

Саяно-Шушенская ГЭС: год прошёл, но точку ставить рано

(Окончание. Начало на стр. 1)

В этих исследованиях принимал участие мой ученик В.Л. Окулов, который впоследствии перешел в Институт теплофизики, но сделал еще несколько работ для СШ ГЭС. И в результате, во-первых, натурных испытаний, во-вторых, некоего теоретического обоснования были введены запреты: на один режим — полный, а на другой — как нежелательный к постоянной эксплуатации. Один из неприятных режимов этой конкретной станции состоит в том, что оборотная частота турбины совпадает с собственной частотой гидроакустических колебаний — на переходных режимах они практически работают в резонанс, и это данность».

Коварство резонанса

Что такое гидростанция с точки зрения сейсмолога? «Представьте гитару, у которой есть несколько струн, и каждая издает свои ноты, — объясняет директор Геофизической службы СО РАН д.г.-м.н. В.С. Селезнёв. — У нее есть колебательная система и резонатор. А что такое гидроагрегат? Это вращающаяся часть, лопатки, лопасти — очень много источников колебаний. Плюс ещё резонаторы — труба водовода с одной стороны и отсасывающая труба с другой. В результате возникают мощные и очень сложные колебания. И для того, чтобы понять, как работает станция, нужно все эти колебания выделить и разложить по источникам».

Что происходит на станции? К вам приходят колебания от какого-то источника, и вы чувствуете, как что-то трясется. Значительно хуже, если собственная частота сооружения совпадает с этой, пришедшей — резонансные колебания могут значительно усилить колебания от источника. И, наконец, если существует какая-то подкачка энергии, то могут возникнуть такие колебания, которые будут очень сильно нарастать по амплитуде. Автоколебания, система гидродинамической неустойчивости (по-разному можно их называть) — ещё сильнее, чем резонанс. Я считаю, что основной причиной, которая привела к аварии, было совпадение одной из высокочастотных гармоник колебаний гидроагрегата с собственной частотой крышки турбины. И тогда уже никакие гайки, которые не рассчитаны на такой режим, не удержат!

Когда мы первый раз приехали на Саяно-Шушенскую ГЭС по поручению полномочного представителя Президента РФ в СФО Анатолия Васильевича Квашнина, там рассматривались самые разные версии происшедшего. Я сказал, что у нас рядом есть сейсмическая станция, которая пишет все колебания, происходящие в округе, и я всегда отличу взрыв от гидроудара и каких-то других процессов. После этого я попал в комиссии Ростехнадзора и Государственной Думы, и мы начали расшифровывать данные, полученные на сейсмостанции. Длительная, полугодовая работа привела к созданию принципиально новой технологии — сейсмической диагностики, позволяющей контролировать поведение такой сложной колебательной системы, как ГЭС. Хотя и сейчас, я думаю, не найдется физика, который бы сумел полностью описать те процессы, которые там происходят».

Причуды кавитации

В потоке жидкости, в отличие от потока газа, возможно возникновение кавитации, т.е. появление большого количества пузырьков или даже протяженных линейных структур. Впервые с кавитацией наука познакомилась ещё в конце XIX, когда новейшие корабли с мощными турбинными двигателями никак не могли набрать проектной скорости. В полной мере это вредоносное явление характерно и для гидротурбин.

«Один из источников низкочастотных возмущений в радиально-осевой гидравлической турбине (турбине Фрэнсиса) — это так называемый вихревой жгут, — рассказывает д.ф.-м.н. П.А. Куйбин (Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН). — Это поток воды, но зачастую в нем есть воздушное или паровое ядро — кавитационный канал — такая полая винтовая трубка, как кабель от телефона. Вращается вихревой жгут с более низкой частотой, чем колесо турбины, и как раз на частичных режимах он очень сильный. Вся мировая гидроэнергетическая наука борется с этим нестационарным явлением. Это одно из самых сложных явлений в гидротурбинах. Физика его до сих пор точно не описана — есть только весьма приближенные модели».

Вихревой жгут образуется именно на пе-

реходных режимах — при частичных и форсированных нагрузках. В ноябре прошлого года я ездил на Бурейскую ГЭС. Станция новая, проектная отметка уровня только-только достигнута. Но ведь и на Саяно-Шушенской, пока не наполнили водохранилище, не могли сказать, как она себя будет вести. Модели, опробованные на заводе, всегда потом должны дополняться натурными испытаниями, которые проводятся сейчас буквально через каждые пять метров наполнения водохранилища. Потом, когда проектный уровень будет достигнут, получится картина, которая называется универсальной характеристикой гидроагрегата. И вот сейчас мы предлагаем проект — на этой универсальной характеристике нарисовать вихревой жгут: где он появляется, какие у него частоты, какие амплитуды он вызывает. Дополнить характеристику каждой конкретной машины — это вполне реально решаемая задача. Естественно, с помощью тех же натурных испытаний».

«Проведению натурных экспериментов (часто не столь уж и безопасных), — замечает А.А. Атавин, — по-хорошему должны предшествовать разносторонние теоретические и лабораторные испытания. А у нас уникальная высоконапорная гидротехническая лаборатория, созданная в своё время Всесоюзным научно-исследовательским институтом им. Б.Е. Веденеева при Красноярской ГЭС, используется совсем не по назначению».

Создать систему мониторинга

Метод сточных волн, позволяющий выделять из сейсмических записей шумов собственные колебания изучаемого объекта, в Геофизической службе СО РАН разработали более 10 лет назад. Сейчас из сейсмической записи, получаемой в непрерывном режиме, можно извлекать информацию о всех работающих рядом агрегатах, излучающих сейсмические колебания, и собственных частот объекта и их изменениях во времени».

«Что теперь надо делать? — размышляет В.С. Селезнёв. — Нужно, во-первых, принять к сведению, что есть система, которая позволяет за этими явлениями наблюдать, и её обязательно надо использовать. Во-вторых, нужно измерить все собственные час-

«Результаты дополнительных испытаний на Саяно-Шушенской ГЭС по определению возможности повышения максимальной мощности турбин показали недопустимость эксплуатации её энергоблока на форсированных нагрузках из-за очень быстрого нарастания пульсаций давления в напорной системе. Одной из возможных причин, объясняющих данное явление, может быть гидроакустический резонанс в трубопроводах напорной системы. Очевидно, что возможность выхода на подобные режимы неустойчивой работы при эксплуатации недопустима».

Арм В.Х., Окулов В.Л., Пылев И.М.

«Неустойчивость напорных систем гидроэнергетики»//ИАН, серия Энергетика, № 3, 1996.

тоты зданий и сооружений, установить и описать частоты, которые излучаются всеми источниками. И издать распоряжение — они не должны совпадать! Ни в каком случае нельзя работать на резонансных режимах!

Вторая задача — изучение режимов автоколебаний. Над этим предстоит ещё работать, работать и работать. Нужно понять, почему и в какой момент система начинает в такой режим входить. Когда и откуда появляются эти мощные акустические волны? И если мы это выясним, то научимся не только избегать аварийных ситуаций, но получать с тех же агрегатов вместо 600 нынешних мегаватт полные 800. Любая станция борется за каждый процент выработки. А здесь можно заработать сразу четверть, но для этого надо научиться измерять, понимать, решать теоретические задачи, которые бы объясняли то, что мы наблюдаем. Когда это будет сделано, появится уверенность, что происшедшее на Саяно-Шушенской ГЭС не повторится. Пока этого не сделано, все разговоры останутся пустыми!»

Предложить модель

На основании накопленных знаний становится возможным составить математическую модель. Пусть она будет приближенной, но должна схватывать все известные явления».

Ещё не так давно, в начале 1990-х годов, при моделировании течений в гидротурбинах использовали простейшие плоские, осесимметричные или квазитрёхмерные приближения. Потребность в описании гидродинамики турбин на новом качественном уровне сделала актуальной проблему создания эффективных методов решения трёх-

мерных уравнений Эйлера и Рейнольдса, позволяющих проводить моделирование пространственных течений несжимаемой жидкости в проточных трактах за приемлемое расчетное время. К работам по созданию таких методов и необходимого для их реализации программного инструментария приступили специалисты Института вычислительных технологий под руководством С.Г. Чёрного и Института математики им. С.Л. Соболева СО РАН под руководством В.А. Скобельова. Сложился неформальный коллектив исследователей, который за короткое время смог решить поставленные задачи. Разработанный ими программный комплекс CUDRAN предназначен для моделирования трёхмерных турбулентных течений жидкости в сложнейших проточных трактах гидротурбин различных типов. Его важнейшая особенность — постоянно расширяющийся спектр моделей течений, а следовательно, возможность применения для решения всё большего числа задач».

Первые версии CUDRAN позволяли моделировать только стационарные течения в оптимальных режимах работы гидротурбины. Затем были созданы высокоточные экономичные численные методы расчёта периодически нестационарных течений. Сейчас с его помощью начали проводить моделирование сложнейших по гидродинамическим явлениям переходных процессов — имитация того, от чего могла возникнуть авария. Решаются совместные задачи прочности турбины и её гидродинамики, моделируются кавитационные течения. В ближайших планах — создание оптимизационного метода проектирования проточных частей гидротурбин, учитывающего динамическое воздействие потока на их элементы».

Нужен федеральный закон

Существует приказ министра энергетики от 2003 года, в котором написано, что на любом крупном энергетическом объекте должно стоять четыре сейсмологические станции плюс сеть инженерно-сейсмометрических станций. Приказ замечательный, но никем не выполняется, потому что приказ министра для частного собственника — не указ».

«Выход из положения очень прост, — убежден В.С. Селезнёв. — Если собственник занимается сложной технической деятельностью, которая может привести к тяжёлым последствиям, должен быть закон, который обяжет его поставить наблюдательную систему, чтобы можно было смотреть, что там происходит. Такую систему мониторинга, в принципе, мы уже сделали. Например, я могу со своего компьютера зайти на свою сейсмостанцию в Черёмушках и посмотреть, в каком режиме сейчас работает Саяно-Шушенская ГЭС. Значит, при соответствующем законе это могут контролировать МЧС или Ростехнадзор. И они могут сказать: «Да, на такой-то ГЭС сегодня превысили допустимый уровень в два раза и за это понесут соответствующее наказание»».

Такая система мониторинга позволяет, во-первых, оперативно решать технические вопросы. Во-вторых, контролировать процесс. И, наконец — это «чёрный ящик», который при желании всегда можно поднять и расшифровать».

«Большинство вибраций на электростанциях неизбежны, они будут всегда, — добавляет В.Б. Курзин. — Поэтому надо настаивать на жёстком законе о периодической проверке сложных технических объектов. Для автомобиля, например, положен обязательный техосмотр каждый год. Если бы этого не делали, авариям было бы больше. Казалось бы, это элементарные вещи, но в гидроэнергетике пока не реализуются».

Человеческий фактор

У меня тоже есть эта картинка. За последние три часа перед катастрофой персонал Саяно-Шушенской ГЭС шесть раз

туда и назад переводил гидроагрегат № 2 через нереконструированный режим. Но нереконструированный — это не запрещённый. И никто ведь не говорил, что этот режим нельзя переходить. Да, при нём повышенная вибрация. Да, это привело к тому, что частоты совпали. Но они за 30 лет много раз совпадали. А тут ещё гайки ослабли...»

«На сложных технических объектах должно быть детально расписано, через какой срок что проверять, — твёрдо убежден В.С. Селезнёв. — Я был на заседаниях комиссий по расследованию аварии на СШ ГЭС. Работники станции говорят: «Где инструкция о том, что я должен смотреть гайки раз в месяц? Где инструкция о том, как их должен смотреть — откручивать, закручивать, динамометром измерять?» А гайки там, между прочим, краном закручивают. Кто виноват? Тот, кто гайки недокрутил? Конечно, нет. Виноваты те, кто не создал систему контроля. А почему её не было? Если бы кто-то предполагал, что эти гайки будут находиться в постоянном вибрационном режиме, они бы эту инструкцию написали. Люди просто не знали, что агрегат будет в таком режиме работать. А если и знали, то не предполагали, что это будет так сильно».

Может ли наука компенсировать человеческий фактор?

Заведения мечта потребителя — иметь некий простой в обращении аналитический прибор, снабжённый соответствующим программным продуктом, который позволял бы быстро измерить ряд ключевых параметров и незамедлительно выдать рекомендации к действию».

«Похоже, необходимый инструментальный специалист уже разработан, — рассказывает А.А. Атавин. — В «Гидроэнергетическом строительстве» № 2 за этот год должна выйти статья В.В. Каякина с соавторами (ОАО «Институт Гидропроект»). Суть её в том, что на основе записи колебаний можно выделить три фазы развития процесса: безопасное развитие, опасное развитие, чрезвычайная ситуация. Третья фаза, и не только на ГЭС — это предтеча аварии. Это означает, что даже не зная деталей, но замерив уровни колебаний аккуратно и чётко, можно сделать вывод, что пора выключать свою машину и предпринимать неотложные меры. Определённые перспективы в этом есть».

И ещё, на таком сложном техническом объекте как ГЭС ключевую роль в управлении его работой должны играть профессионально подготовленные специалисты. А у нас в Сибири теперь нет вузов, где готовили бы гидроэнергетиков. А выпускники европейских учебных заведений вряд ли массово поедут в Сибирь, где планируется основное гидротехническое строительство. Необходимо срочно принимать меры».

Что дальше?

Итак, общая физическая картина происшедшего 17 августа прошлого года на Саяно-Шушенской ГЭС постепенно приобретает ясность, хотя ещё отдельные элементы ещё предстоит выяснить».

«Что, на мой взгляд, надо делать дальше? — подводит итог академик В.М. Фомин. — Конечно, было бы удачно, если бы «РусГидро» заключило соглашение с Сибирским отделением, материализованное в виде финансирования. В его рамках можно было бы подключить соответствующие подразделения Сибирского отделения для работы с очень четким выходом — например, создать математическую модель Саяно-Шушенской ГЭС, которая объясняла бы все показания сейсмостанций. Сразу такая работа напрашивается. Она сложная, но понятная — видно, что должно получиться. Следующее — проведение мониторинга по всем гидростанциям Ангаро-Енисейского каскада. Ведь каждую станцию строили отдельно, со своими проблемами, а как всё это будет работать в сумме, никто не знает. Значит, нужно организовать соответствующий мониторинг. Это не профильное направление для Академии наук, но если государство поставит задачу и будет под неё давать деньги, мы сможем это сделать. Можно привести много примеров, где мы могли бы активно работать. Сейчас ближайшая задача — оформить наши выводы и предложения в виде документа и отправить его высшему начальству. Пусть принимают решения».

Ю. Плотников, «НВС»