

## Сводные данные по выявленным гидроакустическим инцидентам

Ю. И. Лобановский

### Краткое содержание

В работе приводится сводная таблица данных по всем выявленным на 05.01.2015 инцидентам на гидро- и гидроаккумулирующих станциях, обусловленным гидроакустической неустойчивостью их напорных систем. Дан статистический анализ типов возникших неустойчивостей.

*Ключевые слова: автоколебания – устойчивость – гидроакустический резонанс – Саяно-Шушенская ГЭС*

#### I. Используемые термины и определения

Основным содержанием данной работы является сводная таблица всех известных на данный момент неблагоприятных событий (инцидентов) на гидро- и гидроаккумулирующих станциях, обусловленных гидроакустической неустойчивостью их напорных систем. Такие события могут быть двух видов – длящиеся в течение продолжительного времени и мешающие запланированной по проекту эксплуатационной деятельности станции, и аварийные или даже катастрофические, совершающиеся в течение нескольких секунд или, в редких случаях, в течение десятков секунд. Первое, в основном, в силу специфики их работы относится к гидроаккумулирующим станциям. В приведенной таблице единственным исключением такого рода среди обычных станций является Нурекская ГЭС (хотя автору известны еще две ГЭС, находящиеся в более-менее аналогичном положении, но для них пока не проведены расчеты гидроакустической устойчивости из-за недостатка данных об их технических характеристиках).

Поэтому в таблице инцидентов имеются два типа дат – указывающие только начало длительного периода, иногда заканчивающегося вследствие замены агрегатов на новые с иными характеристиками. В случае аварийного или катастрофического события дата, обычно, указывается с точностью до дня, за исключением трех случаев, когда точная дата инцидента до сих пор остается автору неизвестной.

В столбце «Краткое описание» инцидента максимально стандартным образом показаны его основные внешние проявления. В случае малоизвестных и плохо описанных инцидентов нет гарантий, что указаны все основные проявления, однако в общей массе событий эти инциденты занимают свои вполне определенные ниши и понятны даже в условиях, когда информация о них неполна.

В столбце «Гидроакустическое описание» инцидента показано, на каком режиме и на какой моде собственных колебаний напорной системы происходил гидроакустический процесс, а также указан тип его возбуждения. Термин «рабочий режим» для турбин означает, что агрегат находился в зоне А' зависимости «потери полного давления – расход», определяющей возможность запуска автоколебаний напорной системы [1] (то есть, при расходах, больше номинального –  $q = Q/Q_0 > 1.0$ ). Термин «переходный режим» означает, что агрегат находился в зоне А [1] (примерно при  $0.45 < q < 0.7$ ). Для гидроаккумулирующих станций, где переходный режим, по существу, является рабочим, указанные выше четкие количественные формулировки режимов являются также вполне адекватными. Там же при работе агрегата в качестве насоса запуск автоколебаний возможен только в зоне В [1], то есть приблизительно при  $0.7 < q < 1.0$ . Таким образом, упоминаемый в таблицах «насосный режим» – это зона В.

Номер моды собственных колебаний означает число полуволн, укладывающихся в пределах полной длины напорной системы, представляющей собой трубу с открытыми концами (при этом на полуволне или на одной из полуволн, если номер моды больше 1, имеется разрыв) [1]. В таком колебательном контуре именно полуволны – это тот размер, на который более высокая мода собственных колебаний отличается от предыдущей, более низкой, моды.

Термин «резонансная неустойчивость» означает, что частота возбуждающих колебаний достаточно близка к частоте собственных колебаний напорной системы. Термин «неустойчивость при некоторой кратности» означает, что частота возбуждающих колебаний меньше частоты собственных приблизительно в число раз, равное кратности. «Модулирование» колебаний означает то, что на основные, как правило, вихревые возмущения потока накладываются дополнительные возмущения, вызванные колебаниями лопаток направляющего аппарата гидроагрегата.

Во всех инцидентах, кроме случаев на Зейской ГЭС и на гидроэлектростанции Гранд Рэпидс, агрегаты были радиально-осевыми. На Зейской ГЭС используются диагональные турбины, а на Гранд Рэпидс – поворотно-лопастные. Для напорных систем с радиально-осевыми и диагональными турбинами основными возбуждающими возмущениями являются вихревые – возмущения, создаваемые прецессией

затурбинного вихря. Для напорных систем с поворотно-лопастными турбинами основные возмущения – это возмущения с лопаточными частотами.

## II. Таблица гидроакустических инцидентов

№	Дата	Название станции	Страна	Краткое описание	Гидроакустическое описание
1	С 1972 года	Нурекская ГЭС	Таджикистан	Повышенная вибрация агрегатов, усталостные трещины в шпильках турбинных крышек, невозможность работы на максимальных проектных напорах.	Резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме и на второй моде на рабочем режиме.
2	С 1978 года по 2007 год	ГАЭС Далечице	Чехия	Повышенная вибрация агрегата, невозможность работы на максимальных проектных напорах.	Резонансная неустойчивость на первой моде на насосном режиме.
3	С 1983 года	ГАЭС Жарновец	Польша	Повышенная вибрация агрегатов, невозможность работы на максимальных проектных напорах.	Резонансная неустойчивость на третьей моде на насосном режиме.
4	С 1983 года	ГАЭС Баджина Башта	Сербия	Повышенная вибрация агрегатов, кавитация, сильные колебания расхода в напорной системе.	Резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме при модулировании вихревых возмущений.
5	09.07.1983	Нурекская ГЭС	Таджикистан	Частичный отрыв турбинной крышки первого агрегата.	Резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме при напоре ниже проектного.
6	Лето 1988 года	СШ ГЭС	Россия	Повреждение конструкции десятого агрегата при испытаниях на повышенной мощности.	Резонансная неустойчивость на первой моде на рабочем режиме.
7	02.05.1990	ГЭС Дартмут	Австралия	Полное разрушение единственного агрегата станции, перелив воды через плотину.	Неустойчивость на первой моде на переходном режиме при кратности возмущения 2.
8	10.03.1992	ГЭС Гран Рэпидс	Канада	Отрыв турбинной крышки первого агрегата и затопление машинного зала.	Резонансная неустойчивость на второй моде на рабочем режиме.
9	16.10.1995	ГАЭС Бира	Индия	Разрыв напорного водовода единственного нового мощного агрегата, четверо погибших.	Резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме при модулировании вихревых возмущений.
10	2001	ГАЭС Тихуангпинг	Китай	Отрыв турбинной крышки и вылет первого агрегата из турбинного колодца.	Резонансная неустойчивость на четвертой моде на рабочем режиме.

Таблица гидроакустических инцидентов (продолжение)

№	Дата	Название станции	Страна	Краткое описание	Гидроакустическое описание
11	05.02.2007	ГЭС Памир-1	Таджикистан	Отрыв турбинной крышки второго агрегата, его вылет из турбинного колодца и затопление машинного зала.	Бустинг: резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме и возбуждение этими колебаниями второго, более мощного процесса на третьей моде на рабочем режиме при кратности 3.
12	С 2007 года	Ташлыкская ГАЭС	Украина	Повышенная вибрация второго агрегата, невозможность работы на максимальных проектных напорах.	Резонансная неустойчивость на первой моде на насосном режиме.
13	17.08.2009	СШ ГЭС	Россия	Отрыв турбинной крышки второго агрегата, его вылет из турбинного колодца и затопление машинного зала при 75 погибших и разрушении или тяжелых повреждениях всех 10 агрегатов станции.	Бустинг: резонансная неустойчивость на первой моде на переходном режиме при модулировании вихревых возмущений и возбуждение этими колебаниями второго, более мощного процесса на первой моде на рабочем режиме.
14	15.03.2010	СШ ГЭС	Россия	Повреждение опорного фланца шестого агрегата при испытаниях.	Резонансная неустойчивость на первой моде на рабочем режиме.
15	04.10.2012	Зейская ГЭС	Россия	Аварийное отключение от сети трех агрегатов.	Неустойчивость на первой моде на рабочем режиме при кратности 2.
16	Декабрь 2012	Зейская ГЭС	Россия	Повторение предыдущего инцидента с усилением эффекта.	Неустойчивость на первой моде на рабочем режиме при кратности 2.
17	26.12.2012	Токтогульская ГЭС	Киргизия	Аварийное отключение от сети четвертого агрегата из-за резкого увеличения давления под крышкой турбины.	Резонансная неустойчивость на первой моде на рабочем режиме.
18	13.05.2013	Колымская ГЭС	Россия	Аварийное отключение от сети первого агрегата.	Неустойчивость на первой моде на переходном режиме при кратности 2.

Информацию по инцидентам 2, 3, 6 – 8, 11, 13 – 18 можно найти в статье [1], по событиям 1 и 5 – в статье [2], по инциденту 12 – в источнике [3], по событиям 4, 9, 10 – в источниках [4, 5].

### III. Статистика по выявленным гидроакустическим инцидентам

На 05.01.2015 всего было выявлено 18 гидроакустических инцидентов на 8 ГЭС и 6 ГАЭС и, вследствие того, что при бустинге запускаются 2 гидроакустических процесса, а на Нурекской ГЭС во время эксплуатации также начинают возбуждаться 2 таких процесса, 21 режим возбуждения автоколебаний напорных систем. Из 14 станций 3 находятся в России, 3 – в Средней Азии, 3 – в Восточной Европе, по одной – в Австралии, Канаде, Индии, Китае и Украине. На одной из станций (на Зейской ГЭС) подряд произошло 2 гидроакустических инцидента, однако они, видимо, были не слишком серьезными. На Нурекской ГЭС имеется гидроакустический процесс хронического характера (как и на некоторых ГАЭС), а также произошла крупная авария. На Саяно-Шушенской ГЭС в период 1988 – 2010 годы были 3 инцидента, 2 из которых привели к тяжелым повреждениям агрегатов, а инцидент 17 августа 2009 года

вызвал крупнейшую техногенную катастрофу в России. Всего зафиксировано 5 гидроакустических процессов хронического характера и 13 одномоментных инцидентов, которые находятся в диапазоне от временного отключения агрегатов от сети до катастрофы.

Из 21 случая возбуждения автоколебаний на 14 станциях 8 раз это происходило на переходном режиме работы гидроагрегатов, 10 раз – на рабочем, и 3 раза – на насосном режиме насос-турбин ГАЭС. При этом 16 случаев возбуждения произошли на первой моде собственных колебаний, по 2 – на второй и на третьей, и 1 – на четвертой модах. В 16 случаях было резонансное возбуждение, в 4 – при кратности 2, и был 1 случай возбуждения при кратности 3. В 17 случаях было вихревое возбуждение, в 3 – вихревое возбуждение, модулированное колебаниями лопаток направляющего аппарата – все 20 зафиксированы на радиально-осевых и диагональных турбинах, и 1 раз было лопаточное возбуждение напорной системы с поворотно-лопастной турбиной.

Так как процесс возбуждения автоколебаний развивается экспоненциально, а показатель экспоненты при прочих равных условиях пропорционален напору на турбине, то, как правило, наиболее быстро этот процесс развивается на высоконапорных станциях. В случае не слишком больших напоров современные аварийные системы могут успеть отключить агрегат, пока автоколебания не станут катастрофическими. Этим объясняются сравнительно благополучные исходы при запуске автоколебаний в 2012 – 2013 годах. Однако, полной гарантии на аварийную остановку агрегата без серьезных последствий нет даже для таких случаев, и, тем более, для высоких напоров.

Сочетания типов и конструкций агрегатов, напоров, режимов работы, мод, резонансов и кратностей, способов возбуждения, а также возможность бустинга, приводят к наблюдаемому многообразию внешних проявлений принципиально единого для всех рассмотренных случаев процесса возбуждения автоколебаний в напорной системе гидроэлектростанции. Турбинная крышка отрывалась 5 раз полностью, и 1 раз крышка отрывалась частично. При полном отрыве крышки происходило разрушение гидроагрегата и затопление машинного зала. При этом серьезные повреждения получали все агрегаты станции, а некоторые из них также были разрушены полностью. Однажды из-за разрушения агрегата произошел даже перелив плотины. В одном случае крепление турбинной крышки выдержало пульсационные нагрузки, и тогда был разрушен напорный водовод, оказавшийся наиболее слабым звеном напорной системы. Еще в трех случаях агрегаты были серьезно повреждены. Таким образом, 7 из 18 гидроакустических инцидентов, то есть почти 40 %, завершилась катастрофически, а в 10, то есть в 55 % случаев, происходили, как минимум, серьезные аварии. Если же исключить хронические процессы балансирования на грани возбуждения автоколебаний, то серьезными авариями завершилось около 75 % одномоментных инцидентов – 10 из 13. Впрочем, пример Нурекской ГЭС показывает, как легко хронический процесс может перейти в катастрофический.

Таким образом, возбуждение автоколебаний неустойчивой напорной системы, процесс, из-за которого уже погибло не менее 79 человек из персонала станций, является постоянной угрозой для гидроакустически неустойчивых ГЭС и ГАЭС, многие из которых, видимо, еще не выявлены, а некоторое количество их еще только строится. Причем среди последних немало особо мощных и особо высоконапорных станций, на которых подобные процессы происходят максимально быстро, что не позволит парировать их никаким аварийным системам управления, и приводит, как правило, к последствиям катастрофического характера.

#### Литература

1. Ю. И. Лобановский – Автоколебания напорных систем гидроэлектростанций и Саянская катастрофа. «Гидроэнергетика Украины», N 3 – 4, 2013 // <http://www.synerjetics.ru/article/autooscillations.htm>
2. Ю. И. Лобановский – Гидроакустическая теория и проблемы Нурекской ГЭС. «Гидроэнергетика Украины», N 4, 2014 // <http://www.synerjetics.ru/article/nurek.htm>
3. А. В. Гирский, О. Н. Агамалов – Проблемные вопросы эксплуатации электротехнического оборудования и сооружений Ташлыкской ГАЭС. «Гидроэнергетика Украины», N 4, 2014.
4. S. Pejovich et al. – Analysis of Pump-Turbine “S” Instability and Reverse Waterhammer Incidents in Hydropower Systems. 4-th International Meeting on Cavitation and Dynamic Problems in Hydraulic Machinery and Systems, October, 26-28, 2011, Belgrade, Serbia // [http://www.researchgate.net/publication/254994729\\_Analysis\\_of\\_Pump-Turbine\\_S\\_Instability\\_and\\_Reverse\\_Waterhammer\\_Incidents\\_in\\_Hydropower\\_Systems](http://www.researchgate.net/publication/254994729_Analysis_of_Pump-Turbine_S_Instability_and_Reverse_Waterhammer_Incidents_in_Hydropower_Systems)
5. S. Pejovich, B. Karney – Guidelines for Transients are in Need of Revision. 27th IAHR Symposium on Hydraulic Machinery and Systems, 21.12.2014 // <http://iopscience.iop.org/1755-1315/22/4/042006>