

## Угроза избранным

Ю. И. Лобановский

Никто из них еще не знал, что вынужденная остановка у моста, разрезавшая их колонну надвое, в сущности, уже разделила их всех, или почти всех, на живых и мертвых.

К. Симонов

### Краткое содержание

В работе кратко описаны традиционные риски, присущие гидроэнергетике. Показано также, что в последнее время была выявлена новая угроза – возбуждение катастрофических автоколебаний напорных систем гидроэлектростанций. Этот процесс, с общих позиций теории колебаний подобный флаттеру, какое-то время бывшему барьером на пути развития скоростной авиации, привел к нескольким инцидентам на ГЭС и ГАЭС, в том числе и к катастрофе 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС. Несмотря на то, что события такого рода происходили на этой станции уже трижды, менеджмент компании РусГидро, владельца станции, оказался не только неспособен разобраться в произошедшем, но и занялся сокрытием и фальсификацией фактов, связанных с новым проявлением этого разрушительного процесса.

*Ключевые слова: инцидент – катастрофа – Саяно-Шушенская ГЭС – гидроагрегат – турбина – автоколебания – гидроакустический резонанс – индекс устойчивости*

### I. Традиционные риски и новые вызовы

В отличие от других основных способов промышленного получения электричества, в гидроэнергетике используются потоки энергии, создаваемые и концентрируемые самой природой в виде потоков воды, движущейся по руслам рек. На реках, не полностью зарегулированных каскадами гидроэлектростанций, эти потоки временами выходят из под контроля человека, приводя к переливам через плотины и даже к их разрушению. Но иногда и полная зарегулированность не спасает. Самая грандиозная катастрофа такого рода, произошедшая в августе 1975 года в Китае, – это прорыв сравнительно невысокой (24.5 м) плотины Баньцяо, а затем последовательное уничтожение потоком воды еще 62 расположенных ниже плотин гидроэлектростанций и дамб. По данным департамента гидрологии провинции Хэнань, всего в результате этого наводнения погибло 26 тысяч человек, еще 145 тысяч погибло сразу после катастрофы из-за голода и эпидемий [1]. Переливы плотин случались и в более поздние времена и в гораздо более засушливых местах, чем субтропический Китай. Например, в мае 1990 года после разрушения машинного зала произошел перелив самой высокой (180 м) плотины Австралии Дартмут [2].

Другая потенциальная опасность – это сами плотины из-за того, что они являются очень большими, а иногда и грандиозными сооружениями. Не слишком просто рассчитать их на прочность, чтобы уберечь от разрушения, а также учесть их взаимодействие с земными породами, на которые они опираются. Иногда сюрпризы преподносят и сами эти породы – случается, что фильтрация воды через них оказывается сильнее, и они размываются гораздо легче, чем предполагалось проектировщиками. Катастрофы такого рода случались ранее – к самым известным можно отнести разрушения плотин Сент-Френсис, Мальпасе, Тетон (см. рис. 1 из источника [3]).

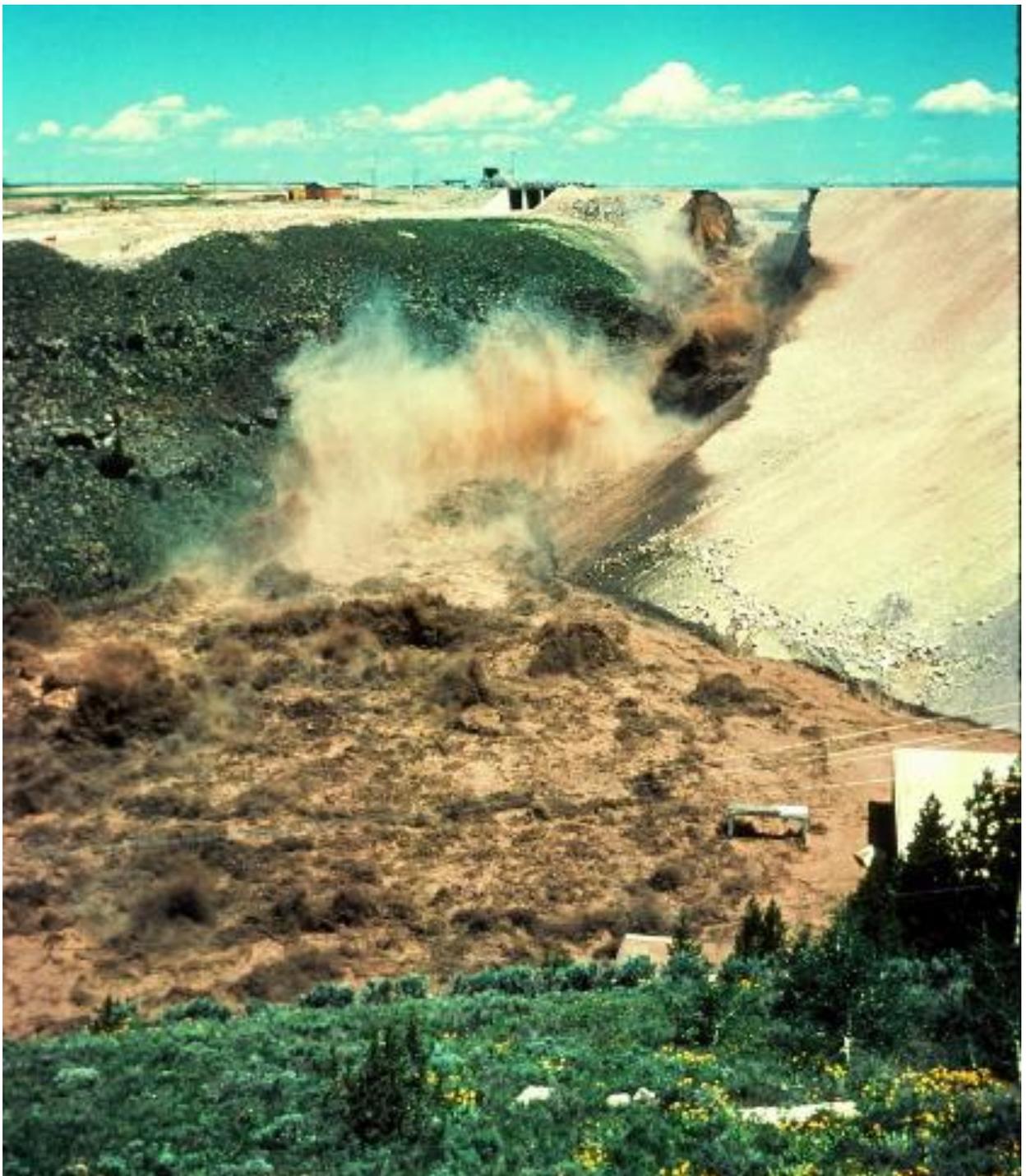


Рис. 1

Казалось бы, что по мере развития науки, технологий и опыта, такие события должны были бы остаться в прошлом, однако даже в XXI веке сильные повреждения водоводов и плотины Кампос Новос высотой 202 м с самопроизвольным спуском водохранилища не стало катастрофой только из-за маловодности в Бразилии зимы 2006 года [4]. Серьезной проверкой знаний и опыта подобного типа у отечественных гидростроителей станет строительство одной из самых высоких плотин в мире – Рогунской ГЭС на тектоническом разломе, заполненном каменной солью.

Еще одной опасностью для плотин являются землетрясения, в том числе и инициированные их водохранилищами. Насколько известно, катастроф, связанных с разрушением крупных плотин землетрясениями, не зафиксировано. Однако, считается, что крупное землетрясение магнитудой 6.5, которое привело к гибели более 180 человек в Индии в декабре 1967 года, было вызвано заполнением водохранилища, только что образовавшегося за плотиной Койна высотой более 100 м [5].

Наряду с этими, традиционными рисками, катастрофа, произошедшая 17 августа 2009 года на Саяно-Шушенской ГЭС, впервые в полной мере высветила опасность, связанную с неустойчивостью рабочего процесса гидроагрегатов. Не то чтобы это был первый в истории случай – частичные и полные разрушения гидроагрегатов по этой причине, а в смягченной версии – невозможность их работы на проектных режимах из-за недопустимой вибрации, неоднократно, начиная с последней четверти XX века, происходили и ранее, в том числе и на самой Саяно-Шушенской ГЭС. Более того, за 2.5 года до Саянской катастрофы ее генеральная репетиция с отрывом турбинной крышки и вылетом гидроагрегата из турбинного колодца произошла в Таджикистане на сравнительно небольшой деривационной гидроэлектростанции Памир-1. Однако, косность отраслевой науки и повсеместное стремление менеджмента скрывать информацию о неприятных инцидентах не позволили связать их вместе и ясно разглядеть новую опасность вплоть до Саянской катастрофы с 75 погибшими.

В какое-то время сразу после катастрофы информационная ситуация улучшилась, начались попытки разобраться в произошедшем. Однако, по мере того как первый шок прошел, и никто из топ-менеджмента и разработчиков ни за что не ответил, даже морально, все вернулось на круги своя. Инцидент со вторым агрегатом Саяно-Шушенской ГЭС снова трактуется как случайность, вызванная небрежностью персонала станции, и сводится по существу к анекдоту, который только и способны воспринять большая часть представителей отраслевой науки, менеджмента компании РусГидро и следственных органов. Более того, происходит замалчивание аварии шестого агрегата Саяно-Шушенской ГЭС, произошедшей уже после катастрофы по той же самой причине.

## **II. Новая угроза – автоколебания напорных систем**

Среди всего многообразия механических колебаний, которые могут возникать в разных природных и технических объектах, особое значение для их целостности имеют автоколебания, которые сами себя усиливают за счет подкачки энергии из окружающей среды. Автоколебания всегда являются колебаниями нелинейными. Для их возникновения в колебательной системе должен существовать нелинейный элемент положительной обратной связи. Он так организует связь колебательной системы с окружающей средой, что чем больше амплитуда этих колебаний, тем большая энергия перекачивается в систему из окружающей среды.

Автоколебания возникают как в твердых телах, так и в жидкостях и в газах. Видимо, самым известным процессом такого рода оказался флаттер крыла или оперения самолета, представляющий собой автоколебания этих несущих поверхностей вместе с потоком обтекающего их воздуха. Из-за флаттера когда-то погибло не менее 250 самолетов [6]. На какое-то время, пока эта проблема не была решена, флаттер стал барьером на пути развития скоростной авиации. Однако времена были не те, что ныне, и этот барьер тогда был быстро взят.

Другая разновидность флаттера приводит к опасным колебаниям плохо обтекаемых объектов: проводов, кабелей, вант, пролетов мостов. Несмотря на относительно малую плотность воздуха, а, значит, и достаточно малые силовые воздействия, возникающие при обдуве конструкций ветром, известны случаи разрушения крупных сооружений из-за флаттера. На рис. 2 показан момент разрушения Такомского моста вследствие возникновения флаттера при обдуве этой конструкции ветром со скоростью всего около 17 – 19 м/с [7, 8]. Тогда, в ноябре 1940 года, это был третий по длине центрального пролета мост в мире – его длина составляла 854 м, а над водой дорожное полотно поднималось на 65 м.



Рис. 2

Для сравнения, скорость воды на выходе из направляющего аппарата гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС в 2 с лишним раза выше, а ее плотность больше плотности воздуха в 800 раз. Поэтому, силовое воздействие потока воды там может быть в 3000 – 4000 раз больше, чем воздействие ветра, показанное на рис. 2 (при расчете сил скорость должна учитываться в квадрате). И это является минимальной оценкой возможных различий сил, которые могут действовать в сравниваемых ситуациях. Осознание этого простого факта, а также внимательное созерцание фотографии разрушения грандиозного Такомского моста может излечить любого вменяемого человека от недооценки опасности автоколебаний в напорных системах гидроэлектростанций, если они там проявятся.

То, что там возникают колебания потока воды – это является очевидностью для любого гидроэнергетика. То, что при определенной ситуации эти колебания превращаются в автоколебания, способные быстро усиливаться и разрушать все вокруг, доказано в работах [9 – 11]. Узнать, при каких условиях это происходит, можно в целой серии статей, посвященных как Саянской катастрофе, так и другим инцидентам с сильными вибрациями, приводящими либо к постепенному разрушению гидроагрегатов, либо, к отрывам турбинных крышек и вылетам гидроагрегатов из турбинных колодцев (см. [10, 11], а также указанные здесь ниже ссылки на работы того же автора).

Вкратце запуск этого процесса можно описать так: необходимо, чтобы частота периодического возмущающего воздействия была бы близка к собственной частоте колебаний, то есть той частоте, при которой происходят колебания системы, предоставленной самой себе. Близость этих частот принято называть резонансом. Возможен и случай, когда возмущающая частота кратна собственной. Этого тоже бывает достаточно для возбуждения автоколебаний. А положительная обратная связь, необходимая для их существования, в напорных системах на некоторых режимах работы имеется всегда. В качестве возмущающего воздействия в системах с радиально-осевыми турбинами выступает прецессия вихря (вращение его оси вращения), возникающего за турбиной на режимах, отличных от оптимального. В принципе в качестве пускового механизма автоколебаний возможны и любые другие достаточно сильные периодические возмущения.

### III. Саянская катастрофа – не первый, и не последний инцидент в гидроэнергетике, вызванный автоколебаниями

Возбуждение автоколебаний в напорной системе второго гидроагрегата Саяно-Шушенской ГЭС 17 августа 2009 года – самый известный инцидент подобного рода (то, что случилось тогда с машинным залом станции можно видеть на рис. 3 [12]), однако он был далеко не первым, и, к сожалению, не последним.



Рис. 3

Здесь не место и не время снова доказывать, что построенная автором данной работы теория бустинга – последовательного возбуждения автоколебаний сначала в области не рекомендованной работы гидроагрегата СШ ГЭС, а затем, заброс его в область запрещенной работы, объясняет все явления, которые наблюдались при этой катастрофе. Достаточно лишь сказать, что применение теории гидроакустического возбуждения автоколебаний и целенаправленный сбор информации о различных странных и малопонятных инцидентах с отрывами турбинных крышек гидроагрегатов, а также с возникновением очень сильных вибраций, не позволяющих обеспечить нормальную работу этих агрегатов, дали возможность найти еще 5 гидро- и гидроаккумулирующих станций, в водоводах которых либо возбуждались автоколебания, либо происходило балансирование на самой границе этого грозного явления. Кроме того, на самой Саяно-Шушенской ГЭС произошло еще 2 не столь катастрофических случая возбуждения автоколебаний. Следует еще раз подчеркнуть, что только совместное рассмотрение всех этих инцидентов и позволило разобраться в происходящем.

Первым среди них было событие, произошедшее вечером 9 июля 1983 года на Нурекской ГЭС, на реке Вахш в Таджикистане. Нурекская гидроэлектростанция, также как и Саяно-Шушенская ГЭС, является высоконапорной станцией с радиально-осевыми турбинами. Высота плотины флагмана таджикской гидроэнергетики на 55 м больше, чем у СШ ГЭС (300 м против 245 м), соответственно больше и рабочие напоры (номинальные – 223 м и 194 м соответственно). Однако в момент инцидента из-за маловодности реки тем летом, напор, при котором произошла авария на первом гидроагрегате Нурекской ГЭС, был всего 203 м, что на 9 м меньше, чем на СШ ГЭС в момент катастрофы. Более того, он был на 4 м меньше, чем минимально допустимый проектный напор, составляющий 207 м. Авария произошла при запуске первого гидроагрегата в той же области не рекомендованной работы. В отличие от того, что случилось на Саянах 26 лет спустя, оборвалось только 50 крепежных шпилек из 72, турбинная крышка первого агрегата оторвалась не полностью и зависла в полуоторванном положении. Через 6 минут агрегат был отключен (был закрыт

шаровой затвор, расположенный перед турбиной), еще через 4 минуты агрегат был остановлен, а через 38 минут для предотвращения затопления машинного зала были опущены и затворы нижнего бьефа, что, в конечном счете, ограничило последствия аварии [10].

Расчеты собственной частоты колебаний напорной системы и частоты прецессии затурбинного вихря (вихревой частоты) показывают, что устойчивость системы была мала, что и привело к возбуждению в ней автоколебаний. Следует также отметить, что максимальный расчетный напор на Нурекской ГЭС составляет 275 м, однако, ее работа возможна только при напорах, не превышающих 260 м [13]. Из расчетов следует, что так происходит из-за приближения режимов работы агрегатов к границе устойчивости при иной комбинации частот.

Другой случай, но уже с полным отрывом турбинной крышки и вылетом гидроагрегата из турбинного колодца снова произошел в Таджикистане 5 февраля 2007 года на сравнительно небольшой деривационной гидроэлектростанции Памир-1. Зима 2006 – 2007 годов была самой холодной на Памире за последние 15 лет. В январе 2007 года на поверхности водохранилища ГЭС Памир-1, строительство которой завершилось в 2005 году, образовался слой льда, что сократило расход воды, поступающей в деривационный туннель. Из-за этого мог работать только один гидроагрегат из четырех. Было решено подорвать лед, что и сделали 21 января 2007 года. Поток воды к гидроагрегатам был восстановлен, и в течение 15 дней 3 из них работали без каких-либо проблем (третий по номеру гидроагрегат был в ремонте). Однако 5 февраля 2007 года в результате резкого повышения давления воды в водоводе были сорваны крепежные болты турбинной крышки второго гидроагрегата, и она вместе с его центральной частью была выброшена в машинный зал. Поток воды из открытого турбинного колодца зал был полностью затоплен, как и 2.5 года спустя на Саяно-Шушенской ГЭС. На станции в момент аварии было двое дежурных, которые успели эвакуироваться. Срочно была созвана аварийная комиссия, приступившая к работе на месте аварии уже на следующий день и завершившая свою работу подписанием акта уже через 9 дней после инцидента [14].

По заключению аварийной комиссии инцидент произошел из-за обратного гидравлического удара вследствие запираания водозабора намерзшей шугой. Из всех возможных для комиссии вариантов объяснений этот был наилучшим. Однако подробное интервьюирование одного из членов этой комиссии – С. Абдуллоева 3 года спустя позволило выдвинуть иную версию развития событий, в которой, в отличие от официальной, не возникает никаких неразрешимых противоречий при количественных оценках произошедшего. Из расчетов собственных частот напорной системы и оценок вихревых частот и величины индексов гидроакустической устойчивости следует близость сценариев развития событий на ГЭС Памир-1 и СШ ГЭС [14]. В обоих случаях процесс начался в области не рекомендованной работы, но на Памире, как можно заключить из рассмотрения всего хода предшествующих событий, агрегат попал туда не при остановке, а вследствие сокращения расхода воды из-за тяжелых условий зимы вообще, а также из-за медленно прогрессирующего намерзания шуги на решетке водозабора.

Из сравнения собственной частоты и частоты вихревого возмущения следует, что для возбуждения автоколебаний на Памир-1 более ничего и не потребовалось. Как и 2.5 года спустя на СШ ГЭС, здесь произошел бустинг – первый автоколебательный процесс в области не рекомендованной работы запустил второй, более мощный, уже в зоне повышенной мощности. Если бы происшествие на Памире не замалчивалось, и с самого начала о нем имела бы достаточно полная и адекватная информация, то, по крайней мере, удивления среди специалистов сразу же после Саянской катастрофы 17 августа 2009 года могло бы быть значительно меньше.

Еще 2 случая, которые были интерпретированы как приближение состояния напорной системы к границе возбуждения автоколебаний, были обнаружены на гидроаккумулирующих станциях (ГАЭС) Далечице (Чехия) и Жарновец (Польша) [15]. На ГАЭС в течение суток рабочие напоры изменяются от минимального до максимального, а в их напорных системах автоколебания могут возбуждаться и на турбинном и на насосном режимах (в последнем случае это явление принято называть помпажом).

Гидроаккумулирующие станции Далечице и Жарновец начали свою работу в конце 70-х – начале 80-х годов, и сразу выяснилось, что ни та, ни другая ГАЭС не могут работать во всем проектном диапазоне напоров. С ростом напора на их гидроагрегатах росли и так очень сильные вибрации, что заставляло сотрудников этих станций преждевременно прекращать работу агрегатов в насосном режиме, значительно снижая по сравнению с проектными те запасы энергии, которые можно было бы израсходовать при работе станций в турбинном режиме. Однако, контроль уровней вибрации и ограничение напоров позволили восточноевропейским гидроэнергетикам избежать аварий.

Только спустя 2 десятка лет, после замены агрегатов на новые, удалось серьезно улучшить положение. При этом на ГАЭС Далечице на новом агрегате была изменена частота вращения, так что собственная частота и частота прецессии вихря отделились друг от друга, и какие-либо проблемы с вибрациями агрегата

просто перестали существовать. На новых агрегатах ГАЭС Жарновец был увеличен коэффициент полезного действия, а частота их вращения и, соответственно, вихревая частота остались прежними. При этом, в согласии с теорией, немного изменилась собственная частота колебаний напорной системы этой станции, что несколько ослабило резонанс. Это позволило поднять максимальный рабочий напор на ГАЭС Жарновец, но до проектного уровня, в отличие от Далечице, добраться так и не удалось [15].

В последнее время автору стала доступна полноценная информация об инциденте на канадской средненапорной гидроэлектростанции Гранд Рэпидс, оснащенной поворотными лопастными турбинами. Там вечером 10 марта 1992 года при напоре 38 м произошел отрыв турбинной крышки первого гидроагрегата, и машинный зал был заполнен водой до уровня нижнего бьефа [16]. Применение теории гидроакустического возбуждения автоколебаний для оценки гидроакустических характеристик напорного контура этой станции по методу, разработанному для высоконапорных станций с радиально-осевыми турбинами, дало вполне адекватные результаты – индекс устойчивости оказался ниже критического уровня, что предполагает возможность возбуждения автоколебаний. В отличие от радиально-осевых агрегатов источником возмущений здесь оказались пульсации потока с лопастной частотой.

Таким образом, этот инцидент показывает, что сферу действия теории гидроакустического возбуждения автоколебаний напорных систем вполне можно расширить и на другие типы гидроэлектростанций, отличные от высоконапорных станций с радиально-осевыми турбинами. Только для каждого типа станций нужно искать наиболее мощные источники периодических возмущений, характерные именно для них.

Следует отметить, что во всех четырех известных случаях возбуждения автоколебаний катастрофического характера, инциденты происходили только после того, как на потенциальную неустойчивость напорных систем, характеризуемую гидроакустическим индексом устойчивости, накладывались дополнительные факторы, воздействие которых и становилось «спусковым крючком» катастрофических процессов. На Нурекской ГЭС таким фактором оказалось включение первого гидроагрегата при напоре ниже, чем минимальный проектный. На ГЭС Памир-1 спусковым крючком бустинга стала достаточно длительная работа второго агрегата, видимо самого неустойчивого из трех действовавших на момент инцидента, в той зоне повышенных вибраций, которая не зря называется областью не рекомендованной работы. Самый же нетривиальный случай произошел на Саяно-Шушенской ГЭС, когда, как следует из проведенного рассмотрения, вихревые возмущения наложились на колебания лопаток направляющего аппарата новой и исключительно неудачной системы управления этими лопатками, что и привело в итоге к запуску катастрофического процесса бустинга. На станции Гранд Рэпидс аварийный агрегат, по крайней мере, при пусконаладочных работах отличался повышенным уровнем вибраций. Кроме того, считается, что шпильки его турбинной крышки не соответствовали установленным нормам [16], хотя запас прочности у них должен был быть почти двадцатикратным, и, поэтому, малые отклонения их прочностных характеристик при отсутствии очень мощного внешнего фактора не могли бы иметь никакого значения. В то же время, аварий на ГАЭС Далечице и Жарновец не произошло, несмотря на то, что потенциально такая возможность существовала для них около двух десятков лет. Отсюда можно полагать, что постоянный контроль вибрации агрегатов и четкое следование правильным инструкциям по их эксплуатации, по крайней мере, в некоторых случаях может предотвратить наихудший сценарий развития событий.

#### **IV. Саяно-Шушенская ГЭС – иные инциденты**

Катастрофа 17 августа 2009 года была на Саяно-Шушенской ГЭС не первым случаем возбуждения автоколебаний в напорной системе. Сразу после заполнения водохранилища, летом 1988 года десятый агрегат станции был выведен на повышенную мощность. И тут же в напорном водоводе начались интенсивные пульсации давления, рост которых с большим трудом удалось остановить после сброса мощности [17]. Тогда до полного разрушения агрегата дело все же не дошло, но возникшие в его корпусе в процессе этого эксперимента трещины привели к тому, что с тех пор он эксплуатировался редко и только при минимальной мощности.

Но катастрофа была и не последним случаем такого рода на этой станции. Спустя примерно полтора года после того как описанные здесь идеи были впервые сформулированы и вскоре были доложены на специальном совещании в компании РусГидро, они получили новое подтверждение. Шестой гидроагрегат Саяно-Шушенской ГЭС, имевший то же исполнение системы управления приводом лопаток направляющего аппарата, что и второй, осенью 2011 года был остановлен и выведен в капитальный ремонт или по другой формулировке – «в реконструкцию» [18]. Таких гидроагрегатов на 17 августа 2009 года имелось всего 3, причем именно шестой агрегат тогда еще не был введен в эксплуатацию и потому получил наименьшие повреждения [19]. Вследствие этого после катастрофы он был первым отремонтирован и введен в строй в конце февраля 2010 года, а в июле 2014 года он, по первоначальному плану, должен был бы быть заменен на новый [20]. Тем не менее, через 1.5 года после начала его повторной эксплуатации и минимум за 1.5 года

до ее окончания срочно потребовалась его «реконструкция», то есть банальная замена на вновь произведенный агрегат.

При этом пресс-служба компании РусГидро с начала октября 2011 года почти 3 месяца упорно извещала читателей ее релизов о том, что шестой гидроагрегат «в рамках подготовки к осенне-зимнему периоду эксплуатации выведен в плановый профилактический ремонт» (см., например, [21]). Было довольно забавно читать эти сообщения параллельно с протоколами Межведомственной рабочей группы по регулированию режимов работы водохранилищ Ангаро-Енисейского каскада, в которых вначале говорилось о неплановом ремонте, затем о ремонте по неотложной заявке, и, наконец, в конце ноября, о капитальном ремонте шестого гидроагрегата СШ ГЭС [22]. После небольшой дискуссии на эту тему с представителями пресс-службы РусГидро открытый доступ к этим протоколам был закрыт. Видимо, лучшего способа прикрыть свою ложь они не нашли. И это произошло всего через 2.5 года после того, как за раскрытие этой тайны 75 человек заплатили своими жизнями!

Шестой гидроагрегат были вынуждены остановить из-за протечек воды через трещины в опорном фланце крепления турбинной крышки. Известно, что 15 марта 2010 проводились испытания с увеличением времени его пребывания в области не рекомендованной работы. При этом были зафиксированы колебания электрической мощности, которые доходили до 60 МВт [23]. Все было очень похоже на то, что наблюдалось на испытаниях летом 1988 года, когда, по существу, был выведен из строя десятый агрегат. По всем признакам, 15 марта 2010 года в напорной системе шестого гидроагрегата снова начали запускаться автоколебания, но так как агрегат находился недалеко от рабочей (оптимальной) точки, процесс возбуждения был вялым, и экспериментаторы успели его остановить, уйдя из опасной зоны. Однако, при этом в опорном фланце успели возникнуть трещины, постепенный рост которых вследствие развития усталостных процессов и привел к заметным протечкам, остановке и преждевременной разборке агрегата полтора года спустя. На этот раз не выдержали уже не шпильки турбинной крышки, а тот элемент конструкции агрегата, к которому они крепились. После укрепления слабого звена из предыдущего инцидента, на которое была списана причина катастрофы, нашлось новое слабое звено. Что же теперь, ставить тензодатчики и на опорные кольца, а затем и по всем агрегатам, и усиливать их конструкцию? Впрочем, поможет это мало. Более того, это вполне может привести в итоге к разрушению в одном из инцидентов уже водовода. Таким образом, действия, производимые на основе ложных представлений, приводят не к прекращению инцидентов, а только к тому, что всякий раз будет находиться новая «причина» с теми же самыми, а может быть, и с более тяжелыми последствиями.

Несколько дней назад было принято решение о том, что новые гидроагрегаты Саяно-Шушенской ГЭС примут участие «в суточном регулировании нагрузки энергосистемы» [24]. Кто-то, не имеющий по официальным сообщениям пресс-службы компании РусГидро ни лица, ни имени, снова принял решение об эксплуатации агрегатов в «рваном ритме». А ведь именно такая работа была одной из причин в цепочке последовательных шагов, после которых неустойчивый второй агрегат все-таки вошел в режим катастрофических автоколебаний. При этом новые агрегаты при повышенных мощностях по расчетному гидроакустическому индексу устойчивости являются еще более склонными к возбуждению автоколебаний, чем старые. Возможные последствия этого решения нетрудно представить, посмотрев на рис. 4 [12].



Рис. 4

## V. Заключение

Итак, развитие технологий в гидроэнергетике, начатое  $\frac{3}{4}$  века назад постройкой в Соединенных Штатах Америки ГЭС Гувер, то есть создание и эксплуатация высоконапорных гидроэлектростанций с мощными радиально-осевыми турбинами, в итоге привело к возникновению новой угрозы. Наряду с традиционными угрозами, присущими этой области человеческой деятельности, риски, вызываемые ею, варьируются от невозможности полноценно эксплуатировать оборудование до разрушения гидроэлектростанций и гибели людей. При этом данным рискам подвержены далеко не все высоконапорные станции, а только те, у которых имеется близость или кратность собственных частот колебаний потока воды в напорной системе и частот наиболее мощных периодических возмущений. Как показали самые последние исследования, подобные риски могут быть присущи и станциям с меньшими напорами.

Созданная 2 года назад теория позволяет выявить эти потенциально опасные станции и принять меры к тому, чтобы устранить эту угрозу. Тогда их сотрудники, избранные несчастливой судьбой, те, кто за считанные секунды могут разделить на живых и мертвых, снова станут обычными людьми, а не ее заложниками.

## Выводы

1. Наряду с традиционными рисками, присущими гидроэнергетике, в последние десятилетия XX века возникла новая угроза, связанная с гидроакустическим возбуждением автоколебаний напорных систем станций.
2. Построена теория возникновения и начального развития этого процесса.
3. На основе этой теории на 6 гидро- и гидроаккумулирующих станциях выявлено 8 случаев такого рода, имеющих ту же причину, что и Саянская катастрофа.
4. На Саяно-Шушенской ГЭС подобные события происходили уже трижды.
5. Несмотря на все это менеджмент компании РусГидро оказался неспособен разобраться в произошедшем и принять надлежащие меры для предотвращения таких событий в будущем.
6. Более того, менеджмент РусГидро занялся сокрытием и фальсификацией фактов, из которых следует, что процесс на втором агрегате, вызвавший катастрофу 17 августа 2009 года, 15 марта 2010 года снова возник на шестом агрегате станции.

7. Таким образом, менеджмент РусГидро делает заложниками ситуации эксплуатантов как СШ ГЭС, так и других станций, на которых также могут произойти подобные события.

#### Ссылки

1. Banqiao Dam. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Banqiao\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Banqiao_Dam)
2. Dartmouth Dam. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Dartmouth\\_Dam](http://en.wikipedia.org/wiki/Dartmouth_Dam)
3. E. Olson – Teton Dam Failure, 5 June 1976 // [http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton\\_Dam/Teton%20Dam.html](http://www.geol.ucsb.edu/faculty/sylvester/Teton_Dam/Teton%20Dam.html)
4. Campos Novos Dam Builders Downplay Danger. *International Rivers*. 27.06.2006 // <http://www.internationalrivers.org/resources/campos-novos-dam-builders-downplay-danger-3921>
5. 1967 Koynanagar earthquake. *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/1967\\_Koynanagar\\_earthquake](http://en.wikipedia.org/wiki/1967_Koynanagar_earthquake)
6. С. Кузьмина, П. Карклэ – Эолова арфа, самолеты и мосты. «Наука и жизнь», N 5, 2009 // <http://elementy.ru/lib/430811>
7. Tacoma Narrows Bridge (1940). *Wikipedia* // [http://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma\\_Narrows\\_Bridge\\_\(1940\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Tacoma_Narrows_Bridge_(1940))
8. E. T. de Grenet – Aerodinamica e vulnerabilità eolica per i ponti di grande luce. *Dissertation*, 2005 // [http://rzb104.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal\\_derivate\\_00004193/ediss.pdf](http://rzb104.biblio.etc.tu-bs.de:8080/docportal/servlets/MCRFileNodeServlet/DocPortal_derivate_00004193/ediss.pdf)
9. В. Л. Окулов, И. М. Пылев – Неустойчивость напорных систем. *Доклады Академии наук, Энергетика*, 1995, том 341, N 4.
10. Ю. И. Лобановский – Критерий возбуждения гидроакустических автоколебаний напорной системы, январь – февраль 2010 // <http://synerjetics.ru/article/excitation.htm>
11. Ю. И. Лобановский – Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов. *Гидротехническое строительство*, N 7, 2010 // <http://www.plotina.net/experts/lobanovsky-2010/>
12. СШ ГЭС. *Google. Картинки* // <https://www.google.ru/imghp?hl=ru&tab=wi>
13. Ю. И. Лобановский – Сопоставление расчетных и натурных данных в области гидроакустической неустойчивости напорных систем и на переходных режимах, май 2010 // <http://synerjetics.ru/article/comparison.htm>
14. Ю. И. Лобановский – Тайна горной долины, июнь 2010 // <http://synerjetics.ru/article/pamir.htm>
15. Ю. И. Лобановский – Гидроакустическая устойчивость гидроаккумулирующих станций, январь 2010 // <http://synerjetics.ru/article/stability.htm>
16. W. L. Pawlikewich – Grand Rapids Generation Station Unit #1 Headcover Failure. *Canadian Electrical Association, Engineering and Operation Division*, March 1993.
17. В. И. Брызгалов – Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской ГЭС. *Производственное издание*, 1998 // <http://03-ts.ru/index.php?nma=downloads&fla=stat&idd=826>
18. Землетрясение не повлияло на работу гидротехнических сооружений Саяно-Шушенского гидроэнергокомплекса. *РусГидро, Пресс-центр*, 28.12.2011 // <http://www.rushydro.ru/press/news/16404.html>
19. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного» // [http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG\\_bak.doc](http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSG_bak.doc)
20. Интернет-конференция в РИА Новости 29 июля 2010 г. *РусГидро, Пресс-центр*, 29.07.2010 // <http://www.sshges.rushydro.ru/press/news-materials/interview/13803.html>
21. Справка о гидрологических режимах с 19 по 26 декабря 2011 года. *РусГидро, Пресс-центр*, 26.12.2011 // <http://www.rushydro.ru/press/news/16393.html>
22. Установление режимов водохранилищ. *Федеральное агентство водных ресурсов. Енисейское бассейновое водное управление*, 29.11.2011 // <http://www.enbv.ru/krasnoyarsk.ru/>
23. А. В. Вострухов, В. Н. Тарасов – Особенности вибрации гидроагрегатов СШ ГЭС. Анализ причин катастрофы 17.08.2009. *Доклад на научно-практической конференции «Повышение эффективности системы управления безопасностью ГЭС»*, Москва, 20.05.2011.
24. Новые гидроагрегаты Саяно-Шушенской ГЭС будут участвовать в суточном регулировании нагрузки энергосистемы. *РусГидро, Пресс-центр*, 14.06.2012 // <http://www.rushydro.ru/press/news/18035.html>

Москва,  
04.07.2012

Ю. И. Лобановский