОТДЕЛ (ЭКСПЛУАТАЦИИ) ГЭС
ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОТДЕЛ – ЮГ
КОМПАНИЯ «MANITOBA HYDRO»
ВИННИПЕГ, пров. МАНИТОБА
КАНАДА R3R 2C7

КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ

10 марта 1992 года произошла авария с отрывом крышки турбины на гидроагрегате № 1 гидроэлектростанции «Гранд Рэпидс». Приведено описание аварии, а также действия, предпринятые для последующего ввода станции в эксплуатацию. В работе изложены результаты расследования причин аварии, и определён её тип. Также представлены обобщённые рекомендации по изменению методов технического обслуживания, применяемых на других действующих станциях компании «Manitoba Hydro».

Ключевые слова: Катастрофический, авария, крышка турбины, станция, затопление

ВВЕДЕНИЕ

10 марта 1992 года, в 20:15, произошёл отрыв крышки турбины гидроагрегата № 1 со статорного кольца с её последующим подъёмом напором воды и ударом по нижней крестовине генератора. Создавшийся поток воды затопил три других гидроагрегата машинного зала, а также нижние галереи, механический цех, компрессорный зал, маслонапорную установку и трансформатор собственных нужд. Ход затопления был контролируемым, руководство станции было проинформировано об аварии, и были предприняты меры по сведению к минимуму разрушений электростанции и организации восстановительных работ. Было начато расследование по установлению причин аварии и разработке рекомендаций по действиям, которые позволили бы предотвратить повторное возникновения аварий подобного типа на других объектах компании «Manitoba Hydro».

Степень разрушений на станции была значительной и для повторного ввода гидроагрегатов в эксплуатацию потребовалось предпринять значительные усилия. Первым, 6 мая 1992 года, был повторно запущен гидроагрегат № 2. Гидроагрегат № 3 был запущен только 29 августа 1992 года. На лето 1992 года был запланирован капитальный ремонт гидроагрегата № 4, и соответствующие работы были выполнены согласно графику. Гидроагрегат № 1 подвергся очень серьёзным разрушениям и не введён в эксплуатацию до настоящего момента. Его запуск планируется на сентябрь 1993 года.

Компания «Manitoba Hydro» потратила более 2 миллионов долларов на разбор завалов в турбинном зале. В данную сумму не включена потеря дохода в связи с потерянной генерацией, а также расходы, связанные с разрушением гидроагрегата № 1.

ОПИСАНИЕ АВАРИИ

1. ВВОДНАЯ ЧАСТЬ

Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» расположена в устье реки Саскачеван на озере Виннипег. Она оснащена четырьмя гидроагрегатами с турбинами Каплана мощностью 115 мегаватт каждая. Номинальный рабочий напор станции составляет 38 метров. Водоприемник имеет два затвора, аварийно-ремонтный и ремонтный, с гидравлическим приводом, также гидроагрегат имеет стальной напорный водовод и отсасывающую трубу с тремя каналами (рисунок 1).

10 марта 1992 года сотрудники эксплуатационно-технического отдела головного офиса Виннипега находились на станции «Гранд Рэпидс» и готовились к проведению испытаний КПД на гидроагрегате № 3. Установка с контрольно-измерительным оборудованием была установлена на отметке 216 метров недалеко от гидроагрегата, и всё было готово к проведению испытаний. Начало испытаний было запланировано на 20:00 часов, когда гидроагрегат должен был быть доступен с центрального диспетчерского пульта, однако в связи с нагрузкой системы испытания на гидроагрегате не могли быть начаты ранее 22:00 часов. Эксплуатационный персонал завершил работы текущего дня приблизительно в 16:00 часов и покинул станцию. Во время аварии в 20:15 единственными людьми на станции были два сотрудника оперативно-эксплуатационной службы, четыре техника по обслуживанию электроники на генераторном этаже, начальник оперативно-эксплуатационной службы и инженеры из головного офиса. Начальник оперативно-эксплуатационной службы и инженеры из головного офиса находились в верхнем административном крыле инженерного офиса и решали проблемы, возникшие в компьютерной системе.

2. АВАРИЯ

В 20:15 сотрудники оперативной службы (персонал?) станции услышали громкий хлопок и сильный грохот. Гидроагрегат № 1 был отключён системами расщепленной фазовой дифференциальной защиты, дифференциальной защиты трансформатора, защиты при обрыве кабеля затвора и низком уровне масла регулятора частоты вращения. Шум также был слышен начальнику оперативно-эксплуатационной службы и инженерам из головного офиса. Все эти люди сразу же побежали на пульт управления. По пути они заметили голубую дымку и туман в генераторном этаже на отметке 727 футов. Когда они появились на пульте управления из генераторного этажа вернулся техник по обслуживанию электронного оборудования, который рассказал, что из гидроагрегата № 1 льётся мощный поток воды.

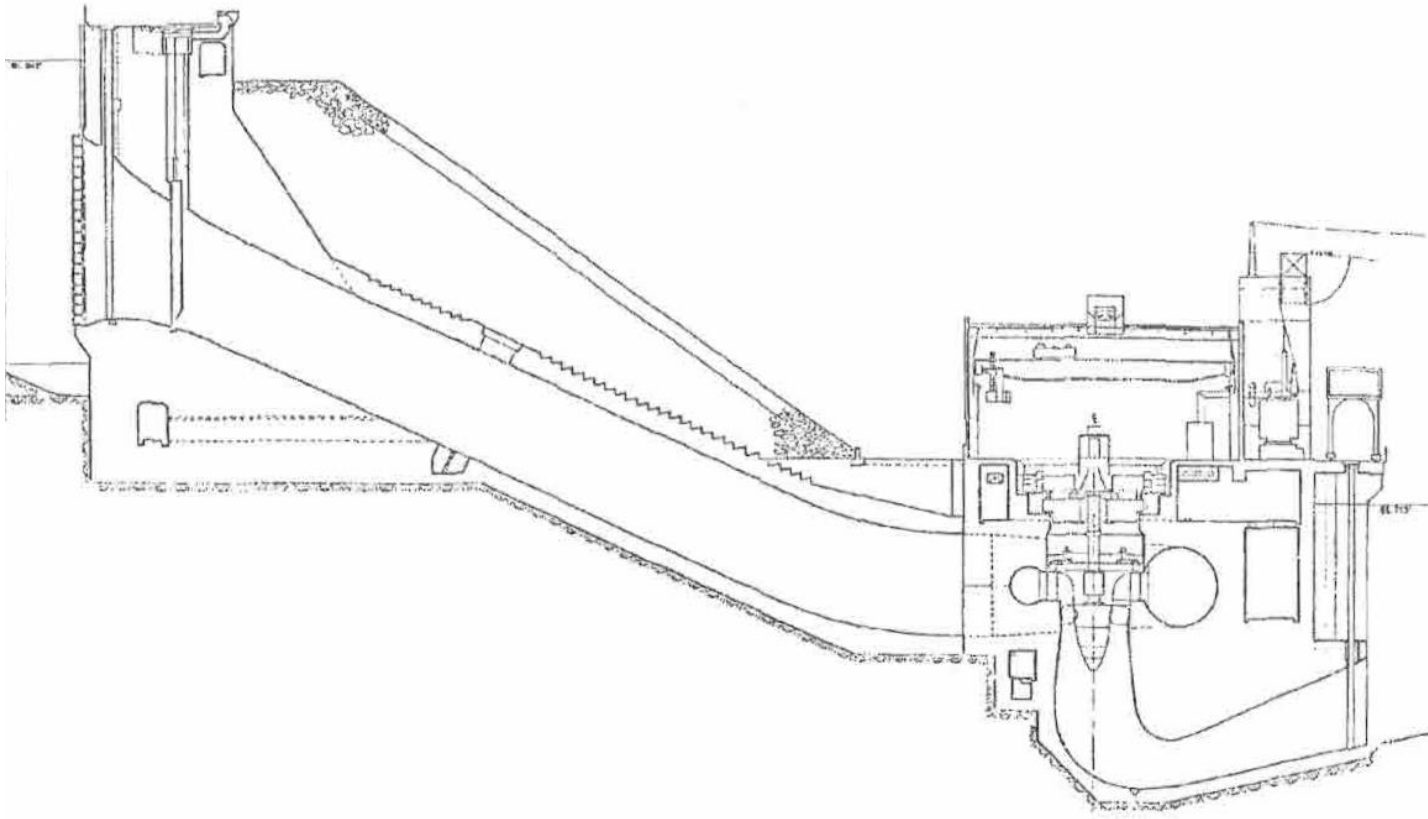


Рисунок 1 Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» – Станция в поперечном сечении

3. АВАРИЙНЫЙ ОСТАНОВ

Начальник оперативно-эксплуатационной службы дал указание немедленно закрыть затворы водоводов с целью отключения гидроагрегатов 2, 3 и 4. Станция оснащена головными затворами с гидравлическим приводом, закрытие которых осуществляется в течение приблизительно одной минуты. Затворы были опущены на порог, и станция была полностью остановлена в течение четырёх минут с момента громкого хлопка.

4. СТЕПЕНЬ ЗАТОПЛЕНИЯ СТАНЦИИ

Вода, поступавшая из отсасывающей трубы гидроагрегата № 1, достигла уровня нижнего бьефа на отметке 217 метров (рисунок 2). Дверь между галереей на уровне 216 метров и механическим цехом была закрыта, поэтому уровень воды в механическом цеху не повысился до такого же уровня, хотя и наблюдалось его медленное повышение (рисунок 3). Станция была полностью затоплена. Собственные нужды станции были потеряны, а освещение в пункте управления обеспечивалось резервной аварийной системой.

5. РЕАКЦИЯ

(а) Первоначальные аварийно-спасательные работы на объекте

После остановки всех гидроагрегатов и спуска затворов на порог для проведения аварийно-спасательных работ на станцию был вызван весь находящийся в городе персонал. Вода в машинном зале не достигла такого же уровня, что и на нижнем бьефе, поэтому вблизи генератора собственных нужд были установлены переносные пожарные насосы таким образом, чтобы уменьшить возможное повреждение данного генератора, самих насосов и прочего вспомогательного оборудования. После установки насосов уровень воды в данной зоне удалось удержать на высоте приблизительно 30 см. над уровнем пола, в отличие от галереи на отметке 216 метров, где уровень воды составлял приблизительно 91 см. над уровнем пола.

Пока продолжались работы внутри помещений, группа рабочих приступила к установке ремонтных затворов нижнего бьефа. К счастью, в течение недели на гидроагрегате № 1 должно было быть проведено профилактическое техобслуживание, а с путей козлового крана был убран снег, и поэтому пазы затворов не были покрыты льдом. Примерно в течение трёх часов два затвора были установлены на место. Если бы гидроагрегат не находился в процессе подготовки к техническому обслуживанию, то установка затворов и аварийно-восстановительные работы могли бы занять один-два дня.

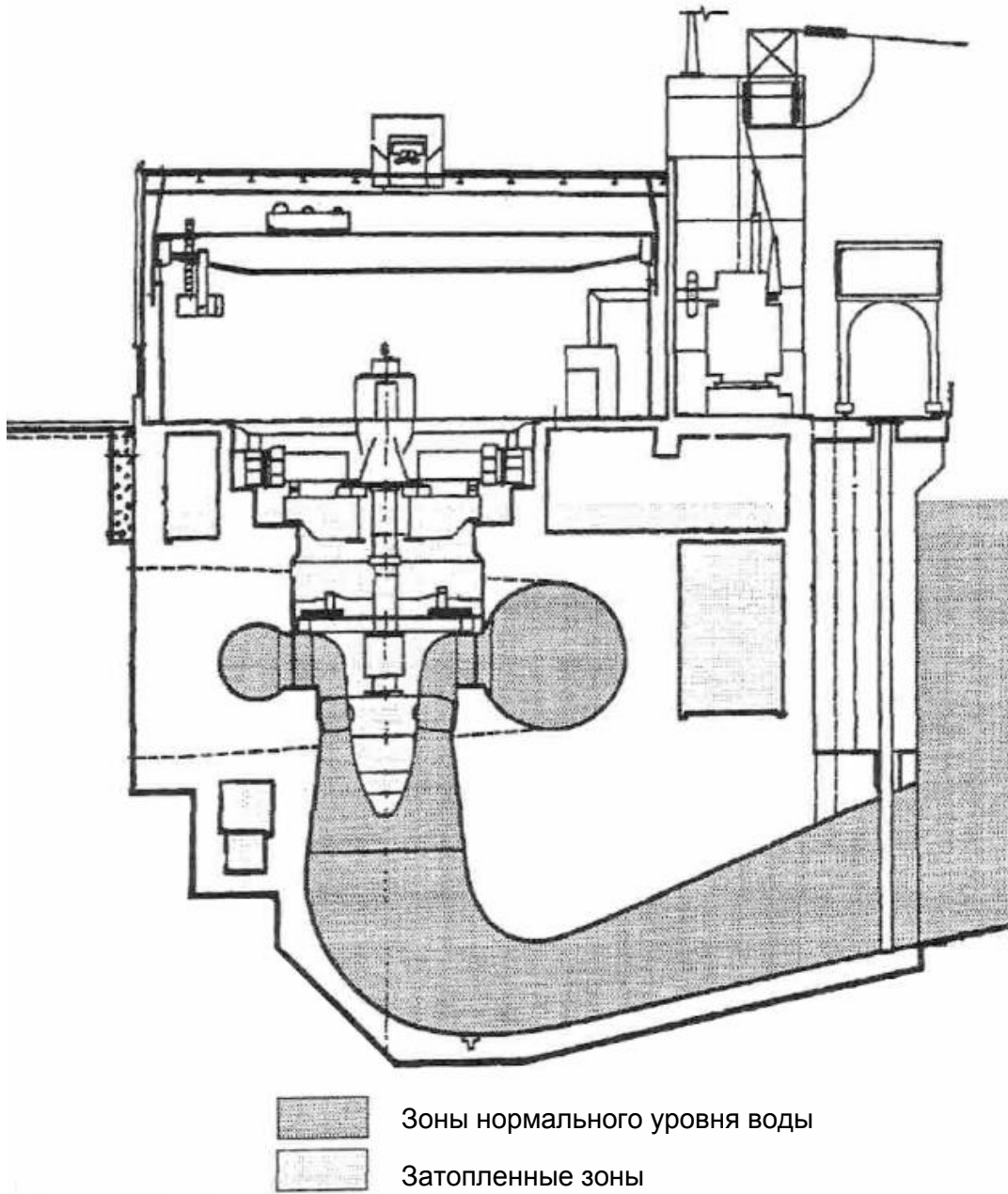


Рисунок 2 Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» – Гидроагрегат в поперечном сечении

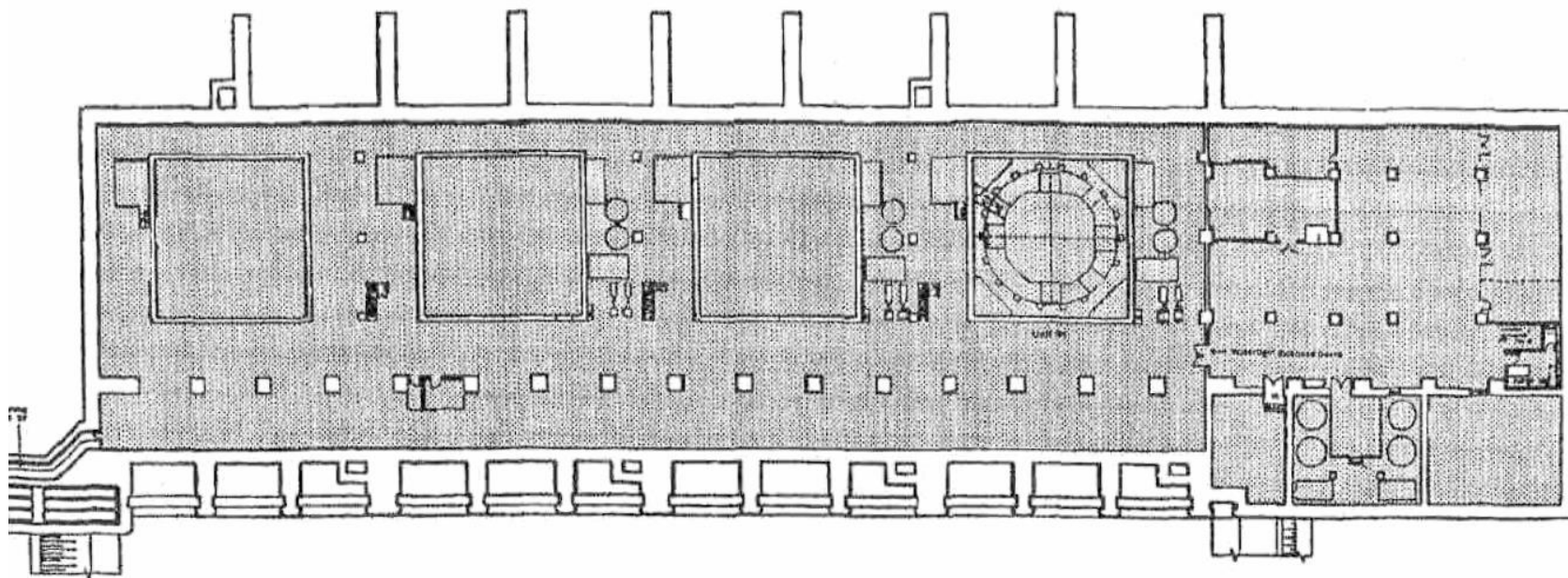


Рисунок 3 Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» – План машинного зала на высоте 216 метров

Органы управления станцией и насосы для откачки воды располагались на отметке 202 метра и были затоплены, однако питание на них подавалось с пульта собственных нужд гидроэлектростанции из генераторного помещения на высоте 221 метра в безопасной зоне. Питание насосов было отключено, а откачка воды осуществлялась на ручном управлении.

(б) Первоначальная реакция в Виннипеге

Пока выполнялись данные работы, руководитель станции связался с директором подразделения и инженером эксплуатационно-технического отдела. Последние немедленно приступили к переговорам с представителями других станций системы с целью сбора материалов и оборудования, которые позволили бы предотвратить дальнейшие разрушения, такие как замерзание турбинного зала или дальнейшее затопление. Также был начат поиск оборудования, которое могло быть использовано при разборе завалов и восстановительных работах.

(в) Оперативная руководящая группа

Ранним утром 11 марта директор подразделения встретился с исполнительным вице-президентом, ответственным за генерацию, и описал ему сложившуюся на «Гранд Рэпидс» ситуацию. Были даны заверения, что для возобновления работы станции будет оказана вся необходимая административная поддержка. Было необходимо создать оперативную руководящую группу, которая оказывала бы необходимую помощь людям, вовлечённым в аварийно-восстановительные работы. В сферу полномочий данной группы входило обеспечение всех необходимых для восстановления ресурсов, расследование причин аварии, выработка мер по предотвращению других аварий, а также оценка расходов по повторному вводу станции в эксплуатацию.

(г) Оперативная группа по оценке ущерба

Также была создана вторая оперативная рабочая группа, ответственная за повторный ввод станции в эксплуатацию в кратчайшие сроки. Результаты работы данной группы сообщались оперативной руководящей группе. Данная группа состояла из членов эксплуатационно-технического отдела, сотрудников ГЭС «Гранд Рэпидс», а также сотрудников других станций, которые могли командировать свой персонал и предоставить необходимое оборудование.

(д) Первые четыре дня

11 марта, приблизительно в 16:00 часов, глава оперативной рабочей группы по оценке ущерба прибыл на ГЭС «Гранд Рэпидс» с тремя специалистами для составления плана восстановления станции. Вечером того же дня состоялось совещание с целью

составления графика полного осмотра турбинного зала и определения объёма требуемых ремонтных работ.

Данный осмотр продолжался до вечера 12 марта, а затем было проведено ещё одно совещание в ходе которого был составлен график выполнения работ по разбору завалов в турбинном зале, восстановления гидроагрегатов № 2, № 3 и № 4, а также уменьшения экологического ущерба.

Для подкрепления были задействованы люди с других станций, которые приступили к работе на «Гранд Рэпидс» уже в ночь после аварии. Постепенно на станцию прибывал новый персонал, и доставлялось новое оборудование. Были начаты работы по очистке разлива масла в нижнем бьефе. К воскресенью 14 марта 1992 года контроль над данными работами осуществлялся до тех пор, пока не была выработана регламентная процедура, и не были реализованы все задачи данного направления работ. В стадии реализации также находились работы по восстановлению ГЭС «Гранд Рэпидс» после серьёзного затопления.

6. ЗАДЕЙСТВОВАННЫЕ СПЕЦИАЛИСТЫ

С целью определения причин аварии и выработки мер, которые могли бы быть предприняты с целью предотвращения подобной ситуации в будущем, была собрана группа специалистов, осуществившая анализ произошедшей аварии. Общий анализ аварии было поручено провести инженерно-консультационной компании с опытом проектирования ГЭС. Были задействованы специалисты-металлурги, в задачу которых входил анализ шпилек крепления крышки турбины с целью определения причин их разрушения. Также были привлечены два сторонних специалиста для ознакомления с отчётом инженерно-консультационной компании и независимой оценки на основе результатов проведённых испытаний. По мере продвижения расследования была создана комиссия штата Манитоба для определения динамических нагрузок на шпильки крепления крышки турбины посредством мониторинга соответствующих значений на некоторых компонентах гидроагрегатов № 2 и № 3 после их повторного запуска. Кроме того, ими был проведён анализ вибраций статорных колонн турбины гидроагрегата № 1.

7. ПОВРЕЖДЕНИЯ

(а) Общие сведения

Турбинный зал был полностью затоплен до уровня горизонта нижнего бьефа, приблизительно 217 метров (рисунок 2). Исключение составлял только машинный зал и вспомогательные помещения, в которых уровень воды удерживался на отметке примерно 216 метров (рисунок 3). Все нижние галереи были полностью затоплены. Достаточно обширная зона хранения на высоте 208 метров со

всеми материалами, а также зона хранения на высоте 216 метров
были полностью затоплены.

Дренажные насосы станции и насосы для откачки воды были расположены в галерее на отметке 202 метра. Дренажные насосы не являлись водонепроницаемыми и, соответственно, вышли из строя в результате затопления. Однако стационарные насосы для откачки воды, как указывалось ранее, являлись насосами погружного типа, и питание на них подавалось из генераторного помещения на высоте 222 метра, выше уровня затопления. Питание было отключено, и осуществлялось ручное управление насосами с пульта собственных нужд станции. Вся вода из машинного зала была откачана к 08:00 11 марта 1993 года.

После удаления воды из турбинного зала появилась возможность детальной оценки разрушений. На всех гидроагрегатах были полностью затоплены турбинные камеры. Все поверхности нижних галерей и галереи на отметке 216 метров до уровня нижнего бьефа были покрыты маслянистой плёнкой. Поскольку вода поступала на станцию после останова гидроагрегатов, масло из МНУ вытекало через распределительные клапаны до тех пор, пока они не были опустошены. В маслоборные баки поступал воздух под высоким давлением, который выдавил большую часть масла.

Компрессорное отделение было затоплено. Трансформатор собственных нужд был частично затоплен. Помещение пожарных насосов и маслоаппаратная были затоплены.

В машинный зал было подано питание с линии высоковольтной передачи. Пульт управления собственными нуждами гидроэлектростанции находился выше уровня затопления.

(б) Гидроагрегат № 1

i) Турбина

Ремонтные затворы нижнего бьефа были установлены в отсасывающей трубе гидроагрегата № 1 вскоре после закрытия затворов водоприемника. Данная процедура заняла приблизительно три часа. После этого была начата работа по откачке воды из турбинного зала и гидроагрегата № 1. Когда появился доступ к гидроагрегату, было обнаружено, что крышка турбины была сорвана и наклонена, она была прислонена к сервомоторам с одной стороны и внутренней частью крышки прижата к валу турбины с другой стороны. Двери шахты гидрогенератора, как и двери турбинной шахты, были сорваны потоком воды. Сервомоторы были полностью разрушены.

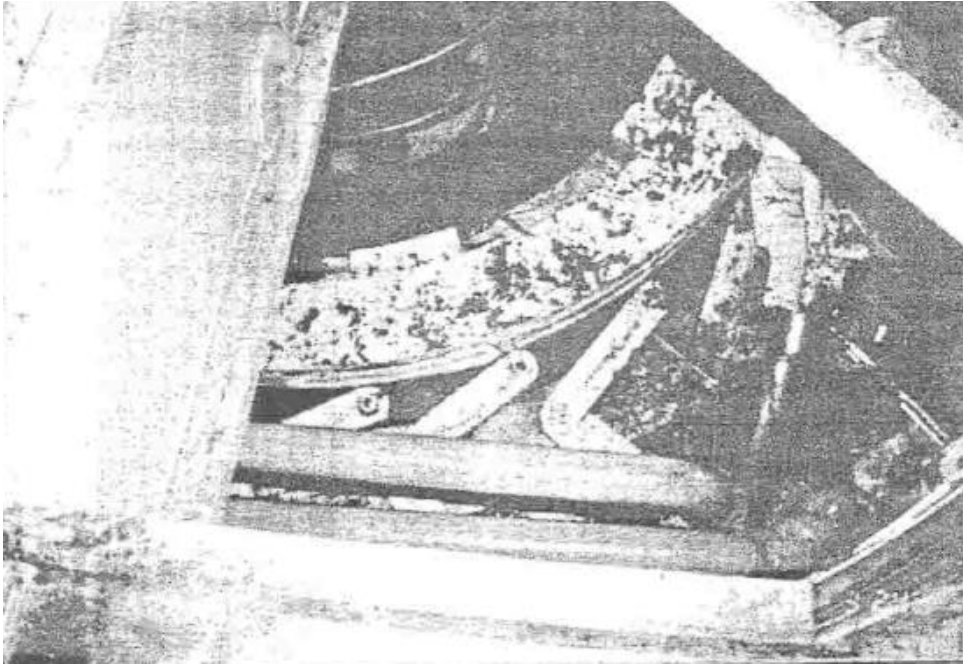


Рисунок 4 Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» –
Крышка турбины гидроагрегата № 1

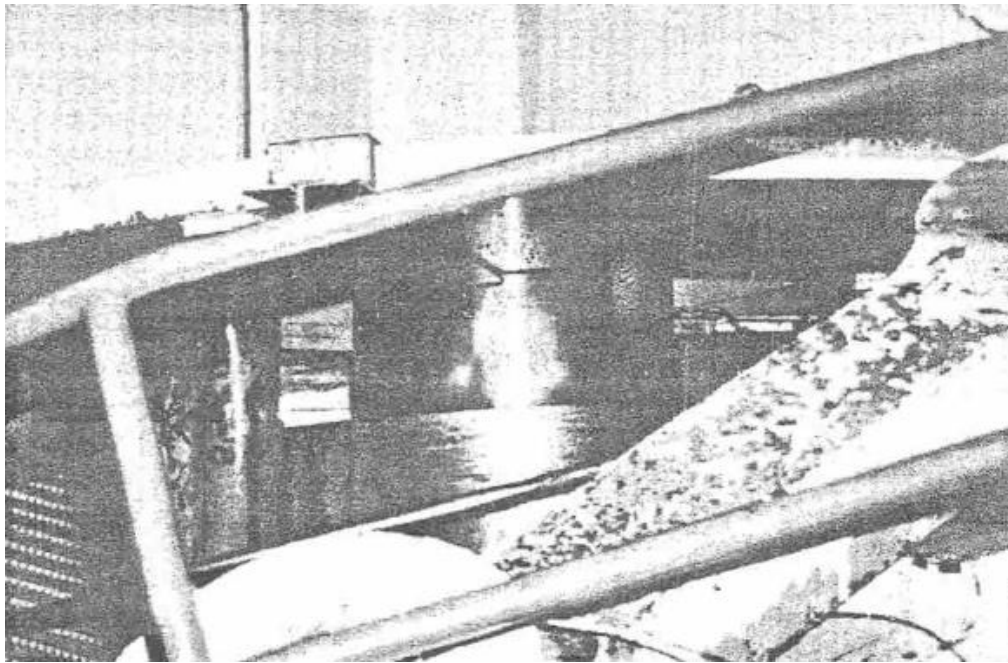


Рисунок 5 Гидроэлектростанция «Гранд Рэпидс» –
Шахта турбины гидроагрегата № 1

Валы сервомоторов были согнуты. Масляные трубопроводы к сервомоторам лопаток направляющего аппарата были разорваны в той части, где произошло их столкновение с нижней крестовиной генератора (рисунок 4). Трубы также были протерты о муфту вала турбины и генератора. Шпильки крышки были разбросаны по всему турбинному залу. Все органы управления в шахте турбины и вокруг генератора были повреждены (рисунок 5).

Что касается самой турбины, то её направляющий подшипник был полностью смещён с места его крепления. Внутренняя часть крышки турбины была полностью разрушена. Внешняя крышка турбины была повреждена. Разрушения промежуточной части крышки турбины были не такими значительными. При исследовании спиральной камеры выяснилось, что несколько лопаток направляющего аппарата были смещены на верхнем кольце и статорном кольце и повреждены в данной области. Несколько лопаток направляющего аппарата было повреждено. Они свисали по окружности крышки. Нижнее кольцо подверглось значительному истиранию. В некоторых местах создавалось впечатление обработки зубилом. Края лопастей рабочего колеса имели значительные повреждения.

На валу турбины вблизи подшипника имелись крупные царапины. Большая часть шпилек была разорвана. Регулировочное кольцо не было повреждено, однако шток между сервомотором и регулировочным кольцом был полностью искорёжен.

ii) Генератор

Нижняя крестовина генератора подверглась удару, а несколько тормозных колодок были разрушены или сдвинуты с гидроагрегата. Лопастни нижнего вентилятора системы охлаждения обмоток генератора, а также противопожарный трубопровод были повреждены. По всей видимости, некоторые компоненты прошли между статором и ротором генератора, хотя следы трения не наблюдались. Стальной решётчатый настил пола шахты генератора был искривлён и разорван, а его обломки были разбросаны по всем нижним галереям.

Все усилия были направлены на восстановление гидроагрегатов 2 и 3, поэтому полная проверка генератора не могла быть проведена сразу после аварии. Данная проверка была выполнена в конце 1992 года. Были выявлены прочие повреждения. При ударе турбинной крышки о нижнюю крестовину сама крестовина была частично сдвинута. Сочленение между подпятником и валом генератора было вскрыто.

Диск подпятника был сильно поврежден. Сегменты подпятника, а также подпружиненные узлы подпятника были повреждены. Упорное кольцо также подверглось повреждению. Сердечник статора был поврежден незначительно, однако обмотка не подлежала восстановлению. На якоре возбуждителя имелись царапины. Система насоса высокого давления была разрушена, и её восстановление не представлялось возможным.

8. АНАЛИЗ АВАРИИ

ВЫВОДЫ МЕТАЛЛУРГОВ

Металлурги провели тщательное исследование шпилек крепления крышки турбины гидроагрегата № 1. По результатам исследования они заключили, что из пяти возможных вариантов разрушения для шпилек был характерен один из данных типов. Шестнадцать шпилек были разрушены задолго до аварии (рисунок 6). В шестьдесят одной шпильке были обнаружены несквозные усталостные трещины (рисунок 7). В двадцати семи шпильках наблюдался быстрый разлом на первых нитках резьбовых отверстий статорного кольца (рисунок 8). Десять шпилек были разломлены под гайкой над турбинной крышкой (рисунок 9). Шесть шпилек были сорваны со статорного кольца вследствие разрушения резьбы (рисунок 10). Большая часть шпилек с усталостными разрушениями металла или трещинами находились в пределах двух четвертей внешней крышки. В основном они находились в областях смежных с секциями, где были приварены опоры для труб между смежными статорными колоннами (рисунок 11).

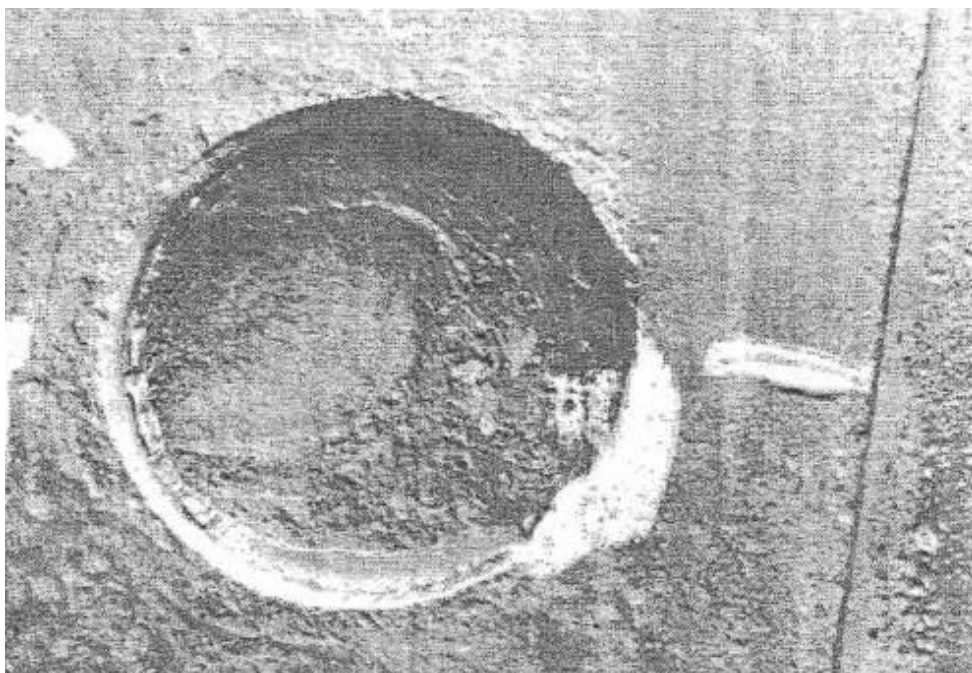


Рисунок 6 – Шпилька, разлом которой произошёл задолго до аварии

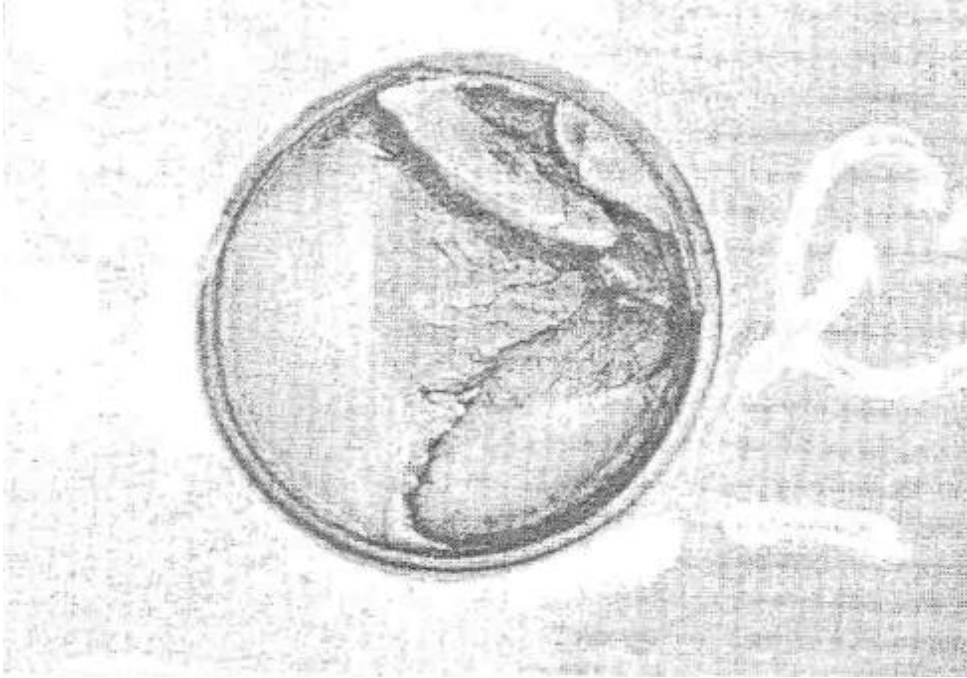


Рисунок 7 – Шпилька с несквозной усталостной трещиной

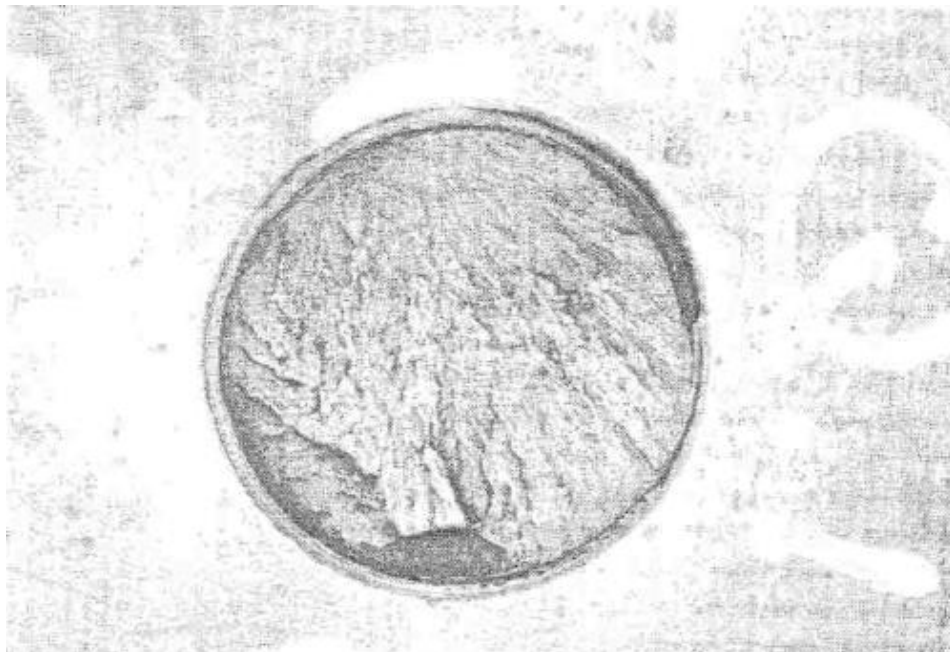


Рисунок 8 – Шпилька, подвергшаяся мгновенному разлому

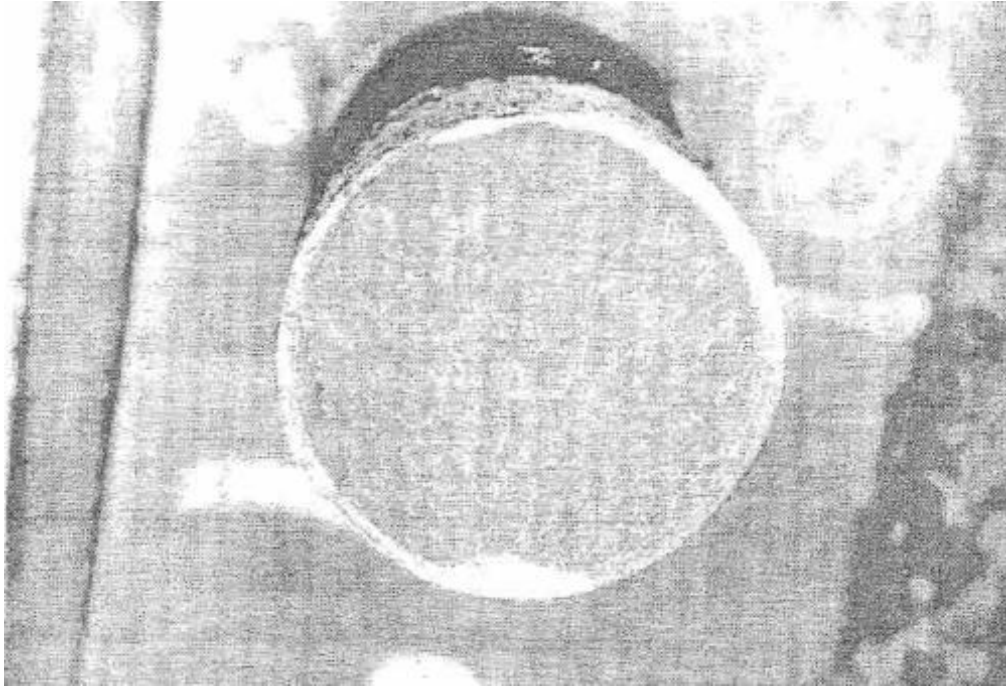


Рисунок 9 – Шпилька с разломом под гайкой над турбинной крышкой



Рисунок 10 – Шпилька, сорванная со статорного кольца вследствие разрушения резьбы

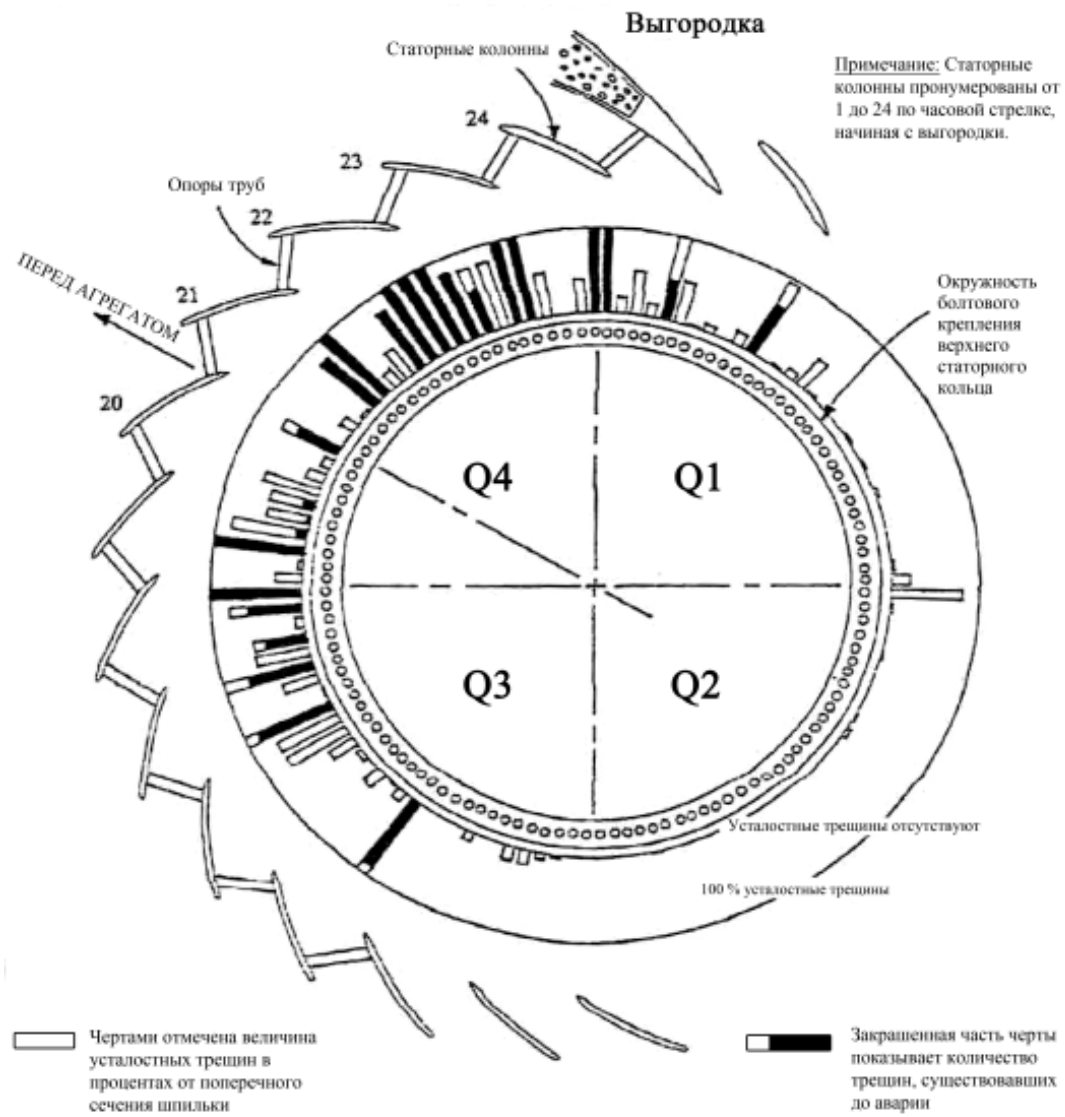


Рисунок 11 Гидроагрегат № 1 – Схематическое изображение местоположения и степени усталостных разрушений и корреляция данных параметров с положением опор труб, приваренных между статорными колоннами.

Металлургический анализ шпилек показал, что шпильки гидроагрегата № 1 не соответствовали требованиям спецификаций. Материал должен был быть подвергнут термообработке 1040 до достижения полной прочности 7031 кг/см² и предела текучести 5273 кг/см². Данным критериям не соответствовала ни одна шпилька. Шпильки на гидроагрегатах № 2 и № 3, которые были также подвергнуты исследованию, не имели усталостных повреждений в той же степени, при этом свойства материала были значительно лучше (рисунок 12).

Металлургам был задан вопрос о том, как долго могли эксплуатироваться гидроагрегаты при различных нагрузках, прежде чем проявились усталостные нарушения подобной степени. По их мнению катастрофы можно было бы избежать при условии соответствия материала требованиям спецификации.

В архивных документах из начального этапа работы гидроагрегата имелись указания на наличие проблем с вибрацией статорных колонн при вводе гидроагрегата в эксплуатацию. Впоследствии статорные колонны были модифицированы и укреплены для устранения данных проблем с вибрацией. Металлурги предположили, что усталостные разрушения были вызваны напряжениями, которые испытывали шпильки крышки в результате данной вибрации.

ВЫВОДЫ КОМИССИИ ШТАТА МАНИТОБА

Комиссия штата Манитоба принимала участие в установке датчиков деформации на некоторых из новых шпилек, используемых на гидроагрегатах № 2 и № 4, с целью измерения деформации на данных шпильках при стандартных условиях эксплуатации, а также в пуске гидроагрегата. Результаты проведенных испытаний показали, что уровень периодически меняющегося напряжения был очень низок и находился вблизи уровня 70 кг/см² для большей части диапазона эксплуатационных условий. Наиболее значительная флуктуация напряжения возникала при пуске и останове гидроагрегатов. При данных условиях периодически меняющееся напряжение составляло приблизительно 351 кг/см². Полное количество циклов пуск-останов, которым подвергались крышки с момента изначального ввода в эксплуатацию, составляло приблизительно 50 000. Это не является очень большим количеством циклов и в сочетании с низкими уровнями напряжения не могло привести к аварии.

ВЫВОДЫ КОНСУЛЬТАНТОВ ПО ИНЖЕНЕРНО-ТЕХНИЧЕСКИМ ВОПРОСАМ

Консультанты по инженерно-техническим вопросам, занимавшиеся расследованием причин аварии, пришли к выводу, что авария не являлась следствием необычных условий эксплуатации. Они, как и металлурги, согласились с версией о дефектных шпильках. Они также пришли к мнению о наличии недостатков, допущенных в ходе установки. Они заключили, что усталостные разрушения шпилек могли произойти в результате колебаний лопаток, что происходило при первом вводе гидроагрегата в эксплуатацию.

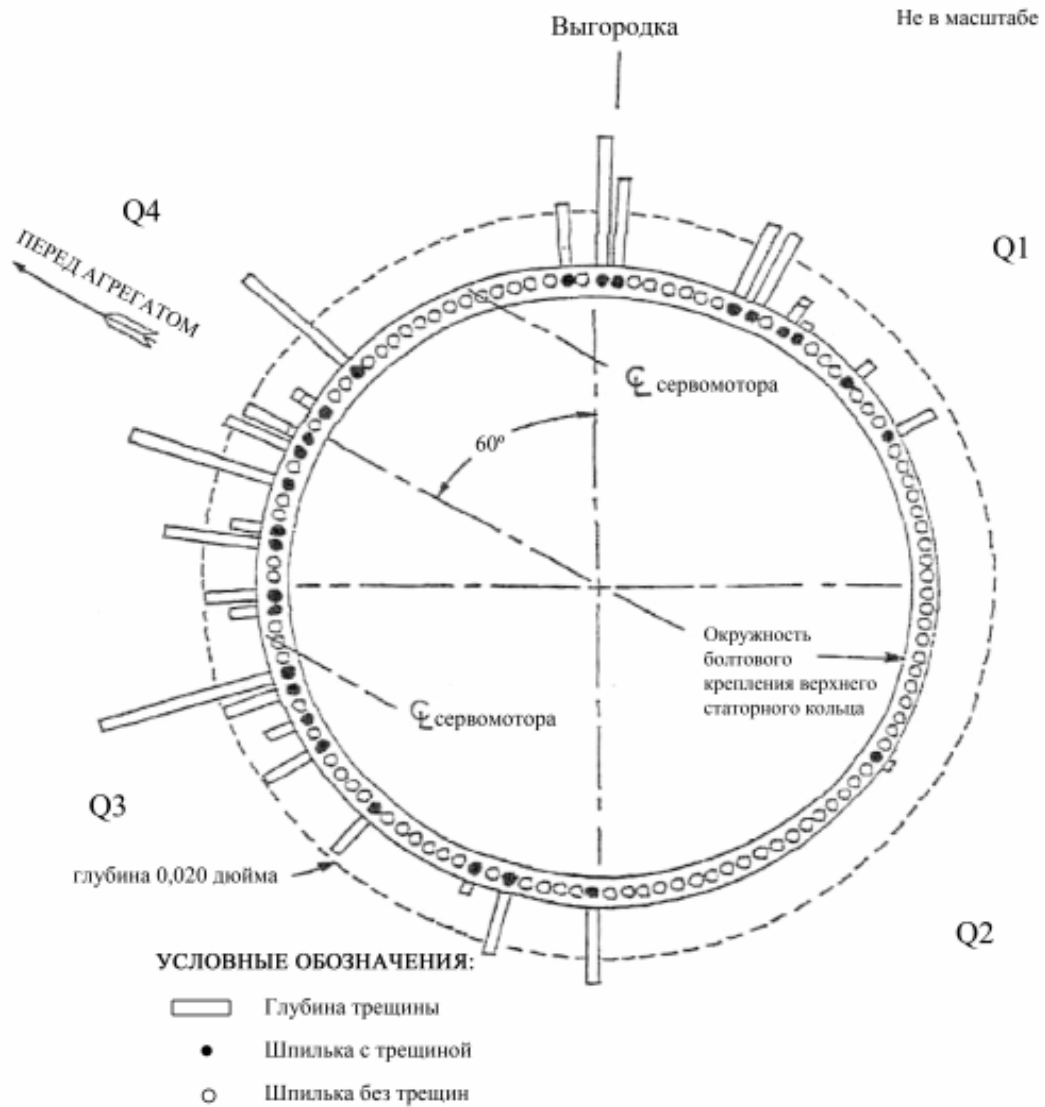


Рисунок 12 – Гистограмма возникновения и глубины растрескивания шпилек внешней крышки гидроагрегата № 2

Данный факт обусловил ослабление всей системы крепления крышки. Впоследствии несквозные трещины росли с невысокой скоростью в ходе нормальной эксплуатации, пока их количество не достигло критического значения 10 мая 1992 года.

9. ПЕРЕСМОТР ПОЛИТИКИ

Окончательная рекомендация металлургов заключалась в том, что шпильки на всех турбинных крышках ГЭС «Гранд Рэпидс» должны быть заменены новыми шпильками, сделанными из материалов со свойствами, соответствующими требованиям спецификации. Данное решение также было принято компанией «Manitoba Hydro» 12 марта 1992 года. Согласно второй рекомендации было необходимо провести проверку шпилек турбинных крышек на всех более старых станциях.

По результатам аварии на гидроагрегате № 1 на ГЭС «Гранд Рэпидс» компания «Manitoba Hydro» внедрила процедуру проверки всех находящихся под напряжением креплений на всех турбинных крышках. Обязательно проводится проверка их плотной затяжки. Не менее одного раза в шесть лет должна осуществляться проверка 10 % шпилек на каждом гидроагрегате. При выявлении дефектов необходимо проверить остальные шпильки данного гидроагрегата. При несоответствующей затяжке более 20 % шпилек или при обнаружении шпилек с трещинами, о данном факте должна быть поставлена в известность служба технического обслуживания, должны быть проверены все остальные шпильки на данном гидроагрегате. Должна применяться адекватная процедура крепления болтами, гарантирующая отсутствие чрезмерного момента затяжки.

ВЫРАЖЕНИЕ БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы хотели бы выразить признательность компании «Manitoba Hydro», с разрешения которой публикуется настоящая работа. Выражаем особую благодарность А. Д. Джерарду, У. У. Теннеси, Дж. Бегину и многим другим, кто давал авторам консультации в ходе написания работы.