



ДИСКУССИИ

Авария на Саяно-Шушенской ГЭС вызвала огромный общественный резонанс. Официальное заключение о причинах крупнейшей в гидроэнергетике катастрофы будет готово еще не скоро. А пока авторитетные специалисты спорят о том, что же произошло на станции, которая считалась жемчужиной гидроэнергетики. Один из самых свежих экспертов в гидротехнике — доктор технических наук Владимир Тетельмин, который 12 лет изучал плотину Саяно-Шушенской ГЭС. Он был депутатом Госдумы 1-го и 2-го созывов, стал одним из авторов закона "О безопасности гидротехнических сооружений".

ВЕРСИЯ ПРОФЕССОРА ВЛАДИМИРА ТЕТЕЛЬМИНА: ПЛОТИНА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС НАПОЛЗЛА НА МАШИННЫЙ ЗАЛ

17 августа 2009 г. произошла авария на крупнейшей российской Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (СШГЭС). Сильная вибрация второго гидроагрегата разрушила крепления крышки рабочего колеса турбины, что привело к срыву крышки турбины и разгерметизации водопроводящего тракта гидроагрегата. В Акте технического расследования Ростехнадзора говорится: "Авария произошла из-за совокупности различных причин".

На 1986 г. в мировом регистре числилось более 6300 высоких бетонных плотин. Когда сооружались крупные гидроузлы, считалось, что высокие плотины могут легко приспособиться к деформациям массивов скальных оснований и береговых примыканий. В настоящее время выясняется, что это не совсем так. Многие наблюдаемые на С-Ш ГЭС явления не укладываются в классические расчетные схемы высоконапорных гидроузлов.

Гравитационные плотины опираются на дно реки, арочные — крепятся к берегам. На Саяно-Шушенской ГЭС, длина которой больше 1 км, а высота приближается к 250 метрам, выбраны оба принципа. И это делает плотину крайне чувствительной к состоянию окружающей среды. Под водой не видно, но подошва плотины более 100 метров. Левый берег Енисея сложен из податливых ортосланцев с высоким уровнем пластичности.

Арочно-гравитационная плотина С-ШГЭС действительно не имеет аналогов в мировой практике плотиностроения. Сооружение подобных плотин оправдано в тех случаях, когда получаемая экономическая выгода перевешивает все виды реального и прогнозируемого ущерба от строительства и эксплуатации ГЭС. Это аксиома. В течение всех лет эксплуатации плотины С-Ш ГЭС наблюдается несоответствие некоторых проектных предположений ее фактическому состоянию. Авторы многих научно-технических статей об осо-

бенностях работы плотины С-Ш ГЭС называют цифры, свидетельствующие о выходе плотины за рамки проектного режима работы.

Для гидротехников ключевым является перепад воды перед плотинной. Колебания верхнего бьефа очень велики и достигают за сезон 40 метров, колебания температуры — от плюс 30 до минус 30 градусов. Это мощные факторы, но в эпоху индустриализации и гигантомании, когда проектировалась плотина, царило шапкозакидательство, на экологические факторы внимания не обращали. Саяно-Шушенская ГЭС — это гигантский "черный ящик", который живет по неизвестным людям законам.

Уникальное сочетание больших амплитуд циклических колебаний уровня верхнего бьефа и больших амплитуд годовых температур порождает многообразные неустановившиеся процессы, которые изменяют напряженно-деформированное состояние плотины, массива основания и берегов, а также всего комплекса сооружений ГЭС. Чтобы дать надежный прогноз работы комплекса водохранилище — плотина — основание, необходимо знать сущность происходящих сложных фильтрационно-реологических процессов.

С позиций гидротехника земная кора — это прочная горная порода, способная выдержать нагрузку в миллиарды тонн, создаваемую весом водохранилища и плотины. Однако земная кора не является "твердью", она "плавает" в подкоровом субстрате горячей магмы и при этом всегда стремится к достижению состояния гидростатического равновесия. Это явление называется изостазией.

Любые достаточно значимые изменения нагрузки на земную кору: искусственные водохранилища, глубокие карьеры, откачка подземных вод и нефти — приводят к изменению изостагического равновесия.

Неравновесное состояние земной коры, вызванное строительством крупных гидроузлов, яв-



ляется причиной возбужденной сейсмичности. Давно замечено, что в районах строительства высоких плотин возникает или усиливается сейсмическая активность. В частности, проявления возбужденной сейсмической активности отмечены в районах водохранилищ Кариба (Зимбабве), Вайонт (Италия), Кремаста (Греция), Монтинар (Франция), Ингури (Грузия), Чиркейского (Россия). Техногенные землетрясения всегда приурочены к водохранилищам и по времени совпадают с их наполнением. На интенсивность землетрясений оказывают влияние размеры акватории водохранилищ и скорость их наполнения. Землетрясения с магнитудой 5 – 6 отмечаются только при сооружении плотин высотой более 90 м. Землетрясения имеют поверхностный характер с очагами на глубине 5 – 6 км.

При проектировании и эксплуатации крупных гидроузлов необходимо рассматривать два класса процессов:

- неклассические процессы, вызванные погружением толщи земной коры вместе с гидросооружением в вещество частично расплавленной мантии. В данном случае земная кора прогибается под действием сосредоточенной силы веса водохранилища как упругая оболочка, плавающая в тяжелой жидкости;

- классические процессы, сопровождающие работу полубесконечного массива горных пород как упругой фильтрующей субстанции, вмещающей все сооружения и принимающей на себя все разновидности нагрузок и воздействий.

Напряженно-деформированное состояние горных пород в районе Саяно-Шушенского гидроузла определяется действием процессов обоих классов, однако при проектировании ГЭС первые из них (неклассические) во внимание не принимались.

Вес водохранилища С-Ш ГЭС составляет более 30 млрд. т. Земная кора в районе водохранилища под действием этой нагрузки медленно погружается в вязкое вещество подстилающей мантии. Это процесс регионального масштаба, охватывающий территорию в сотни тысяч квадратных километров [7]. Прогибание земной коры и сопутствующие релаксационные процессы (Происходящее во времени снижение напряжения в материале называют релаксацией. Релаксации подвержены все материалы: вода, стекло, металлы, горные породы. Концепция времени релаксации отражает идею о восстановлении равновесного состояния после того, как некоторая система была приведена в неравновесное состояние.) будут продолжаться еще не один десяток лет. На периферии этих процессов происходит компенсационное поднятие земной коры. Приблизительные

расчеты показывают, что за годы эксплуатации "стрела прогиба" толщи земной коры в районе створа плотины составляет около 30 см.

Факт прогибания земной коры подтверждается монотонным многолетним уменьшением длины линий хорд арки, свидетельствующих о непрерывно происходящем процессе сближения береговых массивов в створе плотины.

Первым важным следствием прогибания земной коры в плоскости створа является то, что оно "уводит" основание из-под плотины, которая все больше "зависает" на сближающихся берегах.

Вторым важным следствием является то, что сближение берегов изгибает арку в плане, отодвигая ключевую и другие секции в сторону верхнего бьефа (ВБ), и тем самым "скрывает" часть пластических деформаций. – необратимых смещений плотины в сторону нижнего бьефа (НБ).

Прогибание земной коры обычно усиливает сейсмическую активность в районе строительства. С-Ш ГЭС не стала исключением. В период интенсивного заполнения водохранилища в зоне сейсмогенерирующей структуры в 75 км на юго-западе от створа ГЭС было отмечено значительное повышение сейсмической активности. В районе водохранилища ежегодно происходят десятки землетрясений энергетического класса более 5,0. Можно предположить, что сильное землетрясение в марте 1994 г. с эпицентром в районе г. Шагонар является техногенным.

Саяно-Шушенский гидроузел не только формирует прогиб земной коры, но и изменяет температурное и напряженно-деформированное состояние огромной толщи массива горных пород, ландшафт, гидрологию и гидрогеологию региона; влияет на климат; вносит локальное изменение в гравитационное поле Земли и инициирует локальные сейсмические события. Не имея достаточных знаний об особенностях работы сооружений подобного масштаба, служба эксплуатации ГЭС только фиксировала различные нелинейные и непредсказуемые явления. В актах обследования фигурирует запись: "Плотина не вышла на квазистационарный режим работы". При этом одни гидротехники говорят, что плотина еще "молодая" и не адаптировалась к внешним условиям, другие – что происходит "деструкция стареющего бетона".

В основании плотины С-Ш ГЭС залегают кристаллические сланцы. Основание наиболее "подвижной" стационарной части плотины сложено ортосланцами, разбитыми сетью крутопадающих и пологих многоярусных тектонических зон, Сработка-наполнение водохранилища С-Ш ГЭС



порождает в большом объеме массива оснований и берегов неустановившиеся процессы, проявляющиеся в длительном перераспределении пьезометрических напоров и изменений силовых воздействий на подземный контур плотины и прилегающий массив горных пород. При этом любому изменению фильтрационного напора в кристаллических сланцах соответствует изменение параметров их трещиноватости, проницаемости и деформируемости.

При создании водохранилища С-Ш ГЭС произошла зарядка большого объема упругой трещиновато-пористой среды водой высокого напора на глубину не менее тысячи метров. Процессы сработки и наполнения глубокого водохранилища определяют ряд особенностей в поведении плотины и ее основания: нелинейный рост расхода дренажа основания при наполнении водохранилища и уменьшение дебита дренажа при постоянно высоком уровне верхнего бьефа, изменение скорости прохождения упругих волн в основании на больших глубинах, временную несогласованность линейных и угловых перемещений не отношению к изменению уровня верхнего бьефа. По этой причине наблюдаются перемещения плотины и гидроагрегатов даже после наполнения водохранилища, когда УВБ держится на постоянной отметке.

Сумма гидростатических нагрузок на Саяно-Шушенскую ГЭС достигает 22 млн. тонн – это состав из 500 тысяч цистерн, который каждое мгновение давит на плотину.

Проблемы с плотиной С-Ш ГЭС возникали за долго до завершения ее строительства. Как отмечают авторы, "ошибки в расчетах и раннее наполнение водохранилища до полного завершения строительства плотины привели к перегрузке первых столбов секций и образованию двух систем трещин: на контакте плотины с основанием и в бетоне напорной грани". Первые столбы русловых секций плотины вблизи напорной грани отошли от основания до достижения проектного уровня верхнего бьефа. По мере наполнения водохранилища до нормального подпорного уровня суммарный расход дренажа основания постепенно увеличился до 550 л/с, а сквозные трещины первого столба плотины в районе отм. 344 м пропускали расход до 460 л/с.

В подобном состоянии плотина работала не менее 8 лет. Все это время высокоскоростной фильтрационный поток разрушал бетон и цементный камень. Мировой опыт показывает, что через 30 – 40 лет эксплуатации цементационных завес и зон укрепительной цементации их противофильтрационные, прочностные и деформацион-

ные качества значительно ухудшаются. В 1982 г. интенсивность выноса ионов кальция из цементационной завесы водосливной плотины С-Ш ГЭС составляла от 6 до 19 мг/с на секцию. За годы эксплуатации значительная доля извести из зацементированной области основания вынесена фильтрационным потоком. В гидротехнике трещин не должно быть. Только в 1996 году специалистам из Франции удалось полимерами восстановить монолитность плотины. При проведении в 1996–2003 гг. ремонтных работ в основании плотины и отборе выбуренных кернов были зафиксированы признаки выщелачивания цементного камня и бетона.

При анализе поведения плотины наибольший интерес представляют сопоставимые значения перемещений, деформаций и напряжений при минимальном уровне ВБ. Это отметка 500 м, через которую уровень ВБ за время эксплуатации плотины проходил 20 раз. Именно в момент прохождения через уровень мертвого объема (УМО) четко прослеживается необратимость большинства происходящих на гидроузле процессов. Рассмотрим некоторые из них:

1. Омоноличивание основания и бетона первого столба на порядок снизило фильтрацию, но не остановило перемещения плотины в сторону нижнего бьефа [2]. В течение всего периода эксплуатации происходят необратимые радиальные перемещения секций, а также необратимые угловые перемещения горизонтальных сечений плотины, фиксируемые при УВБ 500 м. В 2006 г. максимальное перемещение гребня секции 33 под действием гидростатической и термической нагрузки, в сторону НБ составило 141,5 мм, из которых 59 мм зафиксированы как необратимые перемещения [2, 8]. Если к этим значениям добавить "скрытую" часть необратимых перемещений ключевой секции (около 15 мм), обусловленную сближением берегов, то окажется, что секция 33 "переступила" за предупреждающий критерий безопасности К1.

Даже в мае 2009 г. зафиксированы необратимые перемещения на всех отметках, несмотря на то, что в последние два года УВБ был ниже НПУ. Таким образом, после каждой сезонной сработки УВБ гребень плотины не возвращается в исходное положение, а все более "сползает" в сторону нижнего бьефа.

Следует отметить, что по величине перемещений секция 18 опережает секцию 45 только на отметке гребня. На более низких отметках остаточные перемещения секции 45 опережают перемещения секции 18.

Марка 4 поперечного гидронивелира секции



18 расположена на отм. 311 м на стыке третьего и четвертого столбов плотины. Эта марка с 1982 по 1986 г. зафиксировала смещение контакта бетон – скала в сторону НБ на 8 мм. За прошедшие с тех пор годы смещение этой марки увеличилось.

2. Наблюдаются необратимые деформации растяжения под первыми столбами секций на глубину до 30 м от контакта скала – бетон. Процессы разуплотнения происходят в зонах сопрягающей цементации и глубокой цемзавесы. Остаточные приращения деформаций растяжения четко фиксируются при УМО в разных слоях основания.

При увеличении напора максимальные приращения деформаций в этих слоях увеличиваются под стационарными секциями до 5,5 мм, под водосливными секциями – до 3,3 мм. Зона деформации растяжения в основании плотины простирается на 74 м от напорной грани при общей ширине плотины 105 м [8]. В пределах этой зоны контакт подошвы плотины с основанием или отсутствует, или становится не плотным и практически исключается из эффективной работы по восприятию сдвигающих нагрузок.

Одновременно происходит непрекращающееся уплотнение основания под низовым клином плотины. Наибольшее приращение деформаций сжатия при УМО отмечается в секции 18. Интенсивность накопления остаточных деформаций сжатия под четвертым столбом секции 18 год от года увеличивается. Последние обстоятельства можно интерпретировать следующим образом: плотина надежно опирается на скальное основание только последним четвертым столбом.

3. Следствием нарастания необратимых перемещений плотины в сторону нижнего бьефа является наблюдающееся при УМО увеличение сжимающих напряжений в наиболее нагруженных зонах плотины – в верхних арочных поясах и в низовом клине. Максимальные напряжения у напорной грани по арочному поясу на отм. 504 м при нормальном подпорном уровне возросли на 1,4 МПа и достигают 11 МПа. Максимальное консольное напряжение на отм. 322 м низовой грани секции 45 возросло с 10,4 до 11,1 МПа [8].

4. Непрерывно увеличиваются деформации растяжения напорной грани при УВБ 500 м. В русловых секциях раскрытие заинъецированных трещин увеличивается. Выполненная цементация обжала дефектную зону первого столба, заполнила пустоты и трещины, но не остановила процесс трещинообразования. При наполнении водохранилища выше отм. 530 м происходит нарушение монолитности бетона напорной грани в большинстве контролируемых секций, что под-

тверждается заметным увеличением фильтрационных расходов через бетон.

5. Необратимые перемещения плотины свидетельствуют о том, что критерии безопасности определялись по предельному состоянию, когда в расчет закладывался более высокий по модулю предел прочности горной породы на сжатие, а не предел текучести горной породы. В этом "разрешенном" состоянии массив кристаллических сланцев под воздействием передаваемой от плотины сдвигающей нагрузки почти в 18 млн. т испытывает необратимые пластические деформации.

В результате необратимых и сезонных перемещений плотины в массиве береговых примыканий со стороны ВБ образуются зоны разуплотнения к виде трещин, параллельных напорной грани. В эти трещины проникает вода с напором верхнего бьефа и увеличивает сдвигающую нагрузку на береговые массивы. Чем больше смещение плотины, тем больше разуплотнение в районе напорной грани и тем больше сдвигающая нагрузка на береговые массивы. Таким образом, процесс пластической деформации скальных пород береговых примыканий является самоподдерживающимся.

В соответствии с известными теориями прочности достижение материалом сооружения предела текучести и переход материала в состояние пластического течения нежелательны.

Из сказанного можно сделать вывод о том, что арочно-гравитационная плотина переходит в иное качество: она все меньше работает как гравитационная плотина и все больше – как арочная. Состояние незатухающего пластического деформирования береговых массивов объясняет причину роста арочных напряжений в плотине и берегах. При этом деформация более податливого массива левобережного примыкания обеспечивает асимметричное смещение гребня плотины в сторону нижнего бьефа.

6. Турбинные водоводы ГЭС и их анкерные опоры выполнены как сталежелезобетонные конструкции, вынесены на низовую грань плотины и жестко с нею связаны. Водоводы воспринимают заметную долю нагрузки на плотину. Об этом свидетельствует то обстоятельство, что напряжения сжатия в металлических элементах продольного направления (металлической оболочке и арматурных стержнях) увеличиваются год от года. К 2006 г. сжимающие продольные напряжения в металлической оболочке водоводов возросли на 14,9 МПа и достигли 106 МПа, во внутренней арматуре возросли на 46,2 МПа и достигли 268 МПа, во внешней арматуре возросли на 57,5 МПа



и достигли 221 МПа. Такой характер изменения продольных напряжений в арматуре и оболочке водоводов соответствует изменению напряжений консольного направления в бетоне низовой грани, с которой облицовка турбинных водоводов имеет жесткую связь.

За время эксплуатации суммарное продольное усилие в каждом из турбинных водоводов увеличилось и достигло примерно 15 тыс. т. Часть этого усилия (примерно 5 тыс. т) передается горизонтальному участку металлической оболочки водоводов в районе деформационного шва.

7. Диаметр металлической оболочки на входе в спиральную камеру составляет около 6,5 м, ее максимальная толщина – 40 мм. Обращает на себя внимание многолетний противоестественный прирост напряжений в арматуре и стальной оболочке спиральной камеры, особенно в верхних точках ее входного участка. Например, в стальной оболочке спиральной камеры гидроагрегата ГА-4 прирост кольцевых напряжений с 1990 по 2006 г, составил 46 МПа, в оболочке спиральной камеры гидроагрегата ГА-8 прирост составил 26,4 МПа.

8. О возможной передаче усилий на сооружение машинного зала свидетельствует также необратимая составляющая закрытия конструктивных швов между анкерными опорами и зданием ГЭС. Наибольшие суммарные остаточные значения закрытия швов (1980 – 2006 гг.) в анкерных опорах гидроагрегатов ГА-6 (секция 26) и ГА-8 (секция 30) достигли 3,6 мм [9]. С учетом наложения сезонных размахов закрытие некоторых швов превышает 4 мм. Усилие, необходимое для закрытия шва на 4 мм за счет сжатия горизонтального участка металлической оболочки водовода, составляет около 5000 т. Именно такое усилие приходит сюда со стороны перемещающегося гребня плотины и ее низовой грани.

Инструментальные свидетельства процессов силового воздействия станционной части плотины на сооружения машинного зала достаточно убедительные, чтобы ими можно было пренебречь. Необратимые и сезонные перемещения плотины, а также усиливающаяся нагрузка на турбинные водоводы передаются на анкерные опоры и далее через металлическую оболочку на спиральные камеры и на турбинные блоки, которые жестко сопряжены со спиральной камерой.

Совокупность перечисленных деформационных и силовых процессов включает в себе опасность для гидроагрегатов станции. Относительно высокие значения необратимых и сезонных перемещений станционной части плотины могут в конечном счете передаваться сооружениям машинного зала ГЭС и нарушать соосность шахт тур-

бинных блоков и рабочих колес гидроагрегатов.

Если версии аварии на С-Ш ГЭС по причине поломки лопасти рабочего колеса турбины № 2 или работы гидротурбины в запрещенной зоне нагрузок (275–585 МВт при напоре 215 м) будут отвергнуты, тогда следует проверить состоятельность предлагаемой версии.

О необходимости проверки пространственного положения осей гидроагрегатов свидетельствуют следующие причины часто возникающих аварийных ситуации на гидроагрегатах после 35 лет их эксплуатации [1]: "нарушение центровки вследствие изменения пространственного положения гидроагрегатов; нарушение равномерности зазоров и высотных отметок в плане и по высоте подвижных частей гидроагрегатов относительно неподвижных".

Гипотеза состоит в том, что плотина навалилась на машинный зал и нарушила соосность агрегата. Центровка осей 2700-тонного агрегата должна иметь точность в микроны! Начались биевание и вибрации, которые заметили за сутки до аварии, но не сделали аварийной остановки. Агрегат пошел вразнос, что характерно при дисбалансе и нарушении соосности. В пользу гипотезы говорит то, что болты гидроагрегата, найденные в машинном зале, были не только треснутыми, но и покрытыми коррозией, то есть находились в сложном состоянии достаточно давно.

Служба эксплуатации ГЭС ответственно проводит мониторинг гидротехнических сооружений. За 30 лет накоплен огромный объем натуральных наблюдений, результаты которых сверяются с критериями безопасности К1 и К2. В свете отмеченных особенностей работы плотины следует пересмотреть назначенные критерии безопасности. В условиях непрекращающихся пластических деформаций береговых массивов неизвестно, какой запас несущей способности остался у комплекса плотина – основание – берега.

Практика эксплуатации показала, что для адекватного объяснения поведения Саяно-Шушенской плотины нужно использовать новые знания. Нильс Бор сформулировал для квантовой механики принцип дополнительности, после чего многие явления микромира стали понятными каждому физическому. Дня объяснения: поведения комплекса сооружений С-Ш ГЭС нужно сформулировать свои "принципы дополнительности".

Выводы

1. В течение последних лет на всех отметках Саяно-Шушенской плотины наблюдаются четко фиксируемые при минимальном уровне ВВ необратимые линейные и угловые перемещения, яв-



ляющиеся следствием пластической деформации береговых массивов.

2. При действующих напорах плотина все меньше работает как гравитационная и все больше — как арочная, отчего происходят непрекращающийся рост арочных напряжений, и перераспределение нагрузок, воспринимаемых основанием и берегами.

3. Перемещения плотины и увеличивающиеся деформации растяжения в основании первых столбов снижают эффективную площадь контакта плотины с основанием и устойчивость работы контакта на сдвиг.

4. Общие (необратимые и сезонные) перемещения плотины в сторону нижнего бьефа и усиливающаяся нагрузка на турбинные водоводы передаются на анкерные опоры и далее через металлические оболочки водоводов на спиральные камеры и турбинные блоки машинного зала.

5. Перемещения стационарной части плотины и жестко связанных с нею турбинных водоводов могут нарушать соосность шахт турбинных блоков и рабочих колес, провоцируя возникновение вибраций гидроагрегатов.

6. Непрекращающиеся линейные и угловые перемещения плотины, рост арочных напряжений, деформации растяжения в основании первых столбов и напорной грани плотины, рост напряжений в турбинных водоводах и спиральных камерах гидроагрегатов требуют пересмотра критических значений диагностических показателей в сторону их ужесточения.

7. В сложившихся условиях для обеспечения надежной работы Саяно-Шушенского гидроузла следует оптимизировать значение НПУ, снизив гидростатическую нагрузку на плотину.

8. Для адекватного объяснения особенностей поведения плотины и во избежание неблагоприятных ситуаций в будущем необходимо:

- учитывать воздействие веса водохранилища на прогибание земной коры с привлечением методов космической геодезии;

- учитывать силовое, физико-химическое и температурное воздействие фильтрационного потока в упругом режиме на массив основания и береговых примыканий;

- более полно учитывать реологические свойства горных пород основания и береговых примыканий, а также регулярно исследовать геофизическими методами их состояние;

- использовать современные достижения механики хрупкого разрушения для расчета трещинообразования в бетоне напорной грани и в массиве береговых примыканий плотины;

- регулярно проверять пространственное положение осей гидроагрегатов и турбинных блоков;

- учитывать совместную работу и взаимозависимость перемещений плотины, основания, турбинных водоводов и сооружений машинного зала; плотина не является обособленным объектом — она часть единого комплекса.

Не все факторы еще учтены. Масса гигантского водохранилища перед плотиной — миллиарды тонн. По расчетам уже сейчас произошло проседание грунта под плотиной на 30 см — это новые напряжения. Не изучены последствия взрывов при строительстве берегового водосброса. Кроме того, непонятны глобальные воздействия гидроузла на земную кору и тектонические процессы. Это столь сложные задачи, что в США давно не строят больших ГЭС, ведь ту же нагрузку можно снять с каскада станций средней мощности.

Но самая главная опасность состоит в том, что зимой, поскольку агрегаты не работают, водоводы промерзнут, перестанут подпирать плотину — и она может крепко навалиться и на другие агрегаты, которые пока остались в целостности.

Единственный выход — резко снизить напор и уменьшить нагрузку на станцию. Возможные экономические потери мизерны по сравнению с тем ущербом, который принесет дальнейшее разрушение Саяно-Шушенской ГЭС.

Ист. инф. : Тетельмин В. В. Воздействие строительства крупных гидроузлов на изостатическое состояние земной коры // Гидротехническое строительство. - 2009. - № 11. - С 46 - 50.;

Тетельмин В. В., Анализ необратимых процессов в створе плотины Саяно-Шушенской ГЭС./ Гидротехническое строительство./ -2010. 2009. - № . - С 47 - 51.; <http://www.izvestia.ru/obshchestvo/article3132864>

