

## Бог троицу любит

Ю. И. Лобановский

Я вынул из кармана связку ключей весьма причудливой формы и попробовал один из них на входной двери. Уже третий ключ подошел – я бы весьма удивился, если бы ни один не пришелся впору.

А. Маклин

### Краткое содержание

В работе описана и проанализирована вновь полученная информация об испытаниях новых гидроагрегатов на Саяно-Шушенской ГЭС, а также об осенне-зимних инцидентах на Зейской и Токтогульской ГЭС, причиной которых, по мнению автора, стала гидроакустическая неустойчивость.

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

### I. Инцидентов при летних испытаниях гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС не было

Сейчас, в самом конце 2012 года представляется целесообразным подвести его итоги по тому самому направлению, которое возникло в связи с Саянской катастрофой. Тем более, в конце этого года произошло несколько событий, прямо с ней связанных. Следует также внести уточнения в предварительные выводы, сделанные в заметке [1].

В середине декабря 2012 года, спустя 10 дней после появления ее на сайте, поступила информация из заслуживающего внимания источника о том, что летние испытания 2012 года новых гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС, и восьмого тоже, все-таки прошли без серьезных проблем. Также сообщалось, что испытаний в октябре не было из-за организационных трудностей – якобы проблемы с пуском Богучанской ГЭС настолько отвлекли внимание всех и вся, что его больше ни что другое не осталось. Таким образом, первый результат от публикации [1] был достигнут – была получена первая информация об этих испытаниях. Оперативная комбинация, известная под названиями «attempt to provoke a reaction» [2] или «засада с живцом и подстраховкой» [3], удалась. Безусловно, сейчас, да еще в Интернете, это происходит в несколько иных формах, чем раньше, однако нужный результат все равно был достигнут.

Итак, стало известно, что значительных проблем на испытаниях конца июня – начала июля 2012 года выявлено не было. Это означает, что либо новые агрегаты СШ ГЭС оказались более устойчивыми, чем можно было бы предположить по экстраполяции на них данных со старых машин, либо испытатели все-таки вняли предупреждениям, и просто не рискнули выйти на достаточно большие мощности. По результатам испытаний 1988 года возбуждение автоколебаний началось при мощности агрегата около 720 МВт [4]. Интересно, до какой мощности дошли в июле 2012 года? На данный момент это неизвестно. Можно также отметить, что если поступившая информация верна, то в конце сентября в ОАО РусГидро еще не было известно, что пуск Богучанской ГЭС помешает испытаниям на Саяно-Шушенской ГЭС в октябре.

### II. Инциденты на Зейской ГЭС и потеря устойчивости компанией РусГидро

Однако, спустя еще несколько дней, появилась информация о том, что в самом начале октября 2012 года произошли события, которые могли бы повлиять на решимость проводить испытания гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС при высоких напорах. На Зейской ГЭС – филиале РусГидро произошло одновременное отключение трех из пяти работавших на тот момент гидроагрегатов. В новостях РусГидро от 5 октября сообщалось: «4 октября произошло отключение линии ВЛ 500 кВ «Зейская ГЭС-Амурская». В результате чего, действием противоаварийной автоматики были отключены от сети три гидроагрегата филиала ОАО «РусГидро» – «Зейская ГЭС». В течение 10 минут, гидроагрегаты включены в сеть, работа станции восстановлена» [5].

На Зейской ГЭС применяются диагональные турбины (рис. 1, см. [6]), при использовании которых ранее не были известны случаи возбуждения автоколебаний в их напорных системах. Однако, такие турбины занимают промежуточное положение между радиально-осевыми и поворотными-лопастными турбинами, в напорных системах которых уже возникало возбуждение автоколебаний [7], так что само по себе это вызывать удивления не должно. Главное отличие диагональных турбин от радиально-осевых состоит в том, что лопатки первых при изменении режима работы поворачиваются, подстраиваясь под течение. Так что их характеристики при уходе с рабочего (номинального) режима ухудшаются не столь сильно, как характеристики радиально-осевых турбин. Поэтому, чтобы у систем с диагональными турбинами произошло возбуждение автоколебаний, резонанс (или кратность) между собственными и вихревыми

частотами должны быть очень «тесными» [8]. Но, и вихрь за такой турбиной на нерасчетных режимах должен существовать. Опираясь на эту модель, оценим гидроакустическую устойчивость агрегатов Зейской ГЭС.



Рис. 1

4 октября 2012 года напор составлял 94.3 м, при том, что номинальный напор равен 78.5 м, а максимальный – 98.3 м [9, 10]. Таким образом, напор был довольно близок к максимальному. В среднем на агрегат расход был  $263 \text{ м}^3/\text{с}$ , мощность – примерно на десяток мегаватт превышала номинальную. Расходы и мощности в течение недели до инцидента непрерывно росли и увеличились за это время почти на 15 %, превысив номинал примерно на 4 %. Сразу после инцидента эти показатели были скачком снижены до номинала [11]. Частота вращения турбины Зейской ГЭС – 2.27 Гц, а Саяно-Шушенской только чуть больше – 2.38 Гц. Поэтому можно ожидать, что подобие по вихревым частотам [12] у них должно неплохо выполняться. Тогда вихревая частота агрегатов Зейской ГЭС в области повышенных мощностей должна быть близка к 1.36 Гц.

По схеме с рис. 2 было определено, что длина водовода этой станции составляет 136 м. Это – так называемый «длинный водовод», коих на станции имеется 2 штуки, и порог которого расположен на отметке 275 м [9]. Ремонтируемый шестой агрегат использует именно такой длинный водовод. Еще на станции есть 4 водовода длиной около 126 м, пороги которых находятся на отметке 257 м [9]. Были рассчитаны варианты с длинами отсасывающих труб 25 и 30 м. Получилось, что при изменении эффективности диагональной турбины как на поворотно-лопастных турбинах, напорные системы Зейской ГЭС с длинными водоводами устойчивы при всех разумных наборах основных параметров. А напорные системы с короткими водоводами при рассмотренных параметрах являются гидроакустически неустойчивыми. Их собственные частоты колебаний приблизительно равны 2.7 Гц, что очень близко к удвоенной частоте вихревых пульсаций, и, поэтому, индекс устойчивости недопустимо низок.

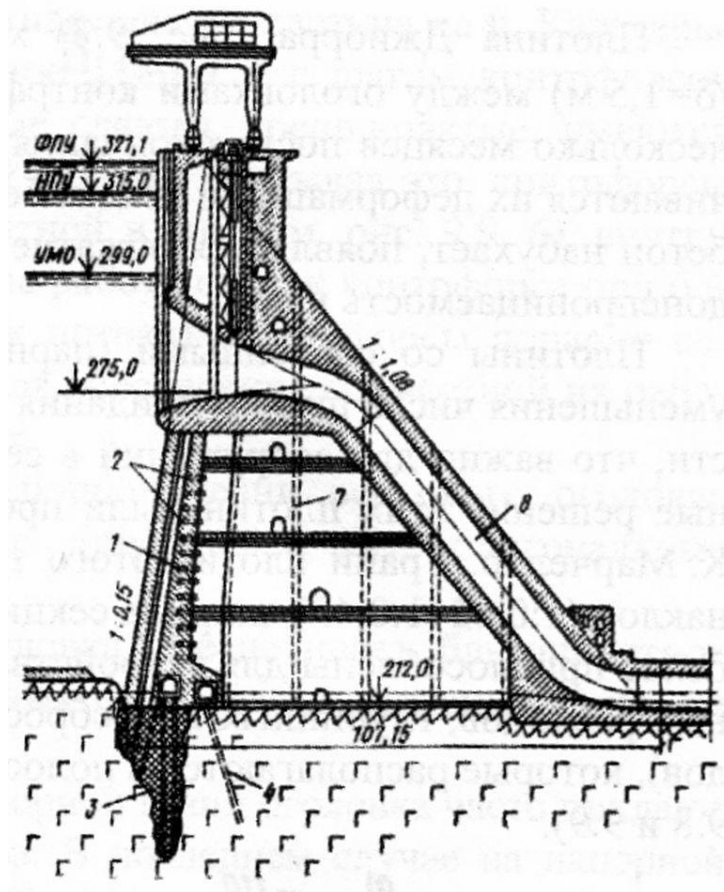


Рис. 2

Таким образом, в момент инцидента 4 октября первые 4 гидроакустически неустойчивых гидроагрегата с короткими водоводами работали с мощностями, в среднем превышающими номинальные, то есть в зоне, где возможно возбуждение автоколебаний. Надо полагать, что в водоводе одного из них, самого неустойчивого, это, наконец, и произошло. Но, из-за значительно более пологой зависимости эффективности турбины от расхода и существенно меньшего напора, чем на Саяно-Шушенской ГЭС, этот процесс происходил существенно более вяло, чем во время Саянской катастрофы. Так что, вследствие увеличения уровней возмущения от автоколебаний в этом водоводе, успел начаться запуск автоколебаний у ближайших соседей. При этом, как всегда это бывает, начались и стали усиливаться колебания активной мощности на этих гидроагрегатах, по которым противоаварийная автоматика смогла отключить машины от сети. Их частоты вращения выросли, соответственно увеличились вихревые частоты, тесной кратности с собственными частотами не стало, и автоколебания затухли. После этого машины были сначала успешно остановлены, а потом и снова запущены. Однако, именно к системе, которая, в соответствии с данной версией, предотвратила серьезную аварию, Ростехнадзор предъявил претензии, назвав все произошедшее «ложной работой защит» [13]. В декабре, насколько можно судить по неофициальной информации, работа защит была не столь успешной, и очередной инцидент оказался существенно более серьезным, напомнив его очевидцам Саянскую катастрофу.

Таким образом, вполне можно было бы предположить, что именно первый инцидент на Зейской ГЭС, произошедший при почти максимальном напоре, оказался причиной отмены испытаний новых гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС при высоких напорах, что свидетельствовало бы о каком-то понимании реальных проблем руководством компании РусГидро. Однако, пожалуй, более вероятно, что события на Зее не повлияли на испытания на Енисее, а все эти внезапные отказы от ранее принятых решений являются просто симптомами нарастания потери управляемости в ОАО РусГидро, ярким свидетельством которого стал декабрьский демарш 5 из 13 членов Совета директоров со сложением своих полномочий [14]. А ведь подобное обстоятельство само по себе может создать не меньшие проблемы с безопасностью эксплуатируемых РусГидро станций, чем их гидроакустическая неустойчивость.

## Инцидент на Токтогульской ГЭС

Однако, гидроакустические проблемы в конце 2012 одолевали энергетиков не только в наших российских палестинах. За 5 дней до новогоднего праздника, 26 декабря 2012 года, четвертый гидроагрегат Токтогульской ГЭС, расположенной в Киргизии на реке Нарын, был аварийно отключен в связи с тем, что у него было «выявлено увеличение давления под крышкой турбины» [15]. В блоге РусГидро сообщается, что давление под крышкой поднялось «до 10 атмосфер» [16]. Генеральный директор эксплуатанта этой станции – ОАО «Электрические станции» Салайдин Авазов на экстренно проведенной пресс-конференции заявил: «Авария на Токтогульской ГЭС Кыргызстана аналогична той, что произошла на Саяно-Шушенской ГЭС в России» [17].

Разбираясь в этой «загадочной аварии» [16] оценим теперь гидроакустическую устойчивость агрегатов Токтогульской ГЭС. Их рабочие напоры находятся в диапазоне от 112 до 186 м [18]. Нарын – типичная горная река с ледниково-снеговым питанием и половодьем с мая по август [19], похожая этим на верхний Енисей. Поэтому для оценки напора на Токтогульской ГЭС будем использовать известный ход изменения напоров в течение года на СШ ГЭС с учетом различия масштабов колебаний. Тогда на киргизской станции напор на момент инцидента можно оценить в 170 м.

Частота вращения ее радиально-осевых гидроагрегатов составляет 2.78 Гц [18]. Тогда вихревая частота в области повышенных мощностей должна быть близка к 1.665 Гц [12]. Также как и на Зейской ГЭС, водоводы здесь разной длины – из-за шахматного расположения четырех агрегатов станции 2 водовода имеют длину около 210.5 м, а 2 – около 230 м (рис. 3, см. [20]). При этом длины отсасывающих труб составляют 68 м и 39 м соответственно [21]. Нечетные по номеру агрегаты – с длинными напорными водоводами и короткими отсасывающими трубами, четные – наоборот. В зависимости от эффективности турбин собственная частота колебаний воды нечетных агрегатов по оценкам изменяется от 1.6 до 1.65 Гц, а четных – от 1.65 до 1.68 Гц, «накладываясь» на вихревую частоту и создавая при этом очень тесный резонанс.

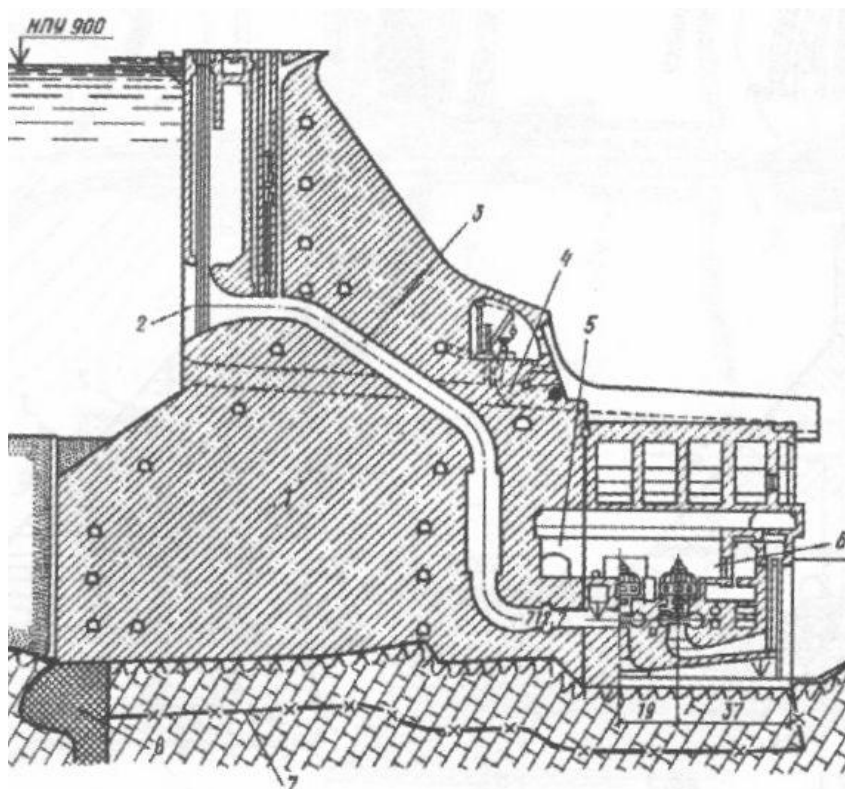


Рис. 3

Первоначальные оценки индекса устойчивости Токтогульской ГЭС, сделанные сразу после создания теории гидроакустического возбуждения автоколебаний [12] в январе 2010 года, оказались неточными из-за того, что длины водоводов тогда были неизвестны. Поэтому для их оценки было сделано предположение о том, что они подобны по геометрии водоводам Саяно-Шушенской ГЭС. С учетом минимального напора, то есть положения входа водоводов по этим оценкам вышло, что их длины примерно равны 155 м и 175 м. На самом же деле, как недавно стало известно автору после того, как стал доступен рис. 3, из-за своеобразной

изогнутой формы (см. рис. 3) они оказались на 55 м длиннее, что и перевело Токтогульскую ГЭС из разряда устойчивых станций в неустойчивые. Следует отметить, что более 2.5 лет назад через человека, известного и у нас, и в Киргизии, была сделана попытка уточнить эти характеристики Токтогульской ГЭС. Однако, главный инженер этой станции сообщил [22], что длина всех водоводов составляет 140 м! После этого все остальные вопросы к нему отпали сами собой. Таким образом, еще весной 2010 года то ли из-за слабой компетенции, то ли из-за стремления к сокрытию любой информации о станции, ее руководством была упущена возможность предвидеть инцидент, произошедший 26 декабря 2012 года, и принять меры к его недопущению.

Похоже, однако, что руководство киргизской энергетики продолжает играть в прежние игры. Через сутки после первого заявления Салайдина Авазова последовало второе. В нем с той же степенью уверенности, что и за день до этого, г - н Авазов утверждает противоположное тому, что он сказал ранее. По его словам, аварии на Токтогульской ГЭС не было. Однако непосредственно перед этим он сказал, что было сорвано лабиринтное уплотнение [23]. Как совместить эти 2 высказывания в одном заявлении, может знать только он сам. Если срыв лабиринтного уплотнения и аварийный останов агрегата под угрозой его разрушения – это для г - на Авазова не авария, то, видимо, и вполне возможное разрушение машинного зала станции как на СШ ГЭС – это не катастрофа.

Кто бы сомневался, что после произошедшей аварии лабиринтное уплотнение не было разрушено? Однако выдавать следствие за причину – это стандартный прием всех тех, кто хочет найти не истину, а увертку. Вместо тиражирования различных отговорок сейчас необходимо было бы провести точную оценку гидроакустического состояния напорных систем Токтогульской ГЭС с использованием точных официальных данных о ее характеристиках в настоящее время, а также о режиме работы агрегатов в момент инцидента.

### III. Заключение

Итак, кратко подведем итоги 2012 года в сравнительно узкопрофессиональной области – гидроакустической устойчивости ГЭС и ГАЭС.

Можно отметить, что последние заметки автора на эту тему [1, 7] позволили прервать многомесячное молчание вокруг событий 2012 года в рассматриваемой области и установить, что:

- a) На испытаниях новых гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС, как проведенных, так и отмененных, серьезных проблем не зафиксировано, скорее всего, вследствие похвальной осторожности испытателей.
- b) Однако, вместо этого возможного инцидента, в последнюю четверть года произошли 3 инцидента, которые, по имеющимся в настоящий момент данным, имеют гидроакустическую природу. Это – аварии на Зейской и Токтогульской ГЭС.
- c) Вместе с изученным в этом году уже давним инцидентом 1992 года на канадской гидроэлектростанции Гранд Рэпидс [7] выявлено 3 типа турбин, в напорных системах которых возможно возбуждение автоколебаний. К радиально-осевым турбинам, с изучения которых все началось, в этом году были добавлены поворотно-лопастные и диагональные турбины.

Таким образом, в этом году было трижды продемонстрировано, что бог троицу любит – 3 типа агрегатов с реальной гидроакустической неустойчивостью, 3 гидроакустических инцидента на ГЭС, и еще 3 случая возникновения ударных волн на мелководье, унесших жизни более полутора сотен человек [24 – 26]. Произошедшие события показывают, что все эти аварии, которые могут иногда перерасти в катастрофы, будут повторяться снова и снова, если не будут сделаны надлежащие выводы, и не предприняты действия, устраняющие угрозы, выявленные в последние 3 года – гидроакустическую неустойчивость широкого круга гидроэлектростанций и возникновения волн-убийц на мелководьях.

### Ссылки

1. Ю. И. Лобановский – Любит ли бог троицу? *Synerjetics Group*. Декабрь 2012 // <http://synerjetics.ru/article/trinity.htm>
2. A. MacLean – Puppet on a Chain. Wm. Collins, 1969.
3. В. Богомолов – В августе сорок четвертого. Москва, Молодая гвардия, 1974.
4. 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>
5. Зейская ГЭС работает в штатном режиме. *РусГидро*. *Зейская ГЭС*. *Пресс-центр*. 05.10.2012 // <http://www.zges.rushydro.ru/press/news/80904.html>
6. Диагональная турбина. *Google*, *картинки* // <https://www.google.ru/imghp?hl=ru&tab=wi>

7. Ю. И. Лобановский – Угроза избранным. *Synerjetics Group*. Июль 2012 // <http://www.synerjetics.ru/article/threat.htm>
8. Автоколебания напорной системы гидроэлектростанции. *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Автоколебания\\_напорной\\_системы\\_гидроэлектростанции](http://ru.wikipedia.org/wiki/Автоколебания_напорной_системы_гидроэлектростанции)
9. Общие сведения. *РусГидро. Зейская ГЭС* // <http://www.zges.rushydro.ru/hpp/general/>
10. Справка о гидрологическом режиме Зейской ГЭС. *РусГидро. Зейская ГЭС. Пресс-центр*. 04.10.2012 // <http://www.zges.rushydro.ru/press/news/80886.html>
11. Справка о гидрологическом режиме Зейской ГЭС. *РусГидро. Зейская ГЭС. Пресс-центр*. 05.10.2012 // <http://www.zges.rushydro.ru/press/news/80914.html>
12. Ю. И. Лобановский – Критерий возбуждения гидроакустических автоколебаний напорной системы, январь – февраль 2010 // <http://synerjetics.ru/article/excitation.htm>
13. Федеральная служба по экологическому, технологическому и атомному надзору информирует об авариях и несчастных случаях, по которым завершено расследование. *Ростехнадзор, Новости*. 05.10.2012 // <http://www.gosnadzor.ru/news/1398/>
14. В. Дзагуто, К. Мельников, Е. Крючкова – «РусГидро» дало течь. *«Коммерсант»*, N 235 (5020), 12.12.2012 // <http://www.kommersant.ru/doc/2088274>
15. О временной остановке ГА № 4 Токтогульской ГЭС. *ОАО «Электрические станции»*. Пресс-релиз. 27.12.2012 // <http://www.energo-es.kg/?page=press>
16. Загадочная авария на Токтогульской ГЭС. *Rushydro Rocks*. 27.12.2012 // <http://rushydro.livejournal.com/306444.html>
17. Салайдин Авазов: Авария на Токтогульской ГЭС Кыргызстана аналогична той, что произошла на Саяно-Шушенской в России. *Информационное агентство 24. Новости дня*. 27.12.2012 // <http://www.24kg.org/community/144992-salajdin-avazov-avariya-na-toktogulskoj-gyes.html>
18. Токтогульская ГЭС. *Wikimapia* // <http://wikimapia.org/4022806/ru/Токтогульская-ГЭС>
19. Нарын (река). *Wikipedia* // [http://ru.wikipedia.org/wiki/Нарын\\_\(река\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Нарын_(река))
20. Токтогульская ГЭС. *Google, картинки* // <https://www.google.ru/imghp?hl=ru&tab=wi>
21. Cugnet.16.01.2011 // <http://greycygnet.livejournal.com/104360.html>
22. В. Ф. Тимченко – Частное сообщение, 22.04.2010.
23. Салайдин Авазов: В рабочем колесе генератора Токтогульской ГЭС Кыргызстана сорвано лабиринтное уплотнение. *Информационное агентство 24. Новости дня*. 28.12.2012 // <http://www.24kg.org/incidents/145053-salajdin-avazov-v-rabochem-kolese-generatora.html>
24. И. Н. Днестрянский, Ю. И. Лобановский – Наводнение в Крыму: причины и механизмы затопления города. *Synerjetics Group*, 07.08.2012 // <http://synerjetics.ru/article/machinery.htm>
25. Ю. И. Лобановский – Новое наводнение на Кубани: схожесть сценариев. *Synerjetics Group*, 31.08.2012 // [http://www.synerjetics.ru/article/new\\_wave.htm](http://www.synerjetics.ru/article/new_wave.htm)
26. Ю. И. Лобановский – Водяные барсы Хакенсака. *Synerjetics Group*, 02.11.2012 // <http://synerjetics.ru/article/hackensack.htm>

Москва,  
31.12.2012

Ю. И. Лобановский