

©Иванов В.Н., Седов И.Б., Иванов А.В.

## О ПРИЧИНАХ И УРОКАХ АВАРИИ, ПРОИЗОШЕДШЕЙ НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС 17.08.2009

### 1. Актуальность

Каждая авария, а тем более такая тяжелая (рис. 1 и рис. 2) с многочисленными жертвами должна подвергаться тщательному техническому расследованию еще и потому, чтобы всесторонне рассмотреть причины ее возникновения, а также изучить уроки, преподанные обществу, с тем, чтобы снизить риск при эксплуатации подобного оборудования, избежать возможных рецидивов и впредь не допускать ошибок в аналогичных ситуациях.



**Рис. 1** – Машинный зал СШГЭС до аварии  
(фото <http://bigpicture.ru/?p=4962>)

### 2. Анализ исследований

Прошло более года с тех трагических событий, но страсти в интернет-сообществе и в специализированных изданиях не утихают. Раздается критика

проведенных официальных расследований, приводятся новые версии случившегося.



**Рис. 2** – Машинный зал СШГЭС после аварии (фото Александра Черных)

Владимир Милов – политик, замминистра энергетики РФ в 2002 г. – дает (<http://echo.msk.ru/blog/milov/624632-echo/>) такую оценку: «Ростехнадзор – на мыло. Уже при первом прочтении видно, что Акт ([1] – *авт.*), уж простите за лексику, – низкокачественное политизированное фуфло. Далее, сам отчет написан ужасно. Это лишний раз подтверждает, насколько советские технари не умеют писать связные, читаемые тексты. По нормальной логике, такого рода акт должен был бы содержать:

- Краткое описание произошедших событий;
- Методологию и логику проверки;
- Основные версии аварии, отработывавшиеся при проверке;
- Внятные выводы.

Попробуйте найти в Акте что-нибудь из этого! Нету!».

Конечно, профессиональное и объективное расследование аварии с объяснением механизма разрушения гидроагрегата №2 (ГА-2) и связанных с ним сооружений, указанием основной причины или нескольких основных причин аварии, вместе с квалифицированным изложением событий не дало бы

повода и для многих фантастических версий (точечный подземный удар, некая третья сила неземного происхождения и т.п.).

Официальные лица неоднократно и по-разному озвучивали причины катастрофы на СШГЭС в следующем порядке: гидроудар, порыв водовода, не было никакого гидроудара, взрыв трансформатора, снова гидроудар, взрыв газогидрата, попавшего в водовод ГА №2 со дна водохранилища, бесконтрольный усталостный разрыв шпилек крышки турбины. Последняя версия приведена и в Акте технического расследования причин аварии [1].

Другие заявления, например, бывшего гл. инженера СШГЭС В. А. Стафиевского (проработал в этой должности с 1983 г. по 2006 г.) также не приносили ясности. Вот слова последнего: «Причина очевидна. Авария произошла в результате того, что вода под высоким напором попала в машинный зал через поврежденный узел. Как это могло случиться, не знает никто». Или Н.Г. Кутын, руководитель Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (кандидат юридических наук) то отмечал, что «...законы физики были нарушены...», то замечал, что «...следы полета (ГА-2 – *авт.*) видны на конструкции здания. Колонна, подпирающая крановые пути для двух пятисоттонных кранов, стесана снизу доверху неоднократными вращениями конструкции второго агрегата». ([http://www.newfresh.name/publ/versii\\_teorii/sajano\\_shushenskaja\\_gehs\\_versija\\_3/80-1-0-843](http://www.newfresh.name/publ/versii_teorii/sajano_shushenskaja_gehs_versija_3/80-1-0-843)). Сам автор этого сайта придерживается версии о какой-то третьей силе неземного происхождения.

Однако при ближайшем рассмотрении колонны (рис. 3), на которую указывал Н.Г. Кутын, на ней не видно следов от вращения какого-либо тела, а не то, что от «конструкции второго агрегата». И как убедительно показал Б.П. Синюков ([http://zhurnal.lib.ru/s/sinjukow\\_b\\_p/261gidroudard3.shtm](http://zhurnal.lib.ru/s/sinjukow_b_p/261gidroudard3.shtm)), такое разрушение колонны может быть следствием удара снизу, т.е. землетрясения или гидравлического удара.



**Рис. 3** – На переднем плане – фрагмент той самой колонны  
(фотоснимок заимствован из [http://zhurnal.lib.ru/s/sinjukow\\_b\\_p/261gidroudar3.shtml](http://zhurnal.lib.ru/s/sinjukow_b_p/261gidroudar3.shtml))

Нельзя, конечно, согласиться с мнением автора сайта <http://news.vtomske.ru/news/12714.html>, который заявляет, что «сейчас, в принципе, не важно, как произошла авария». Нет, это очень и очень важно! Важно потому, что понимание механизма разрушения позволит не только указать и устранить первопричину аварии, снизить риск дальнейшей эксплуатации гидроагрегатов станции, но и объяснит закономерность произошедшего, а также положит конец всяким фантастическим версиям.

И уж, конечно, недопустима фальсификация технического расследования, к сожалению нередкая в наши дни. Оттого уже упомянутый выше опытный Б.П. Синюков, не доверяя Акту [1], в котором записано, что на момент аварии гидроагрегат №2 находился в работе, рассматривает версию гидроудара при неработающем ГА-2.

В Акте технического расследования [1] записано: «Авария произошла из-за совокупности различных причин». Конечно, причин может быть несколько, причем каждая в той или иной степени приводила к увеличению риска аварии. Это неудачные проектные решения в самой плотине, это конструктивные и технологические дефекты, заложенные в ГА-2, это нарушение требований безопасной эксплуатации, нажим «сверху», эксплуатационные дефекты и т.д. В этой связи снова вспоминаются слова известнейшего эксперта, инженера-

механика, ученого Джеймса Гордона: «Причины любой катастрофы лежат на двух уровнях. Первый связан с непосредственными механическими или технологическими факторами, второй – с факторами субъективного характера... Мой опыт привел меня к убеждению, что лишь немногие из катастроф случаются сами по себе на морально нейтральной почве... Причинами гибели людей в авариях являются ... грехи: "не знал", "не побеспокоился", "не спросил", "вы ничего мне не сказали", "не подумал", гордыня, зависть и жадность, легкомыслие и бездеятельность» [2]. Заканчивая перечень возможных причин, нельзя не упомянуть дурака – вспомните «дураки и дороги» – и террористический акт, учитывая грандиозность сооружения и возможные последствия.

Однако в Акте любого подобного технического расследования всегда следует выделить основную причину [3], которая непосредственно запустила механизм аварии. Конечно, находясь далеко от места событий и не имея достаточной информации, нельзя с уверенностью указывать основную причину аварии, как это случилось в [4], тем более без описания механизма разрушения, опираясь только на знание слабого звена в турбине. Но иметь свою точку зрения на материалы технического расследования очень даже можно и нужно.

Кроме того, важно отметить, что механические разрушения элементов конструкции гидроагрегатов станции происходили регулярно [4]. В результате рассматриваемой аварии также произошли механические разрушения ГА-2 и сопряженных с ним сооружений. В этой связи особенно странным, является то, что в списке ответственных лиц СШГЭС, приведенном в Акте технического расследования [1] и состоящем из девятнадцати человек, нет ни одного инженера-механика, который бы мог в соответствии со своей компетентностью принять ответственное решение, например, о недопустимости эксплуатации неисправного агрегата. Таких лиц на станции не оказалось. Весьма странная кадровая политика. Все ответственные решения принимались инженерами-электриками (пусть даже самыми квалифицированными), но не механиками. И это происходило несмотря на то, что механика регулярно посылала «приветы»

– опаснейшая авария 13 сентября 1981 г., весьма частый и на протяжении многих лет ремонт направляющего подшипника турбины, усиливающаяся вибрация элементов конструкции ГА-2, в несколько раз превышающая допустимый уровень, и т.п. [4]. Квалифицированный инженер-механик, наделенный соответствующими полномочиями для принятия решений, не только не допустил бы разрушения гидроагрегата, но и не позволил бы эксплуатировать его в таком аварийном режиме и с такой вибрацией.

### **3. Постановка задачи**

Авторы настоящей статьи, хотя не являются специалистами по гидроэнергетике, не могли остаться равнодушными и попытались на основании объективных законов природы оценить достоверность выдвинутых версий. Кроме того, в меру своей компетентности, используя известные материалы, хотели бы не только найти физический смысл произошедших событий, но также извлечь уроки и сделать соответствующие выводы. Уверены, так поступали многие, в ком не иссякла энергия к познанию, не притупилось стремление к совершенствованию, кто хочет постоянно оставаться «в форме». Потому с полок некоторых библиотек на время исчезли доселе не самые популярные книги, например, [5].

### **4. Основной материал**

Остановимся на двух реально возможных версиях причин аварии, а именно:

- усталостное разрушение шпилек крышки крепления турбины и влияние прецессии;
- гидравлический удар.

#### **4.1 Усталостное разрушение шпилек и влияние прецессии**

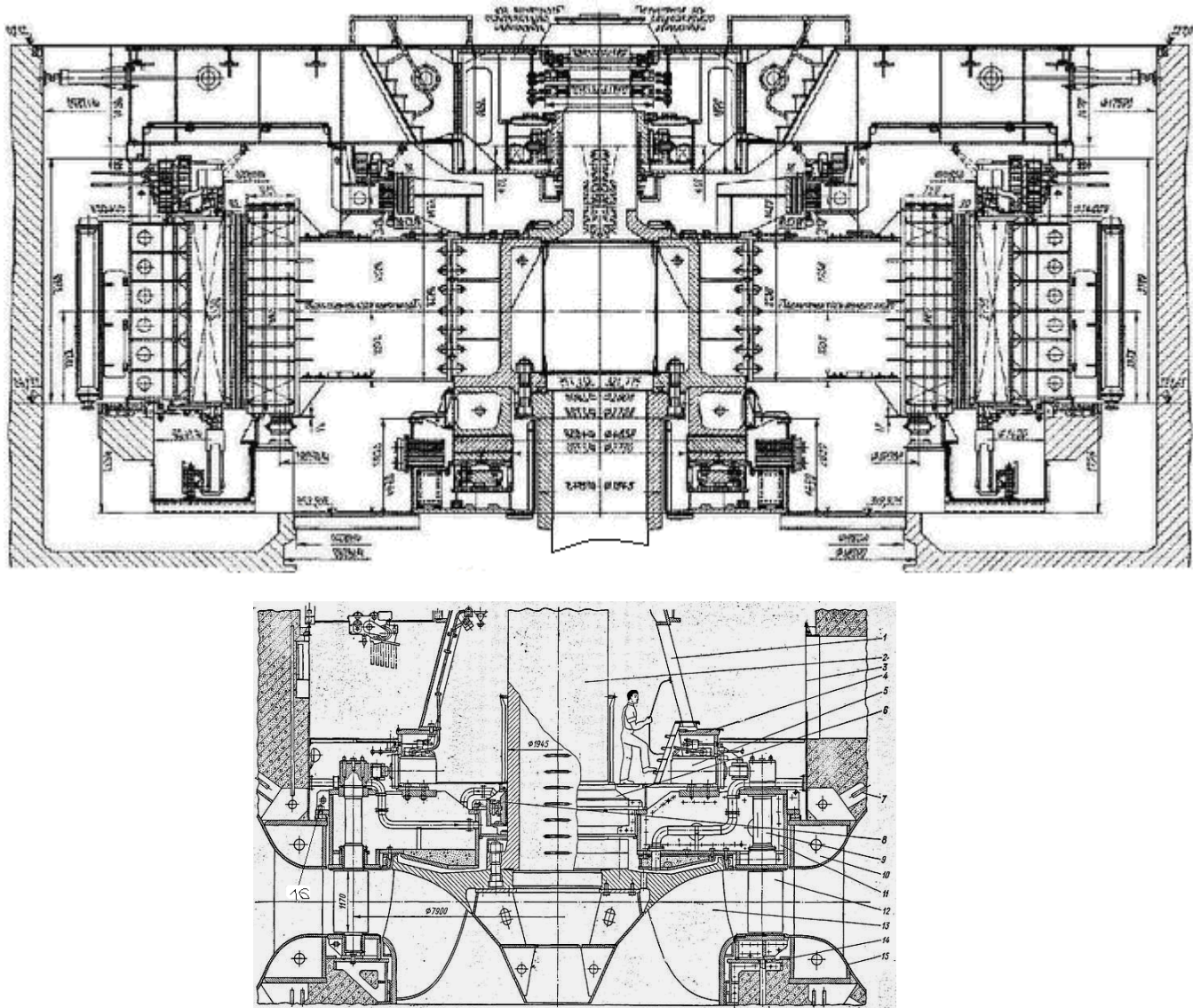
На протяжении всей эксплуатации гидроагрегата №2 из-за систематических колебаний, вызванных вращением ротора (рис. 4 сверху), а также рабочего колеса турбины (см. рис.4 внизу), установленных пусть даже с

допустимой погрешностью, и связанных с этим циклических нагрузений, происходил естественный длительный процесс зарождения и развития усталостных трещин в опорных элементах конструкции. Такие усталостные разрушения происходили, в том числе, и в шпильках крепления крышки турбины (80 шт. диаметром 80 мм), установленных по ее периметру. Развитие этих трещин, наряду с износом подшипников, особенно нижнего направляющего подшипника турбины из-за недостатков его конструкции [4], приводило, в свою очередь, к возрастанию радиальных вибраций корпуса турбинного подшипника и биению вала (до 0,6-0,7 мм). В последний месяц работы отмечались и более значительные вибрации. Нередко биение вала турбины составляло 2,0 мм [4]. Подобные отклонения вала (оси вращения) приводят к прецессии и возникновению гироскопических сил, вызывающих так называемые колебания «шимми». Постепенно усталостные трещины достигали критической длины, и происходил долом отдельных шпилек. Причем долом при усталостном разрушении никак не связан с максимальной нагрузкой.

Удивительно, что, наблюдая такой характер работы гидроагрегата, на станции не производилась предремонтная диагностика несущих элементов конструкции и выбраковка тех элементов, которые достигли своего предельного состояния [6]. А иначе как можно было допустить столь значительные усталостные трещины. Например, из приведенного в Акте [1] анализа сорока девяти шпилек, из восьмидесяти установленных на крышке турбины, в двадцати четырех из них усталостные разрушения составляли более половины площади сечения. (Еще одиннадцать шпилек имели усталостные трещины, которые привели к раскрытию сечения не менее чем на 20 %). Принимая во внимание, что на шести шпильках отсутствовали гайки [1], понимаешь не только степень безответственности, но и оцениваешь тот запас прочности конструкции, который был заложен при проектировании гидротурбины.

Важно отметить, что усталостные разрушения шпилек несомненно повлияли на прочность крепления гидроагрегата, но механизм разрушения

шпилек нельзя объяснить только усталостью без анализа пластичного разрушения шпилек крепления. Тем более что вибрация гидроагрегата не могла не передаваться на двухсотметровый столб воды, что при определенных условиях могло привести к резонансу, который мог вызвать пластическое разрушение шпилек.



**Рис. 4** – Гидроагрегат СШГЭС (сверху – генератор; внизу – турбина)

(8 – направляющий подшипник; 12 - лопатки направляющего аппарата; 13 – рабочее колесо; 16 – шпилька крышки крепления турбины)

Можно предположить, что 17.08.2009 «в 08.13 при очередном снижении мощности гидроагрегата № 2 и входе в зону его эксплуатационной характеристики, не рекомендованной к работе» [1], произошло разрушение



направляющего подшипника и последовавшее затем полное разрушение большой части шпилек крышки турбины. Эти разрушения могут быть связаны с ростом гироскопического момента сил, и возрастанием автоколебаний «вобблинг». Это явление хорошо известно авиаторам, так как часто приводило к разрушению колес и стоек шасси. Знакомы с этим и мотоциклисты, называя неуправляемые колебания руля: кто – «пошел в разнос», кто – «расколбасом». Отличие последних примеров от рассматриваемого нами заключается лишь в том, что моменты инерции «маховиков» несопоставимы да плоскости вращения различны. Но законы физики остаются неизменными для всех подобных случаев.

Оценим возможность влияния момента гироскопических сил на разрушение крепления крышки турбины и разгерметизацию водовода. Для этого найдем усилия, возникающие в подшипниках вала турбины при биении последнего  $\Delta = 2$  мм, а также усилия, возникающие при вынужденной прецессии вала (рис. 5). Вал будем рассматривать как 3-х опорную неразрезную балку с внешней нагрузкой в виде сосредоточенного момента  $M$  на второй опоре, возникающего из-за смещения оси вала ( $M^*$ ) и гироскопического момента ( $M^{**}$ ) вследствие вынужденной прецессии. Приняв расстояние между подшипниками равным 6 м, составим уравнение трех моментов. Тогда получим

$$M_1 \cdot 6 + 2 \cdot M_2 \cdot 6 + M_3 \cdot 6 = 6 \cdot M \cdot 3/2.$$

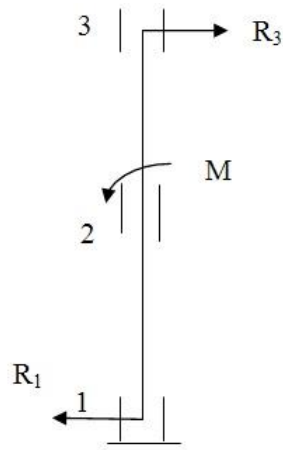
Так как пролёты не нагружены, то  $M_1 = 0$ ,  $M_3 = 0$ . Тогда, решая это уравнение, получаем усилия на нижней и верхней опорах  $R_1 = R_3 = M/12$  Н.

Момент силы веса,  $M^*$ , возникающий при биении вала турбины  $\Delta = 2$  мм, составит

$$M^* = 0.5 \cdot m \cdot g \cdot \Delta = 0.5 \cdot 900 \cdot 10^3 \cdot 9.81 \cdot 2 \cdot 10^{-3} = 8829 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

где  $m$  – масса ротора ГА-2 ( $m = 900 \cdot 10^3$  кг).

Усилия, возникающие на верхней и нижней опорах, составят всего  $R_1 = R_3 \approx 750$  Н.



**Рис. 5** – Расчетная схема

Рассмотрим случай вынужденной прецессии.

Гироскоп имеет свойство сохранять направление оси своего вращения. При изменении положения оси в пространстве возникает момент гироскопической реакции. Если учесть, что вал турбины вместе с ротором представляет собой гироскоп, то биение вала можно рассматривать как вынужденную прецессию с угловой скоростью  $\omega_2 = 0,2 \text{ с}^{-1}$ . Угловая скорость собственного вращения гироскопа  $\omega_1 = 15 \text{ с}^{-1}$ . Момент инерции ротора, считая, что масса последнего равномерно распределена по его объёму, определяется по формуле

$$J = m \cdot D^2 / 8.$$

Подставляя имеющиеся значения, получим

$$J = 900 \cdot 10^3 \cdot D^2 / 8 = 900 \cdot 10^3 \cdot 13^2 / 8 = 190 \cdot 10^5 \text{ кг} \cdot \text{м}^2.$$

Учитывая, что вектора  $\omega_1$  и  $\omega_2$  взаимно перпендикулярны, гироскопический момент  $M^{**}$  равен

$$M^{**} = J \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 = 190 \cdot 10^5 \cdot 15 \cdot 0,2 = 570 \cdot 10^5 \text{ Н} \cdot \text{м}.$$

Усилия, возникающие в этом случае на опорах, могут достигать значительных величин  $R_1 \approx 50 \cdot 10^5 \text{ Н}$ .

Эти усилия способны повлиять на прочность шпилек крепления, но только не всех сразу. Кроме того, момент гироскопических сил не способен

вызвать подъем всего гидроагрегата на уровень пола машзала станции (рис. 6).  
Значит, прецессию нельзя считать основной причиной рассматриваемой аварии.

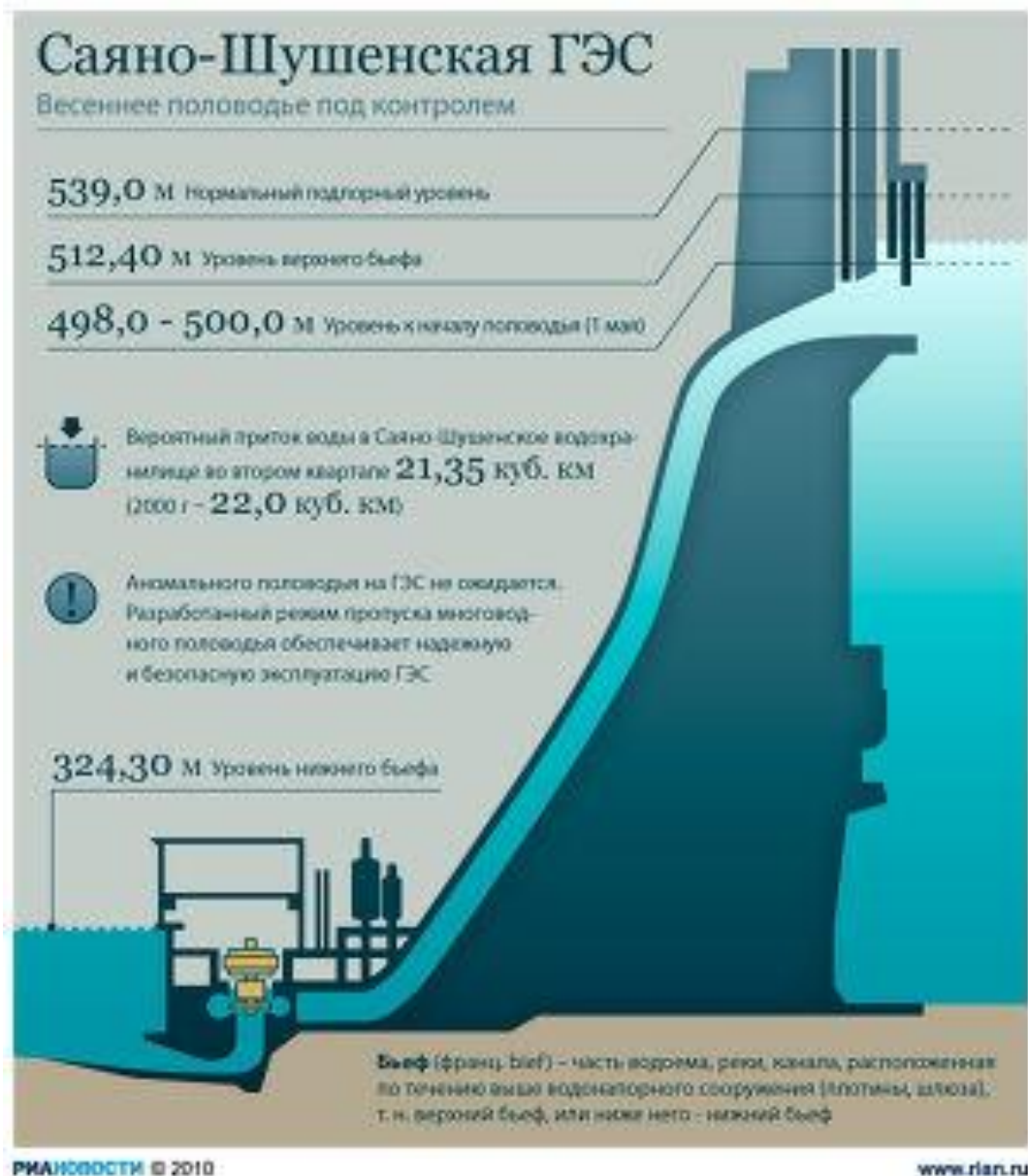


**Рис. 6** – ГА-2 после аварии (<http://bigpicture.ru/?p=4962>)

#### 4.2. Версия гидравлического удара

Гидравлический удар представляет собой кратковременное, но резкое и сильное повышение давления в водоводе при внезапном торможении движущегося по нему потока жидкости. Влияние гидроудара особенно заметно в жёстких трубопроводах при большой скорости потока. В условиях СШГЭС это армированный железобетонный водовод диаметром 7,5 м (в месте стыка со спиральной камерой – 6,5 м) с напором воды в 200 м (рис. 7).

Гидравлический удар при работающем гидроагрегате может быть вызван внезапным препятствием, возникшим перед столь мощным потоком. Такое препятствие может быть образовано, например, лопатками направляющего аппарата (см. рис. 4., поз.12), которые при сбое в работе оказались установленными в положении, перекрывающем поток. Т.е. по аналогии с п. 4.1 можно предположить, что 17.08.2009 «в 08.13 при очередном снижении мощности гидроагрегата № 2 и входе в зону его эксплуатационной характеристики, не рекомендованной к работе» [1], произошло несанкционированное перекрытие потока воды лопатками направляющего аппарата.



**Рис. 7** – Поперечный разрез плотины и станции

<http://tayga.info/details/2010/10/27/~100761>

Повышение давления при гидравлическом ударе рассчитаем по формуле Жуковского:

$$\Delta P_{уд} = \rho \cdot \Delta v \cdot c,$$

где  $\Delta P_{уд}$  – скачок давления;

$\rho = 10^3 \text{ кг/м}^3$  – удельная плотность жидкости;

$\Delta v = \sqrt{2gh} = \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 200} = 60 \text{ м/с}$  – произошедшее изменение скорости;

$h = 200 \text{ м}$  – высота плотины;

$c$  – скорость распространения ударной волны.

В свою очередь, скорость распространения ударной волны определяется по формуле:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\rho\beta + \frac{2\rho r}{\delta E}}},$$

где  $\beta$  – показатель сжимаемости жидкости. Для рассматриваемой задачи принято  $\beta = 0$ ;

$r = 3,25$  м – внутренний радиус трубы;

$\delta = 1,2$  м – толщина стенок трубы;

$E = 2 \cdot 10^{11}$  Н/м<sup>2</sup> – модуль упругости материала трубы (модуль Юнга).

Тогда 
$$c = \frac{1}{\sqrt{\frac{2 \cdot 10^3 \cdot 3,25}{1,2 \cdot 2 \cdot 10^{11}}}} = 0,6 \cdot 10^4 \text{ м/с};$$

$$\Delta P_{y\delta} = 10^3 \cdot 60 \cdot 0,6 \cdot 10^4 = 3,64 \cdot 10^8 \text{ Н/м}^2.$$

Такое давление действительно может вызвать небывалые разрушения. А повторяющаяся из-за пульсации потока (вспомните поведение водопровода при неудовлетворительно работающем кране) волна только множит беду.

Конечно, силу гидроудара снижает частичное заполнение трубы, а также утечки вследствие неплотного перекрытия сечения. Но и части расчетного усилия хватит для подобного разрушения. При этом даже не надо учитывать то, что рабочее колесо турбины, погруженное в воду, продолжая вращаться по инерции, превращается в гребной винт с приличной тягой, способной порвать ни одну шпильку крышки крепления турбины.

## **Выводы**

Анализируя произошедшую на СШГЭС аварию и Акт технического расследования [1], можно и важно сделать выводы, которые должны быть полезны для украинской гидроэнергетики и не только:

- Авария высветила весь спектр потенциальных угроз и проблем (в т.ч. связанных с возведением и эксплуатацией гигантских гидросооружений [7]), которые требуют не только постоянного внимания, но и тщательного исследования;

- Авария произошла в соответствии с законами механики, в том числе гидромеханики и механики разрушения, и ничего сверхъестественного при этом не было задействовано;

- Акт расследования [1] не заслуживает положительной оценки. В нем неверно определена основная причина разрушения гидроагрегата, не приведен механизм разрушения, не показана причинно-следственная связь произошедших событий (от возникновения аварийной ситуации до разрушения станции).

- На СШГЭС, несмотря на многочисленные отказы и разрушения механических устройств гидроагрегатов, недостаточно внимания уделялось механике. Так, из всех приведенных в Акте девятнадцати ответственных лиц только один человек (начальник «службы экономической безопасности и режима») имел квалификацию инженера-механика по специальности «автомобильная техника».

- Высококвалифицированный специалист, горный инженер-механик, настоящий (по определению Пола Джонсона [8]) эксперт, Б.П. Синюков за меньший срок сделал в части расследования этой аварии несравненно больше, чем правительственная и парламентская комиссии вместе взятые. Подумать только, как бездарно расходуются средства – деньги налогоплательщиков! Это лишний раз доказывает преимущество и необходимость проведения независимого (без оглядки на властную вертикаль) честного профессионального технического расследования. В этой связи хорошо бы создать Объединение независимых (негосударственных) технических экспертов.

- На каждом объекте повышенной опасности ответственные решения, связанные с эксплуатацией потенциально опасного оборудования, должны

приниматься, в том числе, компетентными инженерами-механиками, хорошо знакомыми с вопросами механики разрушения.

- Для повышения квалификации инженерно-технических работников, связанных с эксплуатацией гидросооружений, необходимо организовать неформальное систематическое изучение основ гидромеханики, механики разрушения и технического диагностирования.

- Включить дисциплины «Гидромеханика», «Основы механики разрушения» и «Основы технического диагностирования» в учебные программы ВУЗов, выпускающих инженеров-электромехаников соответствующих специальностей.

#### **Список использованных источников:**

1. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого Акционерного Общества «РусГидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного»

2. Гордон Дж. Конструкции или почему не ломаются вещи / Дж. Гордон ; пер. канд. физ.-мат. наук В. Д. Эфроса ; под ред. д-ра. техн. наук, проф. С Т. Милейко. – М. : Мир, 1980. – 230 с.

3. Настольная книга работодателя. Руководство по охране труда / В. Н. Иванов [и др.]. – 2-е изд., перераб. и доп. – Харьков: Форт, 2008. – 310 с.

4. Мищенко Б. И. Причины аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, вытекающие из анализа Акта технического расследования / Б. И. Мищенко // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 25–31.

5. Справочник по гидротурбинам / под общ. ред. Н. Н. Ковалева. – Л.: Машиностроение, 1984. – 496 с.

6. Иванов В. М. Технічне діагностування підйимально-транспортних машин : навч. посіб. / В. М. – Х.: Форт, 2010. – 276 с.

7. Версия профессора Владимира Тетельмина : Плотина СШГЭС напоззла на машинный зал // Гідроенергетика України. – 2010. – № 3. – С. 40–45.

8. Johnson P. E. What kind of expert should a system be? / P. E. Johnson // The Journal of Medicine and Philosophy. –1983. – Vol. 8. – P. 77–97.

*P.S.* Авторы благодарят студента Дудаша Р.В. за помощь при подготовке рисунков к публикации.

***Иванов В.Н., Седов И.Б., Иванов А.В.*** «О причинах и уроках аварии, произошедшей на Саяно-Шушенской ГЭС 17.08.2009»

Дан анализ возможных причин аварии гидроагрегата СШГЭС, рассмотрены уроки аварии.

***Ключевые слова:*** анализ, авария, плотина, турбина, усталость, прецессия, гидравлический удар.

***Иванов В.М., Седов И.Б., Иванов А.В.*** «Про причини та уроки аварії, що відбулася на Саяно-Шушенській ГЕС 17.08.2009»

Наведено аналіз можливих причин аварії гідроагрегата СШГЭС, розглянуті уроки аварії.

***Ключові слова:*** аналіз, аварія, гребля, турбіна, втома, прецесія, гідравлічний удар.

***Ivanov V.N., Sedov I.B., Ivanov A.V.*** “About the reasons and lessons of accident that was happened at the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station”.

The analysis of the possible causes of the accident generating unit of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric power station is given, the lessons of accident are considered.

***Key words:*** analysis, accident, dam, turbine, fatigue, precession, hydraulic shock.

Стаття надійшла до редакції 2 листопада 2010 р.