



**Некоммерческое партнерство  
«НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ СОВЕТ  
Единой энергетической системы»**

109044 г.Москва, Воронцовский пер., дом 2  
Тел. (495) 912-1078, 912-5799, факс (495) 632-7285  
E-mail: [dtv@nts-ees.ru](mailto:dtv@nts-ees.ru), <http://www.nts-ees.ru/>  
ИИН 7717150757

**УТВЕРЖДАЮ:**

Председатель Научно-технической  
коллегии НП «НТС ЕЭС»,  
член-корр. РАН, д.т.н., профессор

 А.Ф. Дьяков

«30» марта 2015 г.

**ПРОТОКОЛ**

заседания секции «Гидроэлектростанции и гидротехнические сооружения»  
НП «НТС ЕЭС» на тему:

**Рассмотрение вопросов, затронутых в обращении В.Н. Тарасова  
относительно неверного заключения комиссии по расследованию причин  
аварии на Саяно-Шушенской ГЭС.**

25 марта 2015 года

г. Москва

**Присутствовали:**

Члены секции «Гидроэлектростанции и гидротехнические сооружения» НП  
«НТС ЕЭС», представители Минэнерго России, Ростехнадзора.

**Со вступительным словом выступил**

Председатель секции «Гидроэлектростанции и гидротехнические сооружения» НП  
«НТС ЕЭС», к.т.н. С.Я. Лашенов.

**С докладом по рассматриваемому вопросу выступил ведущий инженер  
НИУ МЭИ В.Н. Тарасов.**

Основные положения доклада касались результатов комплексных исследований гидромеханических процессов выполненных группой сотрудников института ВТИ на гидроагрегате №3 Саяно-Шушенской ГЭС под руководством В.Н. Тарасова.

В частности, было доложено, что основными задачами проведённой работы были исследование физических причин разрушения крепёжных элементов высоконапорных гидроагрегатов и исследование физических причин пульсаций потока в гидравлическом тракте ГЭС. Докладчиком было отмечено, что обнаруженные физические процессы характерны не только для агрегатов СШГЭС, но присущи всем мощным высоконапорным гидроагрегатам с

реактивной турбиной. Поэтому проблемы, приведшие к аварии 17.09.2009 г, имеют фундаментальный характер и актуальны для всех подобных агрегатов.

Как известно, мощные гидроагрегаты с радиально осевой турбиной, как в России, так и за рубежом, имеют «не рекомендованные» зоны работы. При работе в таких зонах в проточной части возникают значительные пульсации давления, сопровождающиеся кавитацией и гидроударами. Особенностью гидроагрегатов СЗГЭС является очень узкая рабочая зона, при выходе за пределы которой в сторону повышения мощности в агрегатах возникают лавинообразно нарастающие пульсации, способные привести к серьёзной аварии.

Физическая природа этого явления, по заявлению докладчика, не понята до сих пор. С прошлого века считается, что пульсации потока в гидроагрегатах вызывает мощный вихрь за турбиной. Уже много лет усилия проектировщиков гидротурбин направлены на борьбу с этим вихрём, но к ощутимым успехам пока не привели.

В ходе доклада члены секции были ознакомлены с программой проведённых испытаний, включающей в себя регистрацию пульсаций потока в гидравлическом тракте, регистрацию пульсаций электрической мощности гидроагрегата, регистрацию колебаний лопаток направляющего аппарата турбины и регистрацию пульсаций механических нагрузок на крышку турбины, а также со схемами проводимых измерений.

Регистрация пульсаций давления под крышкой турбины осуществлялась датчиками давления с открытой мемброй, которые позволяли проводить динамические измерения, с постоянной времени менее миллисекунды. Диапазон измерений датчиков составлял 60 бар с пятикратным запасом по прочности. При работе агрегата эти датчики постоянно регистрировали чрезвычайно короткие импульсы, длительность которых оказывалась существенно меньше постоянной времени датчика, в связи с чем, величина пиковых значений импульсов, регистрируемых датчиками оказалось заниженной. К концу испытаний в местах установки датчиков (на нижней поверхности крышки турбины) были обнаружены кавитационные разрушения, из чего было сделано заключение, что максимальная величина ударных нагрузок превышала предел прочности стали.

Зафиксированные ультракороткие ударные импульсы порождают и ударные волны в конструкциях гидроагрегата, причём штатными средствами контроля они не регистрируются. Именно этим, по мнению докладчика, и объясняется тот парадокс, что шпильки разрушаются, а расчёты и эксперименты показывают, что динамические нагрузки, действующие на них, намного меньше предела усталостной прочности материала. При расчёте нагрузок, действующих на крепёжные элементы, предполагается, что они механические в то время как они вызваны кавитацией и возникают не в электромеханической конструкции агрегата, а в пульсирующем потоке.

Пульсации потока, порождающие указанные кавитационные процессы, по мнению докладчика, могут быть вызваны, по крайней мере, двумя механизмами:

1. Гидродинамической неустойчивостью потока, вызывающей «жгут» в виде вихреобразования и турбулентных пульсаций за рабочим колесом.

2. Гидроупругими автоколебаниями, которые автор доклада считает наиболее опасными, затрагивающие направляющий аппарат.

В продолжение презентации докладчиком было заявлено, что гипотеза «жгутовых» пульсаций не может объяснить поведение гидроагрегатов СШГЭС и более подробно остановился на версии гидроупругих колебаний.

Согласно высказанной версии в колебания лопастей гидротурбины вовлекается вся масса воды в гидравлическом тракте, благодаря чему в системе «гидравлический тракт-гидроагрегат-энергосистема» возникают новые формы колебаний, являющиеся практически гармоническими и сопровождающиеся колебаниями электрической мощности гидрогенератора. Частота колебаний незначительно меняется в пределах 0.52-0.54 Гц во всей зоне «нерекомендованной» работы (250 - 475 МВт). Колебания потока скачком возникают при углах поворота лопаток НА примерно 12°-14° и исчезают при углах 24°-26°, что примерно соответствует углу установки профилей колонн статора.

Докладчиком была предложена к рассмотрению графическая динамическая модель гидроагрегата, описывающая причины возникновения и развития колебаний системы «гидравлический тракт - гидроагрегат - энергосистема». Был сделан вывод, что частота таких колебаний зависит от эквивалентной жёсткости парогазовых пузырьков в потоке. При увеличении давления и амплитуды колебаний, жёсткость растёт. При этом частота колебаний осциллятора водовод - гидроагрегат стремится к первой собственной частоте колебаний столба воды в водоводе (1.5 Гц).

Положительная обратная связь, вызывающая автоколебания может быть вызвана деформацией РК и колебаниями лопаток направляющего аппарата

В продолжение презентации, касаясь вопросов связанных с проблемами контроля работы гидроагрегатов, автором было сделано заявление, что на основе полученных результатов проведённой работы, можно сделать вывод, что существующая методика контроля гидроагрегатов не способна регистрировать ни ударные импульсы, ни вызывающие их пульсации потока.

Кроме того, был сделан вывод, несмотря на модернизацию новых гидроагрегатов СШГЭС, совпадение собственных частот колебаний водовода и генератора сохранилось, зоны их работы существенно не изменились, в связи с чем новые гидроагрегаты являются потенциально опасными.

В завершение доклада были сделаны следующие выводы:

1. Разрушения крепёжных шпилек и других элементов высоконапорных гидроагрегатов, могут быть вызваны кавитацией. Длительность разрушающих импульсов чрезвычайно мала, поэтому штатными средствами контроля они не регистрируются.

2. Кавитационные процессы под крышкой турбины гидроагрегата вызваны пульсациями потока. Причем самые опасные пульсации способны вызвать гидроупругие автоколебания, затрагивающие направляющий аппарат.

3. Существующая методика контроля гидроагрегатов по вибрации не способна контролировать ни ударные импульсы, ни вызывающие их пульсации потока.

4. Пульсации потока в гидроагрегатах СШГЭС, приводящие к появлению зон «нерекомендованной» и «запрещённой» работы, вызваны гидроупругими автоколебаниями в системе «водовод - гидроагрегат - энергосистема».

5. Причиной очень узкой рабочей зоны агрегатов СШГЭС, и аномально больших пульсаций в их «запрещённой» зоне является не турбина, а генератор. Частота его синхронных качаний совпадает с частотой собственных колебаний столба воды в водоводе.

6. Новые гидроагрегаты СШГЭС принципиально ничем не отличаются от старых и нуждаются в модернизации.

7. Пульсации потока в гидроагрегатах можно устраниить путём модернизации системы управления направляющим аппаратом.

С экспертным заключением выступил председатель экспертной группы В.В. Берлин, который представил следующие выводы по рассматриваемой работе:

1. В.Н.Тарасовым были рассмотрены самые низкочастотные возмущающие воздействия в диапазоне 0,5...1,5 Гц, тогда как при работе гидроагрегата возмущения возникают на частотах вплоть до сотен герц. Во всех представленных материалах имеется большое количество ошибочных предположений и утверждений, что приводит автора к выводам, противоречащим как физическому механизму рассматриваемых явлений, так и теории, описывающей происхождение и распространение пульсаций давления и расхода в проточном тракте гидротурбин, качаний ротора и колебаний мощности. Следует признать, что выводы и утверждения, содержащиеся в работе, письме в адрес Президента и других работах В.Н.Тарасова являются необоснованными и ошибочными.

Автор представленного доклада незнаком с практикой и результатами модельных испытаний турбин, которые проводятся около ста лет в десятках лабораторий мира, и не знает, что как у модельных, так и у натурных РО турбин в определенном диапазоне режимов всегда наблюдается вихревой жгут в отсасывающей трубе. Притом, что у модели нет ни водовода, ни энергосистемы, ни колебаний направляющего аппарата, как этого требуют логические построения автора.

Также является ошибочным и предположение В.Н. Тарасова о том, что "...низкочастотные пульсации гидроагрегатов обусловлены гидроупругими автоколебаниями в системе водовод – гидроагрегат – энергосистема, а пульсации вихревого жгута за рабочим колесом являются не причиной, а следствием...", а также о том, что "...вихревой жгут является следствием колебаний лопаток направляющего аппарата, которые возбуждают колебания напора в системе турбина - напорный водовод и передаются в отсасывающую трубу". Всё происходит как раз наоборот. **Вихревой жгут первичен** и возникает из-за закрутки потока на выходе из рабочего колеса по мере удаления режима работы в обе стороны от оптимального диапазона. Жгут связан с выходной циркуляцией, которая определяется направлением вектора абсолютной скорости на выходных кромках лопасти и изменяется с изменением расхода турбины.

Автоколебания в напорном водоводе возникают, если напорно-расходная характеристика регулирующего органа такова, что с ростом напора расход снижается. Такую характеристику может иметь вибрирующий клапан и подобные устройства, но никак не направляющий аппарат. Направляющий аппарат управляетяется регулятором турбины, который не позволяет изменять открытие с изменением напора при рассматриваемых частотах 0,5...2 Гц. На СШГЭС постоянная времени направляющего аппарата TS1 равна 13 с, постоянная времени изодрома  $T_d = 8$  с. При таких характеристиках системы регулирования принципиально ошибочное предложение В.Н.Тарасова о возможности устранить пульсации давления путём упреждающего воздействия, еще и **технически нереализуемо**. Что касается упругих деформаций лопаток от пульсаций давления, то в наиболее пульсационном режиме они, по измерениям В.Н.Тарасова, не превысили  $\pm 0,02$  о, что никак не сказывается на расходе турбины.

В.Н.Тарасов объясняет возбуждение пульсаций расхода колебаниями лопаток направляющего аппарата с амплитудой 0,02о, зарегистрированными при натурных испытаниях восстановленного ГА-3 СШГЭС, однако расчеты показывают, что для предполагаемого В.Н.Тарасовым эффекта требуется амплитуда примерно в 100 (сто) раз больше, что невозможно при старой конструкции направляющего аппарата и, тем более, при новой.

Ошибканым является вывод автора о том, что «Никакого другого резонатора с частотой собственных колебаний 0,5 Гц, кроме как гармонического осциллятора, образованного массой воды в водоводе, подпружиненными лопастями рабочего колеса и парогазовой подушкой у РК, в системе не просматривается».

Экспертом отмечалось, что на частоте 0,5 Гц, которая наблюдается при испытаниях на нагрузках 250 - 475 МВт, резонанс не может возникнуть, поскольку собственные частоты всех систем и оборудования существенно выше 0,5 Гц: водовод 1,12 Гц, качания ротора 1,46 Гц, крутильные колебания около 16 Гц. Вообще, в зависимости от режима работы частота жгутового возмущающего воздействия изменяется в пределах 0,5...1,5 Гц, и возможен резонанс на собственной частоте водовода 1,12 Гц. Однако аналитическое решение, математическое моделирование и результаты натурных испытаний показали, что в гидротурбинных блоках даже при резонансе **рост амплитуды ограничен в силу демпфирующего свойства гидротурбины** изменять расход в направлении изменения напора.

**Принципиальной ошибкой** В.Н.Тарасов является представление в своих расчётах рабочего колеса турбины как некоего поршня. В отличие от поршня турбина обладает свойством увеличивать расход с ростом напора, то есть демпфировать колебания.

Экспертом также отмечена возможная неосведомлённость автора с современными методами расчетов переходных процессов, когда учитывается упругость воды и стенок водоводов, скорость волны, зависящая от конструкции водовода, характеристики системы ротор - вал - рабочее колесо и ее крутильные колебания, инерционные и электрические характеристики ротора генератора, структура и настройки систем регулирования, и в качестве граничных условий используется универсальная характеристика турбины. В своих многочисленных

статьях, отчетах, записках и заключениях В.Н.Тарасов нигде не упоминает и не использует данную характеристику турбины, которая формируется по результатам модельных испытаний и является **основным научно-техническим документом**, описывающим свойства турбины данного типа. Игнорирование В.Н. Тарасовым наличия данной характеристики во многом объясняет его многочисленные ошибочные предположения, неоправданные упрощения и допущения. Здесь же отметим, что В.Н.Тарасов в своих расчетных моделях обычно принимает произвольные параметры, далекие от реальных параметров рассматриваемого объекта.

В продолжение своего доклада эксперт привёл множество критических отзывов по выводам рассмотренной работы, заявив, что этот перечень можно продолжать долго, так как из-за ложных предпосылок работы В.Н.Тарасова содержат множество ошибок и необоснованных утверждений. Натурные испытания, проведенные под руководством В.Н.Тарасова на агрегате №3, позволили определить пульсационные и вибрационные характеристики эксплуатационных режимов, дали другой полезный материал. Однако ничего нового, ранее неизвестного, не получено.

При этом результаты испытаний опровергают все гипотезы В.Н.Тарасова, в том числе главную, что источником возмущений являются колебания лопаток направляющего аппарата и лопастей рабочего колеса. Которые, по его мнению, могут запустить лавинообразный рост пульсаций давления и расхода. На записанной им осциллограмме колебаний лопаток в наиболее пульсационном режиме виден максимальный размах лишь 0,04 градуса, то есть амплитуда равна 0,02 градуса. Это на два порядка меньше амплитуды, необходимой для получения заметных колебаний расхода.

Автором были допущены ошибки и при постановке натурных испытаний. Добротно, в целом, выполненная большая работа по натурным испытаниям СШГЭС существенно обесценена отсутствием регистрации пульсаций давления в отсасывающей трубе, порождаемых вихревым жгутом. Из-за неверных представлений о причинно-следственных связях В.Н.Тарасов упустил возможность зафиксировать наиболее важное для анализа – источник возмущений в динамической системе, которую он пытается рассматривать без главного звена, применяя всякого рода натяжки.

#### **В обсуждении доклада приняли участие:**

Лашёнов С.Я., – к.т.н., председатель секции по ГЭС и ГТС НП «НТС ЕЭС», Фёдоров М.П. – академик РАН, Байков И.А. - заместитель директора Департамента оперативного контроля и управления в электроэнергетике Минэнерго РФ, Беллендир Е.Н. – д.т.н., генеральный директор ОАО «ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева», Захаров А.В. – к.т.н., заместитель главного конструктора гидротурбин ЛМЗ, Хазиахметов Р.М. - заместитель главного инженера – директор Департамента развития и стандартизации производственных процессов ОАО «РусГидро», Юсупов Т.М. – главный инженер филиала ОАО «РусГидро» - Саяно-Шушенская ГЭС, Муравьёв О.А. – д.т.н., профессор кафедры Гидротехнического строительства МГСУ, Новоженин В.Д., - к.т.н., советник

генерального директора ОАО «Институт Гидропроект», Юркевич Б.Н. – к.т.н., главный инженер ОАО «Ленгидропроект», Хренков С.В. - заместитель начальника отдела по надзору за гидроэлектростанциями и гидротехническими сооружениями Управления государственного энергетического надзора Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору, Куменко А.И. – д.т.н., начальник центра мониторинга и технической диагностики в энергетике НПЦ «Динамика», Рассказов Л.А. – д.т.н., профессор кафедры Гидротехнического строительства Московского государственного строительного университета, Лунаци М.Э. – к.т.н., заместитель директора Департамента развития и стандартизации производственных процессов, Берлин В.В. – к.т.н., профессор кафедры Гидротехнического строительства МГСУ.

По результатам состоявшегося обсуждения **секция отметила:**

1. Выводы, сделанные В.Н.Тарасовым нельзя признать обоснованными, т.к. представленные материалы и отчет по испытаниям содержат большое количество теоретических ошибок, неверных предположений, натяжек и произвольных трактовок.
2. При проведении испытаний агрегата № 3 СШГЭС допущен серьезный просчет – не велась запись пульсаций давления под рабочим колесом турбины, то есть возмущающего воздействия, порождающего низкочастотные пульсации давления в проточном тракте и напорном водоводе, колебания врачающего момента и мощности генератора.
3. Актуальность и наличие научного интереса по дальнейшим теоретическим, модельным и натурным исследованиям динамических систем высоконапорных гидротурбин, результаты которых могут найти последующее применение при проектировании объектов гидроэнергетики и разработке конструкций гидравлических турбин, а также при определении граничных условий безопасной эксплуатации действующих ГЭС.
4. Недопустимость проведения на действующих объектах испытаний и научных исследований, предусматривающих работу гидроагрегатов, водоподводящего тракта, отсасывающей трубы и прочих сооружений в диапазонах протекания резонансных явлений, в связи с серьезной опасностью возникновения повреждений и разрушений оборудования и сооружений.
5. В целях реализации предложенной программы, рекомендовать проведение научных работ на специализированных стендах, аналогичных высоконапорному стенду Красноярской ГЭС.

**Секция решила:**

1. Невозможно признать достоверность и обоснованность выводов, изложенных в отчёте ВТИ, докладе В.Н. Тарасова и его письме Президенту о ненадёжности новых гидроагрегатов и рекомендаций о необходимости проведения повторной технической экспертизы причин аварии в связи с наличием

серьезных замечаний к корректности проведения исследования и большого количества теоретических ошибок и неверных предположений.

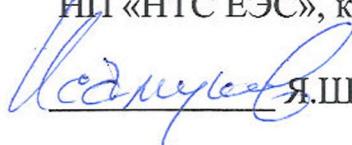
2. Необходимо продолжить теоретические и модельные исследования динамических систем высоконапорных гидротурбин большой мощности, включая процессы в подводящих и отводящих трактах гидротурбин, системах автоматического регулирования агрегатов. Целью таких исследований является разработка мероприятий по повышению эксплуатационных качеств гидроагрегатных блоков при работе в различных режимах. Исследование влияния отдельных факторов, определяющих характер нестационарностей при работе высоконапорных ГЭС и ГАЭС, целесообразно проводить методами математического моделирования, а также на крупномасштабных моделях с напорами и параметрами водоводов, близкими к натурным.

3. С учетом необходимости глубокой научной проработки сути явлений и задач математического моделирования процесса, рекомендовать привлечь Российскую Академию наук.

Первый заместитель Председателя  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», д.т.н., профессор

 В.В. Молодюк

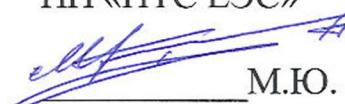
Учёный секретарь  
Научно-технической коллегии  
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

 Я.Ш. Исамухамедов

Председатель секции  
«Гидроэлектростанции и  
гидротехнические сооружения»  
НП «НТС ЕЭС», к.т.н.

 С.Я. Лашенов

Ученый секретарь секции  
«Гидроэлектростанции и  
гидротехнические сооружения»  
НП «НТС ЕЭС»

 М.Ю. Гущин