

УДК 621.22

## НАУЧНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕХНОГЕННОЙ АВАРИИ И ВОССТАНОВЛЕНИЯ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

© 2021 г. М. П. Федоров<sup>1</sup>, Ю. К. Петреня<sup>1</sup>, \*

<sup>1</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*E-mail: petrenya.yk@gmail.com

Поступила в редакцию 30.12.2020 г.

После доработки 30.12.2020 г.

Принята к публикации 19.05.2021 г.

DOI: 10.31857/S0040364421060041

По масштабу, последствиям, влиянию на энергообеспечение Сибири и социально-экономические условия авария, которая произошла 17 августа 2009 г. в 8 ч 13 мин на крупнейшей гидроэлектростанции России и одной из самых мощных в мире – Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС), является крупной техногенной аварией. Погибло 75 человек, произошла потеря 6400 МВт мощности, возникла угроза обледенения плотины в зимний период времени, с рисками ее повреждения и возникновения волны затопления на сотни километров [1].

Для организации аварийно-восстановительных работ, обеспечения надежности гидротехнических сооружений, восстановления и ввода в эксплуатацию СШГЭС была создана Правительственная комиссия под руководством заместителя Председателя Правительства РФ И.И. Сечина, которая в рекордные сроки обеспечила решение сложнейших задач. Работы по СШГЭС находились на постоянном контроле В.В. Путина, который много раз бывал непосредственно на СШГЭС. Знакомился с состоянием дел, проводил рабочие совещания с руководителями и участниками работ. На разных этапах в этих работах принимали участие и получили огромный опыт С.И. Шматко, Н.Г. Кутын, В.М. Зимин и другие руководители, в том числе А.В. Новак и Н.Г. Шульгинов, которые в настоящее время являются заместителем Председателя Правительства РФ и Министром энергетики РФ соответственно. Справедливо отметить ключевую роль И.И. Сечина, который организовал определение, постановку и оптимальное решение уникального комплекса проблем, не имеющих аналогов в мировой практике гидроэнергетики (рис. 1). Как членам Правительственной комиссии и комиссии Ростехнадзора авторам это хорошо известно.

Было очевидно, что без глубокого междисциплинарного научного исследования причин и условий возникновения техногенной аварии нельзя бу-

дет выйти на оптимальные решения по ликвидации ее последствий, восстановлению станции и обеспечению условий надежного функционирования всей гидроэнергетики. Как показывает длительный опыт развития техники, промышленности и энергетики, глубокое осознание важности и роли науки быстро приходит, когда возникают кризисные ситуации, аварии, пандемии. Авария на СШГЭС в этом смысле не была исключением.

Российская Академия наук активно включилась в работы на СШГЭС. Энергетика, в том числе и гидроэнергетика, относится к сфере научных интересов Секции энергетики, входящей в состав Отделения энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН (ОЭММПУ РАН). В немалой степени осознанию важности научного подхода в решении вышеуказанных проблем способствовали высокий личный авторитет академи-



Рис. 1. Председатель Правительственной комиссии, заместитель Председателя Правительства РФ И.И. Сечин и члены комиссии на Саяно-Шушенской ГЭС.



Рис. 2. Академик В.Е. Фортов – научный руководитель от РАН на СШГЭС.

ка В.Е. Фортова (рис. 2) в научных, инженерно-технических и управленческих кругах, активная позиция академиков Ю.С. Васильева, А.А. Саркисова, В.А. Глухих, С.В. Алексеенко, О.Н. Фаворского, Э.Е. Соны и других членов Секции энергетики и ОЭММПУ РАН.

Академиком-секретарем Отделения и членом Секции энергетики был тогда академик В.Е. Фортов. Он представлял Российскую Академию наук, координировал и руководил научным обеспечением всего комплекса работ от установления причин аварии, обеспечения надежности, разработки и создания нового оборудования, восстановления и запуска в эксплуатацию. Академик Фортов неоднократно в тот период времени приезжал на СШГЭС, в том числе и в первые дни после аварии, принимал личное участие в разработке и представлении результатов исследований и рекомендаций как на станции, так и в Правительстве РФ. Важная работа по изучению причин и условий развития аварии в условиях ГЭС была выполнена при его участии и под его руководством экспертной группой РАН, оперативное управление работой которой было возложено на члена-корреспондента РАН Н.А. Махутова (ОЭММПУ РАН) [2–4].

Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного расположена на границе Республики Хакасия и Красноярского края, в верховьях р. Енисей (рис. 3). Плотина имеет высоту 242 м и длину по гребню 1074 м. Объем водохранилища – более 30 км<sup>3</sup>. Установленная мощность ГЭС – 6400 МВт. Десять гидроагрегатов ГЭС имеют номинальную мощность 640 МВт каждый при расчетном напоре 194 м. Общая пропускная способность турбин 3400–3600 м<sup>3</sup>/с. В 2000 г. было официально завершено строительство, которое началось в 1963 г. (при этом включение в сеть первого гидроагрега-



Рис. 3. Общий вид Саяно-Шушенской ГЭС.

та с временным рабочим колесом на пониженном напоре состоялось в 1978 г.) [5].

Десять гидроагрегатов ГЭС объединяли гидротурбину и генератор. Гидравлическая турбина типа РО230/833-В имеет параметры: мощность номинальная – 650 МВт, нормальная частота вращения – 142.8 об/мин, разгонная частота – 280 об/мин, диаметр рабочего колеса – 6.77 м, масса турбины – 154 т. Гидрогенератор типа СВФ1285/275-42 имеет параметры: полная мощность – 711 МВА, напряжение – 15.75 кВ, диаметр расточки ротора – 11.85 м, масса генератора – 1790 т, масса ротора – 912 т. Эксплуатация под управлением группового регулирования активной и реактивной мощности (ГРАМ) проводилась с многократным переходом не рекомендованных зон работы (210 раз), в день аварии – 6 раз.

Накануне аварии девять агрегатов СШГЭС работали под автоматическим управлением. Агрегат ГА-2 был введен в работу под автоматическим управлением в качестве приоритетного в 23:14 (16.08.2009 г.). В период времени с 23:14 (16.08.2009 г.) до момента аварии в 8:3 (17.08.2009 г.) агрегат ГА-2 пять раз проходил нереконструируемую режимную зону II, которая характеризуется повышенным уровнем динамических нагрузок и вибраций. Во время шестого прохода зоны II произошла авария (рис. 4).

Произошел обрыв крепления крышки турбины и выталкивание вверх многотонного агрегата. Большой объем воды, который успел поступить до закрытия затвора, затопил машинный зал. В результате аварии часть машинного зала была разрушена, несколько агрегатов были повреждены, часть агрегатов, электротехническое и вспомогательное оборудование были залиты водой и вышли из строя. Вес “поднявшейся вверх” части агрегата ~1700 т (колесо турбины – 154 т, крышка турбины – 379 т, ротор генератора – 912 т, вал с подшипниками и подпятником – 242 т).



Рис. 4. Вид гидроагрегата ГА-2 после аварии.

Крышка турбины крепилась 80 шпильками М80. Материал шпилек – Ст35 с пределом прочности 530 МПа. Большинство разрушившихся шпилек имели усталостный характер, свидетельствующий о разрушении в условиях действия переменных нагрузок (асимметричного усталостного нагружения). Шесть шпилек имели полную длину и сохранили резьбу, что с учетом особенностей конструкции крепления крышки турбины и его разрушения может свидетельствовать об отсутствии (самоотвинчивании) на них гаек в момент разрушения. Средняя площадь усталостного излома обследованных шпилек составляла ~65%, что говорит о временном характере развития усталостных трещин. В определенной степени время роста усталостной трещины должно коррелировать с временем роста вибрации (рис. 5).

Над выяснением причин возникновения, характера и условий развития аварии работало большое количество ученых, специалистов и инжене-

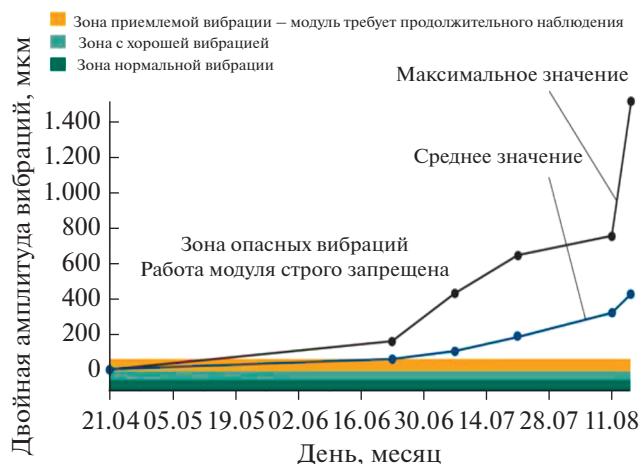


Рис. 5. Изменение вибрации со временем.

ров, представляющих академическую, вузовскую и отраслевую науку, промышленность и эксплуатацию. Их работа и выводы в очередной раз подтвердили ключевое значение глубокого знания и понимания фундаментальных основ физических процессов и явлений, протекающих в сложном оборудовании. Без этого невозможны разработка, создание и обеспечение эффективной и надежной эксплуатации гидрооборудования и гидротехнических сооружений. Для гидроагрегата это сложная комбинация гидродинамики, механики конструкций и материалов, материаловедения, электромагнетизма, процессов управления и других областей науки применительно к многокомпонентной динамической системе, имеющей большую массу и габариты.

Крупногабаритный массивный ротор при вращении является одним из основных источников возникновения вибраций. Нормируемым показателем вибрационного сигнала является размах перемещений ротора (их двойная амплитуда). Кроме источников вибрации, характерных для электро-механической динамической системы, какой является гидроагрегат, рассматривались внешние источники вибрации. Учеными СО РАН подробно исследовался вопрос корреляции сейсмических воздействий и вибрационного состояния гидроагрегата [6].

Гидродинамические процессы в гидравлическом тракте, которые в течение ряда лет исследовались в совместных работах Института теплофизики СО РАН и “Силовых машин”, также приводят к возникновению дополнительных, в том числе переменных и динамических, нагрузок на конструктивные элементы гидроагрегата. При прохождении потока через рабочее колесо гидротурбины возникают нестационарные гидродинамические процессы в виде вихревых дорожек, сбегаящих с выходных кромок лопастей (рис. 6). Такого рода пространственные эффекты на кромках лопастей относятся к вихрям Кармана.

В гидравлическом тракте гидроагрегата высоконапорной ГЭС, включающем спиральную камеру,

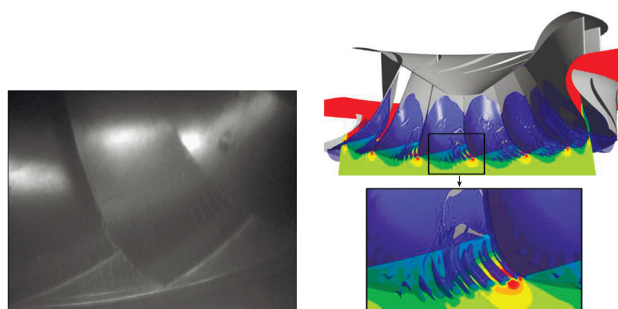
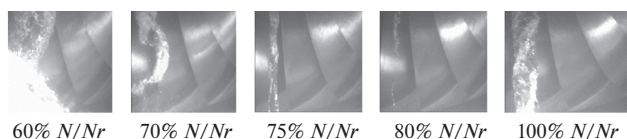


Рис. 6. Вихри Кармана на выходных кромках лопастей рабочего колеса радиально-осевой гидротурбины.

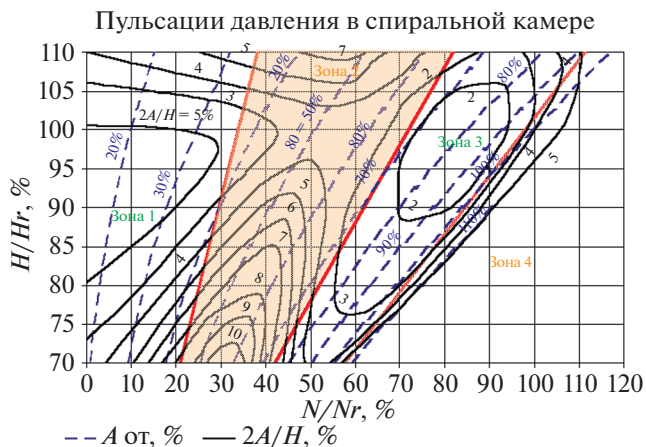


**Рис. 7.** Вихревая (жгутовая) структура потока за рабочим колесом радиально-осевой гидротурбины для различных уровней нагрузки.

направляющий аппарат, рабочее колесо и отсасывающую трубу, происходят сложные нестационарные процессы, которые приводят к пульсациям давления, кавитации и гидравлическим ударам. В отсасывающей трубе за рабочим колесом возможно образование мощного вихревого (кавитационного) жгута (рис. 7). При развитии гидродинамической неустойчивости в интенсивном вихре жгут начинает вращаться (прецессировать) вокруг центральной оси потока.

Гидродинамические возмущения могут привести к возникновению в отсасывающей трубе резонансных колебаний, которые называют гидроакустическим резонансом [7, 8]. Кроме гидроакустического резонанса в водяном тракте в работе ВТИ было предложено рассмотреть возможность возникновения “органных” гидроупругих колебаний [9]. Нестационарные гидродинамические процессы, проявляющиеся при работе гидроагрегата, практически не моделируются в условиях стендовых испытаний моделей рабочих колес. Характерный уровень частоты для пульсаций потока и собственных частот составляет единицы герц и близок к частоте затухающих колебаний активной мощности, вызванных переходными электро-механическими процессами. Уменьшению натяга шпилек разьема могут способствовать не характерные для нормальной эксплуатации гидроагрегата частоты нагружения, а частоты на один—два порядка превышающие типичные частоты вибрации.

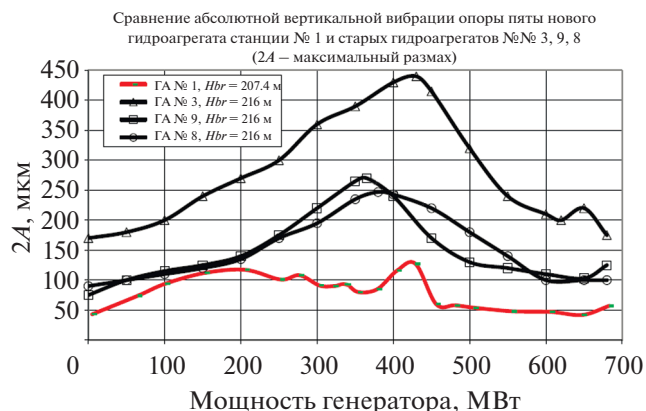
Зоны нестационарности с высоким уровнем вибраций характерны для высоконапорных радиально-осевых гидротурбин (рис. 8). При увеличении напора и подъеме мощности в пределах зоны 1 вибрационное состояние гидроагрегата является удовлетворительным. При переходе в зону 2 резко возрастают пульсации потока, увеличивается амплитуда вибраций, поэтому зона 2 считается переходной и не рекомендуемой для длительной эксплуатации. После выхода из зоны 2 и переходе в зону 3 пульсации потока и уровень вибраций опять возвращаются к приемлемому. Как правило, эти зоны, рекомендуемые и не рекомендуемые для длительной эксплуатации, определяются и регламентируются при натурных испытаниях гидроагрегата. Научная проблема адекватного расчетного определения и моделирования этих зон при стендовых



**Рис. 8.** Зоны нагрузок (рекомендованных и не рекомендованных для длительной эксплуатации) радиально-осевой гидротурбины.

испытаниях для натуральных условий сохраняет свою актуальность и в настоящее время.

Выполненный комплекс научных исследований, экспертиза результатов и предложенных мероприятий позволили провести восстановление СШГЭС на принципиально новом техническом уровне. Например, конструкция нового гидроагрегата позволила в разы снизить уровень вибраций (рис. 9). Были расширены рекомендуемые диапазоны работы и сужен диапазон работы, не рекомендуемой для длительной эксплуатации гидроагрегата. Впервые в мировой гидроэнергетике система виброконтроля состояния гидроагрегата включена в систему защит ГЭС. Она имеет 3 канала дублирования, обеспечивает получение достоверных результатов измерений, в том числе и при низких частотах (0,8–1 Гц). При этом важно отметить, что дальнейшее развитие методов моделирования динамического поведения таких сложных



**Рис. 9.** Амплитуда вертикальной вибрации опоры подпятника ГА-1 новой конструкции и ГА-3, ГА-8 и ГА-9 старой конструкции.



Рис. 10. Машинный зал Саяно-Шушенской ГЭС.

электромеханических систем, как гидроагрегаты, продолжает сохранять свою актуальность, особенно с учетом перспективных требований к вторичному регулированию частоты и мощности с участием ГЭС.

Вышеперечисленные работы и исследования составляют важную часть, но не закрывают весь комплекс исследований по СШГЭС, которые позволили отметить необходимость дальнейших фундаментальных работ по таким темам, как разработка принципов оптимального формирования сложных природно-технических систем с гидроэнергетическими объектами, разработка правил каскадного регулирования и оптимизации управления водными ресурсами на многоагрегатных ГЭС, расчет условий и параметров запроектных аварий и выработка рекомендаций по их предотвращению и снижению ущерба и др.

Полное восстановление ГЭС с заменой всех 10 гидроагрегатов было завершено в декабре 2014 г., т.е. практически через пять лет после аварии [10, 11] (рис. 10). Огромную роль в успешном выполнении всех восстановительных работ сыграли ученые РАН, в первую очередь представляющие Отделение энергетики, машиностроения, механики и процессов управления РАН. Академик В.Е. Фортов в сложнейших условиях, в том числе очень трудных морально и психологически на пер-

вых этапах работ, организовал работу Академии наук по научному обеспечению и успешному решению комплекса крупных проблем, включая полное восстановление и запуск в эксплуатацию СШГЭС. Конечно, этому способствовал огромный научный и личный авторитет Владимира Евгеньевича Фортова среди руководителей, ученых, специалистов и инженерно-технических работников гидроэнергетики и в целом энергетической отрасли страны.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 года в филиале Открытого акционерного общества “РусГидро – Саяно-Шушенская ГЭС им. П.С. Непорожного”.
2. *Фортов В.Е., Федоров М.П., Елистратов В.В.* Научно-технические проблемы гидроэнергетики после аварии на Саяно-Шушенской ГЭС // Вестник РАН. 2011. Т. 81. № 7. С. 579.
3. *Petrenya Y.K.* Restoration of Hydro Units for Sayano-Shushenskaya Hydro Power Plant // Int. Conf. “Hydro-Vision Brazil 2011”. Rio de Janeiro, Sept. 2011. P. 56.
4. *Махутов Н.А., Петреня Ю.К., Гаденин М.М., Иванов С.В.* Факторы оценки напряженных состояний, прочности и ресурса ответственных резьбовых соединений // Заводская лаборатория. 2014. № 07(80). С. 44.
5. *Ковалев Н.Н.* Гидротурбины. Л.: Машиностроение, 1971.
6. *Курзин В.Б., Селезнев В.С.* О механизме возникновения высокого уровня вибраций турбин Саяно-Шушенской ГЭС // ПМТФ. 2010. Т. 51. № 4. С. 166.
7. *Лобановский Ю.И.* Автоколебания напорных систем и разрушение гидроагрегатов // Гидротехническое строительство. 2010. № 7. С. 39.
8. *Окулов В.А., Пылев И.М.* Неустойчивость напорных систем // Докл. РАН. Энергетика. 1995. Т. 341. № 4. С. 470.
9. *Тарасов В.Н.* Гидроупругие колебания агрегатов ГЭС // Гидротехническое строительство. 2012. № 1. С. 13.
10. *Демьянов В.А., Богуш Б.Б., Петреня Ю.К.* Разработка, изготовление, поставка и приемка гидротурбинного оборудования, выполнение услуг для Саяно-Шушенской ГЭС. 1885-19-1т. 2009. 71 с.
11. *Новожилов В.Ю., Богуш Б.Б., Петреня Ю.К.* Разработка, изготовление, поставка и приемка гидрогенераторного оборудования, выполнение услуг для Саяно-Шушенской ГЭС. 1885-26-1т. 2009. 71 с.