

### Загадки Саяно-Шушенской катастрофы.

По результатам официального расследования причин аварии на Саяно-Шушенской ГЭС, унесшей жизни 75 человек и на длительный срок погасившей самую мощную в стране электростанцию, вместо ожидаемых ответов возникла масса вопросов.

Так, основной причиной аварии комиссией Ростехнадзора и парламентской комиссией названа усталость металла шпилек крепления крышки турбины на гидроагрегате станционный № 2 (ГА-2). Якобы, усталость металла накопилась вследствие повышенной горизонтальной (радиальной) вибрации турбинного подшипника. При этом не объяснено, почему при горизонтальной вибрации (колебании шпилек относительно неподвижной точки - внизу по выходе резьбы из опорного статорного кольца) излом шпилек оказался не внизу, как следовало ожидать, а вверху под гайкой.

Почему на поверхностях изломов шпилек имеются следы т.н. «цветов побежалости», характерных только для «свежих» поверхностей разрывов металла, а не для поверхностей при длительном разрыве.

Почему на всех разорванных шпильках магистральные (лидерные) трещины имеют тангенциальную направленность (по направлению вращения ротора).

По заключению комиссий ротор гидроагрегата давлением воды «был выброшен» из шахты. При этом не потрудились объяснить, почему самая габаритная и самая массивная часть конструкции ротора – обмотка ротора электрогенератора - оказалась не вверху, а в самом низу в статоре турбины. И если давлением из шахты был выброшен ротор массой около двух тысяч тонн, то почему большая часть фрагментов разрушенных конструкций, находившихся на уровне устья шахты турбины, оказалась внизу в отсасывающей трубе.

По официальному заключению одновременно с разрывом шпилек «вода начала поступать в машинный зал станции». А фактически только спустя две минуты и восемь секунд после указанного комиссиями момента разрыва шпилек вода не «начала поступать», а ударила мощным фонтаном из шахты турбины.

Это далеко не полный перечень не объясненных комиссиями фактов и реальных событий, случившихся при аварии. В итоге, по представленным результатам официального расследования загадочность трагедии на Саянах стала равноценной загадкам произошедшей неподалеку сто лет назад Тунгусской катастрофы.

Прежде всего, надо ответить на главный вопрос, почему авария на одном гидроагрегате не локализовалась только в его собственной автономной ячейке, оставаясь просто аварией одного агрегата. Почему она развилась до масштабов техногенной катастрофы с внезапным затоплением машинного зала станции до самой верхней отметки и гибелью большого количества людей. Почему после выхода турбины из своей рабочей камеры и полного освобождения слива воды вниз (под уровень нижнего бьефа) спустя две минуты и восемь секунд после начала аварии из шахты турбины ударил мощный фонтан, снесший три пролета перекрытия и внезапно накрывший машинный зал столбом воды высотой восемь метров.

Ответ на этот вопрос изображен на рисунках 1,2,3. [1].



Рис. 1



Рис. 2



Рис. 3

На рис. 1 положение обода ротора электрогенератора, упавшего в разрушенную вращающимся ротором гидроагрегата шахту турбины.

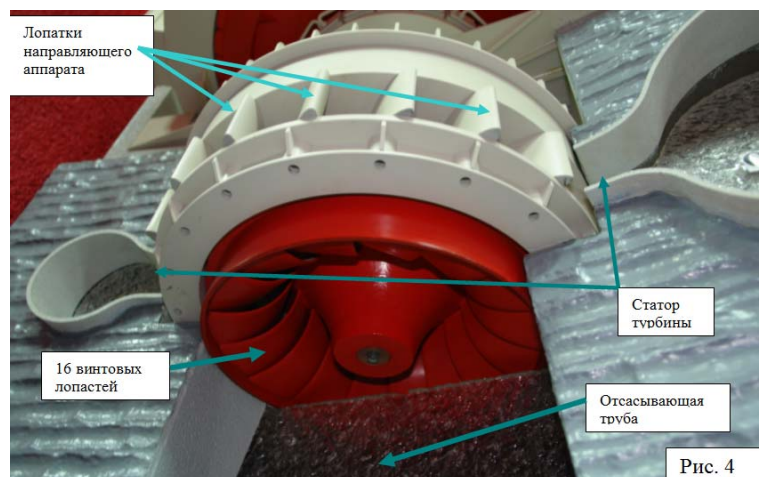
На рис. 2 видно, что часть нижнего торца обода со стороны левого берега почти наполовину перекрыла слив воды в отсасывающую трубу. А поток воды из статора турбины через указанные стрелками окна, имея горизонтальное направление, но, упёршись во внутреннюю стенку обода, изменил направление на вертикальное вверх.

На рис. 3 виден объем разрушения шахты турбины. Железобетонный массив, обрамляющий шахту, раздолблен в форме воронки почти до самого статора турбины. От металлической облицовки шахты осталось только нижнее кольцо, примыкающее к статору турбины. Видно, что часть нижнего торца обода, вклинившись в статор турбины, деформировалась. На извлеченном из статора фрагменте обода четко просматриваются следы от потока воды.

По объему и форме разрушения устья шахты турбины видно, что ротор гидроагрегата, выйдя из шахты и, оставаясь во вращении, сравнительно длительное время (из промежутка времени в 2 мин. и 8 сек.) находился на отметке, на которой лопатки направляющего аппарата (НА) турбины задевали за берега устья шахты. Именно лопатками НА и был раздолблен железобетонный массив шахты турбины. При раздалбливании лопатки ломались по своим верхним цапфам. (Диаметр цапф в месте излома - 360 мм.). Отломлены все 20 лопаток. Примечательно, что на отметках выше устья шахты остались не все отломленные лопатки. Большинство лопаток упали в отсасывающую трубу. Это является ещё одним свидетельством того, что в период времени пока ротор агрегата, вращаясь, раздалбливал устье шахты, вода из шахты в машинный зал фонтаном не поступала. Наоборот, она закрученным потоком уходила в освободившийся слив через отсасывающую трубу в нижний бьеф. А фонтан из шахты ударил только после того, когда обод ротора генератора, упав, своим нижним торцом вклинился в статор турбины с наклоном под углом 45 градусов.

При аварии было сорвано крепление крышки турбины (шпильки с гайками), и ротор гидроагрегата вышел из шахты. Чтобы понять причину срыва крепления и выхода ротора необходимо остановиться на некоторых особенностях конструкции и принципа действия гидротурбины ГА-2 – рис. 4.

Турбина радиально-осевая (РО). Поток воды из статора турбины через каналы, образованные лопатками направляющего аппарата, входит на лопатки турбины в радиальном направлении. Далее поток уходит вдоль оси турбины вниз. При такой конструкции турбина является активно-реактивной. Верхняя часть турбины, где поток имеет радиальное направление, - это активная часть турбины. Работа этой части подобна работе обычной водяной мельницы. На этой части срабатывается скоростная доля энергии потока воды, падающего с верхнего бьефа.



При движении вдоль оси вниз поток давит на лопатки. От этого давления за счет изгиба лопаток на каждой лопатке возникает тангенциальная реактивная сила, вращающая ротор. Эта часть турбины является реактивной частью. На этой части срабатывается доля энергии потока от давления воды.

Активная верхняя часть всегда работает в турбинном режиме. Нижняя же реактивная часть имеет свойство обратимости.

Турбина вращает генератор, вырабатывающий электрический ток частотой 50 Гц. Частота при любой нагрузке генератора должна оставаться постоянной, поэтому и частота вращения (угловая скорость) турбины должна быть постоянной  $\omega = 142,8$  об/мин. При малом расходе воды через турбину (при малом раскрытии лопаток НА) скорость движения воды в межлопастных каналах турбины снижается. При понижении скорости в межлопастных каналах до величины меньшей величины линейной скорости движения лопастей при скорости вращения  $\omega = 142,8$  об/мин. поток начинает уже не давить на лопасти сверху, а, наоборот, прижиматься к лопастям снизу. На лопастях, начиная с их периферийной части, появляется тангенциальная реактивная сила уже не вращающая ротор, а, наоборот, тормозящая его вращение. Эта же сила имеет составляющую, направленную вверх. Кроме того, «заторможенный» в межлопастных каналах поток начинает давить и на верхний обод (ступицу) рабочего колеса снизу. На турбине появляется отрицательная - подъемная сила. (При работе гидротурбины все силы, направленные вниз, считаются положительными).

Нижняя часть, начиная с периферийных кромок лопастей, начинает работать не как турбина, а как осевой насос, как гребной винт.

При входе турбины в эту зону подъемная сила переменная по величине, поэтому на турбине возникает вертикальная и горизонтальная вибрация.

Обратимость реактивной части сильно сужает рабочую (регулируемую) зону радиально-осевых турбин.

Величина подъемной силы возрастает при снижении расхода воды через турбину и имеет максимальное значение в случае, когда лопатки направляющего аппарата полностью закрыты, а турбина продолжает вращаться.

Для приблизительной оценки максимальной величины подъемной силы представим, что каждая лопасть в реактивной части турбины имеет форму плоской пластины площадью  $S = 2\text{ м}^2$ , наклоненной к горизонту на  $45^\circ$ . «Центр тяжести» пластины отстоит от вертикальной оси турбины на 3 метра ( $r=3\text{ м}$ ). Турбина вращается со скоростью  $n=142,8$  об/мин. Лопатки направляющего аппарата закрыты, турбина вращается в «стоячей» воде. Сила сопротивления воды вращению турбины ( $F$ ) на одной лопасти будет составлять:

$F = \varphi \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2}$ , где  $\varphi$  - коэффициент, учитывающий «угол атаки» лопасти.

$\varphi = \sin 45^\circ = 0,7071$ ;  $\rho = 1000 \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}$  - удельная плотность воды;  $v$  - линейная скорость движения

лопасти -  $v = \frac{2 \cdot \pi \cdot r \cdot n}{60} = 44,8 \frac{\text{м}}{\text{сек}}$ .

При таком угле атаки сила сопротивления воды равна подъемной силе:

$$F = \varphi \cdot S \cdot \frac{\rho \cdot v^2}{2} = 0,7071 \cdot 2 \cdot \frac{1000 \cdot 44,8^2}{2} = 1419178 \text{ Н} = 144715,9 \text{ кгс} = 144,7 \text{ тс}.$$

Суммарная подъемная сила, образующаяся при вращении турбины, имеющей 16 лопастей, в «стоячей» воде будет равна:  $144,7 \cdot 16 = 2315,2 \text{ тс}$

Аналогичный эффект с возникновением подъемной силы на турбине вызывает и резкий сброс полезной нагрузки (активной мощности) с генератора.

В любой момент работы гидроагрегата существует следующее равенство:

$$M_{\text{ос}} = M_c + J \frac{d\omega}{dt}, \text{ где } M_{\text{ос}} - \text{движущий момент на турбине; } M_c - \text{полезная нагрузка -}$$

основная составляющая момента сопротивления;  $J$  - момент инерции ротора гидроагрегата;  $\omega$  - угловая скорость вращения ротора.

Если в процессе работы гидроагрегата под нагрузкой произойдет уменьшение полезной нагрузки (активной мощности), то равенство сразу же нарушится. Избыток движущего момента над моментом сопротивления пойдет на увеличение составляющей  $J \frac{d\omega}{dt}$ . Но так как момент

инерции ротора является величиной постоянной, то произойдет только увеличение  $\frac{d\omega}{dt}$ , а, следовательно, и числа оборотов в единицу времени. Произойдет увеличение линейной скорости движения лопастей относительно скорости движения воды в межлопастных каналах турбины, что также повлечет за собой появление подъемной силы на турбине.

Изменение движущего момента  $M_{об}$  связано с изменением расхода воды через турбину, а момент сопротивления  $M_c$  имеет электромагнитную природу. Процесс изменения  $M_{об}$  намного медленней, чем процесс изменения  $M_c$ . Поэтому, чтобы не допускать резкого увеличения скорости вращения турбины скорость изменения полезной нагрузки  $M_c$  на генераторе должна быть ограничена. Для турбины ГА-2 СШГЭС такое ограничение составляет 30 МВт/сек.

Очень важно, чтобы процессы уменьшения расхода воды и уменьшения полезной нагрузки на генераторе были строго синхронны. Если эти процессы не совпадают по времени, то подъемная сила вследствие уменьшения расхода воды и подъемная сила вследствие увеличения скорости вращения суммируются. В этом случае не исключено возрастание подъемной силы до величины веса ротора гидроагрегата. Возможен подъем-всплытие ротора агрегата.

Подъем роторов гидротурбин наряду с разгоном гидротурбин является одним из основных факторов опасности при их эксплуатации. От разгона гидротурбин защита есть, от подъема роторов защиты нет. И совершенно непонятно, по каким причинам ни одна из комиссий версию подъема ротора ГА-2 не рассматривала. (Тоже - загадка, ведь было заявлено, что в комиссии входили самые лучшие и самые высокие специалисты).

С учетом таких особенностей работы турбины ГА-2 причины аварии становятся очевидными. Утром 17 августа 2009 года при регулировании частоты и мощности в энергосистеме Сибири и Дальнего Востока (с учетом перетоков в Европейскую часть страны через Казахстан) ГА-2 СШГЭС трижды выводился на такой режим работы, когда подъемная сила вследствие уменьшения расхода воды через турбину и подъемная сила вследствие увеличения скорости вращения при резком сбросе нагрузки были разнесены по времени и суммировались.

На третьем выходе на такой режим датчики регистрации состояния агрегата зафиксировали подъем ротора на высоту, при которой вращающиеся его части начали задевать за неподвижные части на крышке турбины.

На рис. 5 представлен этот последний выход на такой режим. В момент, когда лопатки НА прикрылись уже на 57%, с генератора ударно сбрасывается более чем 100 МВт активной мощности. (Вместо допустимой скорости снижения 30 МВт/сек.). Через одну секунду датчик вертикальной вибрации, установленный на опоре подпятника, фиксирует касание рабочего колеса турбины неподвижных частей крышки турбины, что свидетельствует о всплытии ротора агрегата.

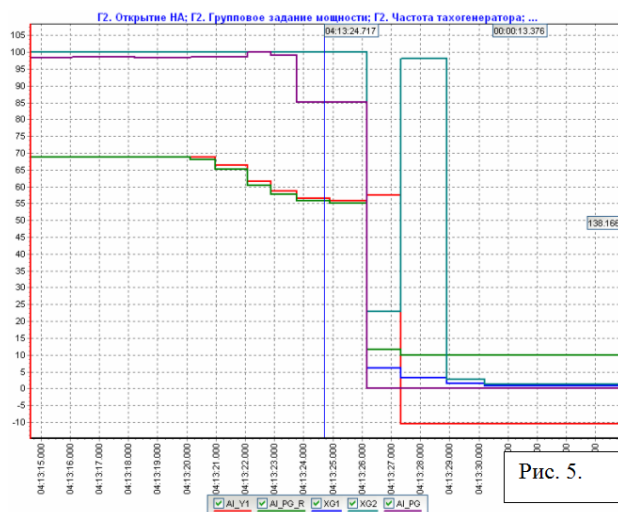


Рис. 5.



Все разрушения в пределах своей ячейки, начиная с крепежа крышки турбины, произведены всплывшим вращающимся ротором агрегата. Последующий фонтан из шахты турбины разрушил только стены и перекрытие трёх пролетов машинного зала станции и внезапно затопил его.

Более подробная реконструкция событий утра 17 августа 2009 года со ссылкой на конкретные факты и документы приведена в прежних выступлениях автора. [2], [3].

С сожалением и тревогой приходится констатировать, что по результатам официального расследования причина аварии на СШГЭС с её развитием до масштабов техногенной катастрофы, с гибелью людей не установлена.

Не извлечен урок из случившегося.

Не сделаны необходимые выводы из этой трагедии.

Всё оставлено на уровне «как всегда».

Президент России, 2009 год:

- Август 28. 2009: *«Нам нужно сделать все необходимые выводы из того, что произошло. В-первых, нам нужно довести до конца все процедуры расследования, которые в настоящий момент начаты. Я имею в виду и технологическое расследование причин аварии, почему это произошло, что явилось основным фактором, что явилось побочным фактором. И второе - провести следствие в соответствии с уголовно-процессуальным законом, понять, есть ли лица, которые виновны в произошедшем. Это очень важно и с точки зрения текущей жизни, и для будущего».*

- Декабрь 14.2009: *«Наша задача очевидна: мы должны сделать все, чтобы трагедии такого рода не повторились. Это ответственность правительства».*

И эти указания Президента, к великому сожалению, остаются пока только словами. **«Очевидная наша задача»** не будет решена без определения истинных причин аварии на СШГЭС. **«Ответственность правительства»** (ответственность за техническую безопасность в электроэнергетике, за сохранность жизни людей, управляющих энергоагрегатами на станциях, в конечном итоге за энергетическую безопасность страны) с правительства не снята, но её не видно.

Впереди выборы в Государственную Думу. Для надежности и безопасности в электроэнергетике было бы необходимым, чтобы новая Дума поставила целью выполнить те указания Президента. Вернуться к рассмотрению сложившейся в энергетике ситуации, приведшей к техногенной катастрофе. На законодательном уровне сделать необходимые выводы с последующим принятием действенных мер.

Ссылки:

1. <http://www.sshges.rushydro.ru/press/fotoarchive/chronicles/repair>
2. «Фонтан над Саяно-Шушенской ГЭС»  
<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=5201>
3. «Об организационно-технических причинах аварии на СШГЭС, развившейся до масштабов техногенной катастрофы» <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6191>

Геннадий Рассохин, энергетик.  
17 августа 2016 г.