



# Иерихон на Енисее

Юрий ЛОБАНОВСКИЙ,

начальник отдела анализа нормативно-справочной информации, разработки баз знаний и классификации НЦИТ «ИНТЕРТЕХ», к.ф.-м.н. (Санкт-Петербург)

**Расследование катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС с самого начала сопровождалось заявлениями официальных лиц, в том числе и главы Ростехнадзора, что произошло нечто необъяснимое.**

**Однако в опубликованном спустя полтора месяца после катастрофы акте технического расследования комиссии Ростехнадзора ни о чем загадочном уже не упоминается. Там просто и незатейливо говорится о том, что «вызванные динамическими нагрузками разрушения шпилек привели к срыву крышки турбины и разгерметизации водоподводящего тракта гидроагрегата». Но что же на самом деле стало причиной одной из крупных техногенных катастроф новейшей истории России?**

При всей безбрежной широте и неопределенности понятия «динамические нагрузки», некритическое восприятие «Акта» неизбежно приводит к представлению о том, что под действием аномальной вибрации второго гидроагрегата на части шпилек крепления турбинной крышки отвинтились гайки, часть ослабленных усталостными разрушениями шпилек была срезана, а остальные были оторваны силой давления воды, движущейся под крышкой практически в своем обычном режиме. Все просто. Предпосылки катастрофы – некачественный ремонт второго гидроагрегата, пожар на Братской ГЭС и... Чубайс.

Однако материальные следы «загадочного» вылета ротора второго гидроагрегата из турбинного колодца запечатлены на ближайшей к агрегату бетонной колонне – четвертой опоре подкранового пути (фото). Так что, несмотря на некоторую экстравагантность заявлений главы Ростехнадзора о полетах второго гидроагрегата, за этими словами скрываются действительно произошедшие события. Высота опоры – 11,5–12 м, высота подъема гидроагрегата, которая не может быть меньше этих значений, по словам начальника Ростехнадзора, составляет 14 м. Согласование данных настолько удовлетворительное, что последнее значение можно использовать для дальнейшего расследования катастрофы.

Анализ преобразования форм энергии из одной в другую, которое происходит при работе гидроагрегатов, а также исследование возможности разрушения за их счет гидрогенератора и приведения в движение его остатков вопреки силам гравитации позволяют сделать единственный вывод: на такое способна только энергия движущейся воды, и ме-

ханизм запуска процесса, при котором энергия расходовалась на разрушение, так или иначе связан с гидравлическим ударом. Однако данная версия была отброшена комиссией Ростехнадзора на самом раннем этапе расследования.

Тем не менее, применяя теорию неполного гидравлического удара для описания развития в канале волн разрежения, а не сжатия, легко создать расчет-

...И затрубили трубами... и обрушилась стена до своего основания...

Ветхий Завет, Пророки, Нав. 6:19

ную модель для оценки связи высоты вылета ротора второго гидроагрегата с силами, вызванными давлением воды под его турбинной крышкой. Для подъема ротора на высоту 14 м на него должно действовать давление не менее 9500 т, в то время как в рабочем режиме и обычных переходных режимах сила давления воды на турбинную крышку равняется примерно 4500 т. В то же время по данным акта Ростехнадзора в момент катастрофы шпильки турбинной крышки могли выдержать нагрузку чуть менее 8000 т. Таким образом, версия, не вполне твердо озвученная в акте Ростехнадзора, не выдерживает элементарной критики.

Однако если поднять голову к небу и обратиться к авиационному опыту последних 70 лет, то можно узнать о большом количестве случаев выключения, а иногда и разрушения турбореактивных двигателей (ТРД) самолетов в результате своеобразного процесса под названием «помпаж», протекающего в виде серии возрастающих пульсаций давления в воздушном тракте двигателя без какого-либо

предварительного его перекрытия твердыми объектами. Достаточно информированный и компетентный в этих вопросах читатель сразу же возразит: «Помпаж возникает на компрессоре ТРД, а где у гидроагрегата компрессор или хотя бы насос?» Для ответа на этот ключевой вопрос необходимо тщательно изучить действительные процессы, происходящие в проточной системе высоконапорных гидроагрегатов, и моделировать их в экспериментальных установках, а также численно. На это необходимы месяцы, даже годы кропотливого труда, без которого расследование катастрофы на Саяно-Шушенской ГЭС так и не было бы завершено. К счастью, эту работу 15–20 лет назад проделала группа исследователей под руководством Валерия Окулова, именно на основе натурных испытаний гидроагрегатов СШГЭС вскоре после завершения ее строительства.

Основными качественными отличиями процессов в проточной системе ги-

дроагрегатов и в ТРД (за исключением того, что повышение давления у гидроагрегатов происходит за счет гравитационного поля Земли) в интересующих нас аспектах являются:

- возникновение в центре вихревого жгута за турбиной кавитационного канала вследствие отрывов на лопастях турбины;
- асимметрия обтекания турбины, приводящая к тому, что полное запирающее на ней оказывается невозможным;
- наличие очень длинных водоводов в проточной системе гидроагрегатов.

Последнее обстоятельство является, по-видимому, важнейшим для анализа механизма создания нестационарных гидродинамических сил под турбинной крышкой. Это легко понять, вспомнив, что в длинных каналах возбуждаются собственные колебания находящейся в них сплошной среды (воды или воздуха), используемые, например, в органах или трубах для генерации звуков, сочетание которых и является музыкой. Взаимодействие собственных колебаний среды в длинных водоводах с колебаниями вихревого шнура и соответственно кавитационного канала в его центре при не-



которых условиях приводит к так называемому «гидроакустическому резонансу». Для его возникновения необходимо, чтобы стационарная характеристика гидравлической турбины, то есть функция изменения на ней полного давления от расхода, была падающей. С физической точки зрения это означает, что для увеличения расхода воды лопатки направляющего аппарата должны отклоняться от того направления, которое они имеют в оптимальном рабочем режиме. Вследствие этого изменяются углы атаки, под которыми обтекаются лопасти турбины, они уходят из оптимальной области, и на них возникают зоны отрыва, вызывающие интенсивную завихренность потока за турбиной. Эти зоны, как и их следствие – кавитационный канал, становятся препятствиями, на преодоление которых растрачивается энергия потока.

С точки зрения общей теории колебаний высоконапорные гидроагрегаты вместе с их проточными системами и генераторы электромагнитных колебаний, вольтамперная характеристика которых имеет падающий участок, являются вполне очевидными аналогами. Из работы группы Окулова следует, что в принципе условия для гидроакустического резонанса имеются как в области «нерекомендованной работы» (области II по стандартным обозначениям гидроэнергетиков), так и в области за линией ограничения мощности гидроагрегата – области IV. Однако в первом случае для агрегатов Саяно-Шушенской ГЭС различия между собственными частотами канала и частотой пульсации вихревого жгута значительны, поэтому резонансный рост колебаний не слишком велик и привел бы только к заметному увеличению вибраций гидроагрегатов. А за линией ограничения мощности эти частоты достаточно близки, что приводит к глобальной потере устойчивости с не контролируемым системой управления резонансным усилением колебаний во всей проточной системе гидроагрегата. Подобное явление, когда именно акустические резонансные колебания приводят к полному разрушению конструкции, впервые было описано около 2,5–3 тысяч лет назад в библейской истории о разрушении звуками труб израильского войска стен города Иерихона, стратегического ключа к Ханаану.

**Р**езонансные колебания практически сразу же проявляются в виде серии неполных гидравлических ударов возрастающей интенсивности. Для колебаний бесконечно малой интенсивности период составляет око-

ло 0,6 сек., а прирост давления в водоводе Саяно-Шушенской ГЭС удваивался с каждым колебанием. В случае колебаний конечной интенсивности данные позволяют говорить о периоде 0,5 сек. Общая длительность нарастания пульсаций давления составляла око-



ло 3–4 сек. в серии из 5–7 колебаний. Из непрерывного нарастания пульсаций давления следует вывод о том, что значительное ослабление прочности шпильки турбинной крышки второго гидроагрегата только ограничило масштаб катастрофы. Будь шпилька прочнее, турбинную крышку оторвало бы через 0,5–0,6 сек. на следующем цикле колебаний и давление воровавшегося в машинный зал потока воды было бы на 40% больше.

Остается решить вопрос – что забросило второй гидроагрегат Саяно-Шушенской ГЭС в область запрещенных режимов работы? Изучение основных характеристик с высокой степенью вероятности позволяет сделать вполне определенные выводы: лавинообразная последовательность отказов датчиков системы управления второго гидроагрегата началась с того, что из-за запредельной вибрации прекратил работу датчик частоты вращения ротора, и тут же угол раскрытия лопаток направляющего аппарата стал увеличиваться. Это и привело к попаданию гидроагрегата в запрещенную область.

Чем вызвана «запредельная вибрация» гидроагрегата – разбалансировкой турбины вследствие кавитационной эрозии ее лопастей, обрывом тяги лопатки, не вполне адекватной работой системы управления, ростом за-

зоров в подшипниках существенно выше допустимой нормы или, скорее всего, сочетанием и взаимным усилением всех или только части этих факторов? На этот вопрос на основе имеющихся данных ответить пока нельзя. Однако точное знание ответа не является кри-

тически важным для дальнейшей безопасной эксплуатации новых гидроагрегатов. Достаточно только заложить в систему управления автоматическую остановку агрегата при достижении определенного уровня его вибрации, чтобы персонал ГЭС никогда больше не играл в «русскую рулетку». А вот знание о возможности попадания гидроагрегата в режим гидроакустического резонанса с глобальной потерей устойчивости и выходом его на генерирование нарастающей последовательности гидравлических ударов является критически важным.

Меж тем еще 10–20 лет назад некоторые люди, в том числе и первый директор Саяно-Шушенской ГЭС Валентин Брызгалов, прекрасно знали об описанных в этой статье явлениях. Почему же в 2009 году при введении в строй новой системы управления все это, насколько можно судить, во внимание не принималось? Более того, даже после катастрофы никто из тех, кто работал когда-то по программе натуральных испытаний гидроагрегатов Саяно-Шушенской ГЭС на повышенной мощности, не сообщил о причине катастрофы. Исключением явился только Валерий Окулов, но его слабый голос из Дании до сих пор не услышан в России. Почему же мы, несмотря на все имевшиеся ранее знания, все-таки получили Иерихон на Енисее? ТИ