

Статья профессора Вениамина Исааковича Марона была передана автором в редакцию нашего журнала в 2011 г. При работе с рукописью сначала у рецензента, а затем у редколлегии возник ряд вопросов, решение которых требовало участия автора. К сожалению, в связи с безвременной кончиной Вениамина Исааковича работа над статьей не могла быть завершена в рамках обычного издательского процесса. В результате, принято единственно возможное, на наш взгляд, решение: опубликовать рукопись в оригинальном виде при минимальной технической правке, которую любезно взял на себя профессор В.Н. Николаевский. Этот вариант статьи и предлагается вниманию читателей.

Главный редактор В.О. Михайлов

МЕХАНИЗМЫ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ИЗВЕРЖЕНИЯ ВУЛКАНА И РАБОТЫ СКВАЖИНЫ. ПРИЧИНА АВАРИИ 2009 г. НА САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС

© 2012 г. В.И. Марон

*Российский государственный университет нефти и газа им. И.М. Губкина,
г. Москва, Россия*

Рассмотрены механизмы формирования неустойчивости и гидроударов в различных природных и техногенных объектах и одна из возможных версий аварии 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС.

Ключевые слова: вулкан, жерло, скважина, магма, гидравлическая характеристика.

Структура вулкана включает в себя вулканическую камеру на глубине ~20–30 км, заполненную магмой, расплавом пород при температуре ~1000 К, жерло вулкана. Над поверхностью Земли обычно возвышается конусовидная (или иной формы) гора с чашеобразным кратером, которая возникла в результате застывания потоков лавы, вытекающих из жерла вулкана в периоды его активности. Вулканическая камера может подпитываться магмой из более глубокой камеры на глубине ~60–100 км, расположенной на границе мантии и литосферы в зонах пониженного напряжения, где магма переходит в расплав и приобретает подвижность. Магма в вулканических камерах содержит большое количество растворенных газов и паров воды, которые определяют активность вулканической деятельности и текучесть лавы.

Под неустойчивым извержением вулкана будем понимать более или менее периодическую смену интервалов его активности, когда происходит выброс магмы, паров воды, газов и истечение лавы, и периодов, когда движение лавы прекращается, и деятельность вулкана проявляется в истечении газов или полностью отсутствует. Будем рассматривать относительно спокойные вулканы, в кратерах которых не образуются пробки, чей выброс непредсказуем и часто приводит к катастрофическим последствиям для людей и окружающей среды.

Описание механизмов неустойчивости извержения грязевых вулканов в таком понимании тесно связано с основополагающим в гидравлике понятием гидравлической характеристики устройства, через которое течет жидкость. Эта характеристика определяет давление P_0 на входе устройства в зависимости от давления на его выходе P_k ,

гидростатического давления $\rho g \Delta Z$ и потерь на трение $F(Q)$, связанных с движением жидкости:

$$P_0 = F(Q) + \rho g \Delta Z + P_k, \quad \Delta Z = Z_k - Z_0, \quad (1)$$

где ΔZ – разность высот выхода и входа устройства.

Гидравлические характеристики систем “пласт–скважина” и “вулканическая камера–жерло вулкана” представлены на рис. 1, где на вертикальной оси $\Delta P = P_0 - P_k$.

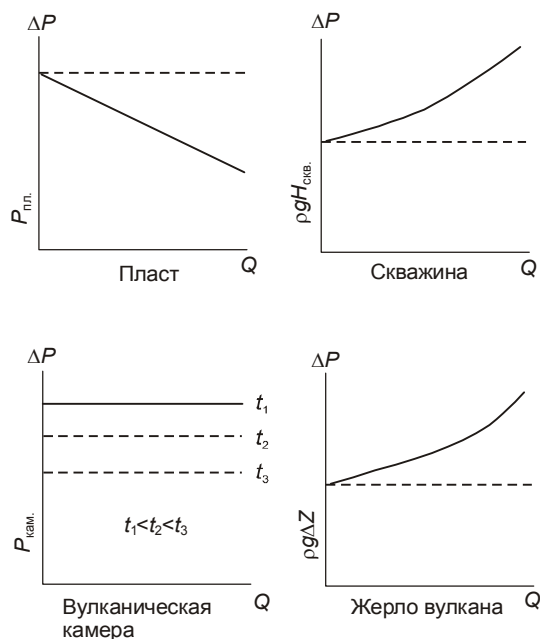


Рис. 1. Гидравлические характеристики систем “пласт–скважина” и “вулканическая камера–жерло вулкана”

Рассмотрим сначала механизм неустойчивости, обусловленный уменьшением гидростатического давления из-за выделения летучих в промежуточной камере и жерле вулкана. Представим себе, что в начальный момент давление в камере вулкана меньше или равно гидростатическому давлению магмы в его жерле:

$$\Delta P \leq \rho_m g \Delta Z. \quad (2)$$

В этом случае вулканическая камера “задавлена” весом столба жидкости в жерле, и вулкан никак себя не проявляет, разве только незначительными выходами газа. Но жерло вулкана проходит через пласты воды, которая попадая в него, испаряется; кроме того, от жерла отходят трещины, заполненные магмой, которые могут спровоцировать движение жидкости и ее дегазацию. Дегазация, в свою очередь, приводит к уменьшению веса столба жидкости, тем более заметному, чем больше выделяется газов:

$$\rho_{gm} = \rho_g \varphi + \rho_m (1 - \varphi), \quad (3)$$

где φ – количество выделившегося газа на единицу объема.

В вулканической камере тоже может происходить выделение паров и газа, что приводит к увеличению давления. Оба фактора – повышение давления в вулканической камере и уменьшение веса столба в жерле – могут вызвать движение газожидкостной смеси по жерлу вулкана и активное проявление вулканической деятельности с выбросом пепла, газов и образованием потоков лавы. В какой-то момент вулкан растрастит свою энергию и вернется к первоначальному состоянию слабых проявлений своей жизни. Затем описанные процессы выделения газа и паров будут повторяться, произойдет активизация вулканической деятельности и ее затухание до следующего цикла.

Сходный механизм неустойчивости может иметь место в скважине, добывающей газонасыщенную нефть, – выделение газов активизирует работу скважины и увеличивает ее дебит; уменьшение газовыделения может привести к снижению дебита вплоть до остановки скважины. Сейчас, когда многие месторождения обводнены, но из-за высокой цены на нефть продолжают эксплуатироваться, срабатывает механизм неустойчивости, связанный с утяжелением столба жидкости в скважине и задавливанием пласта. Давления в пласте недостаточно для преодоления гидростатического давления и потерь на трение; скважина останавливается, в ней происходит сегрегация воды и нефти под действием силы тяжести. Вода скапливается на забое, профильтровывается в пласт, после чего скважина может заработать вновь.

Опишем механизм неустойчивости, обусловленной особенностями зависимости потерь давления на трение от расхода и температуры жидкости в пласте или вулканической камере. Заметим сразу, что этот механизм более характерен для парафинистых и асфальтеносмолистых нефтей в скважине, чем для магмы в вулканической камере с температурой ~ 1000 К. Тем не менее, он может иметь место в вулкане при интенсивном теплообмене с окружающими жерло породами и снижении температуры на сотни градусов, как это имеет место для вулканов в полярных регионах или под ледниками.

Вязкость высоковязких парафинистых и асфальтеносмолистых нефтей экспоненциально зависит от температуры. Небольшие изменения температуры приводят к значительным изменениям вязкости движущейся среды. Это, в свою очередь, влияет на величину потерь на трение, особенно при небольших расходах, когда частица среды относительно долго движется в жерле или скважине, где происходит ее заметное остывание в результате теплообмена с окружающей средой. В этом случае первое слагаемое в (1), описывающее зависимость потерь на трение от расхода и температуры подогрева, имеет характерную “складку” (рис. 2). У легких нефтей с менее выраженной зависимостью вязкости от температуры подобной “складки” нет [Марон, 2009].

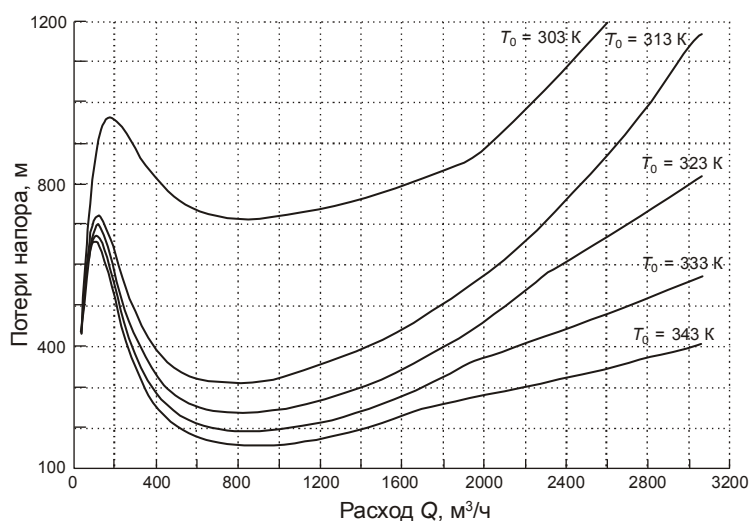


Рис. 2. Потери на трение для высоковязких нефтей

При гидравлическом описании процессов движения жидкости введем понятие *рабочей точки*.

Пласт и вулканическая камера, жерло вулкана и скважина имеют разные гидравлические характеристики. Совместная работа гидросистем “пласт–скважина”, “труба–напорная станция” или “вулканическая камеры–жерло вулкана”, обеспечивающая некоторый расход, возможна только в точках пересечения этих линий, которые и называются рабочими. Именно эти точки, обозначенные на рис. 3 буквами *A*, *B*, *C*, определяют расход и давление в рассматриваемых системах.

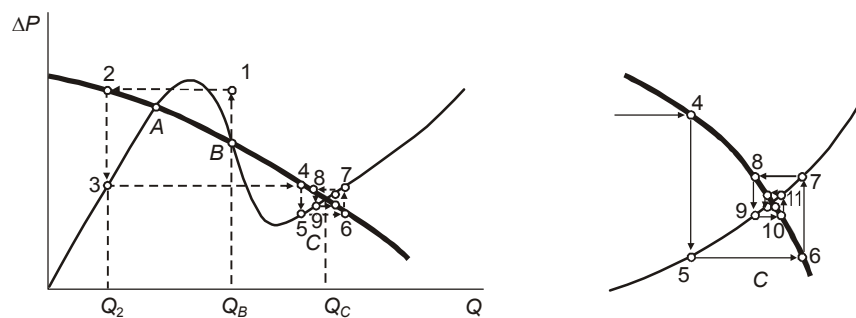


Рис. 3. Графическое представление рабочих ситуаций в системе “труба–напорная станция” (справа – ситуация вблизи рабочей точки *C* в укрупненном масштабе). Тонкая линия – гидравлическая кривая трубы, утолщенная – напорной станции

Из-за “складки” (см. рис. 2) в системах “труба–напорная станция”, “пласт–скважина”, “вулканическая камера–жерло вулкана” существуют, по крайней мере, две рабочие точки. На восходящих участках гидравлической кривой трубы рабочие точки устойчивы, а на нисходящих – неустойчивы [Алиев, Марон, Немудров, 1989]. На рис. 3 показан пошаговый переход из неустойчивой рабочей точки *B* в устойчивую рабочую точку *C*. Каждый шаг – это, как правило, изменение расхода или давления. Ясно, что отмечаемые переходы сопровождаются гидроударами.

Но неустойчивая точка *B* может быть расположена и так, что изменение расхода приводит к гидроудару и остановке скважины (рис. 4).

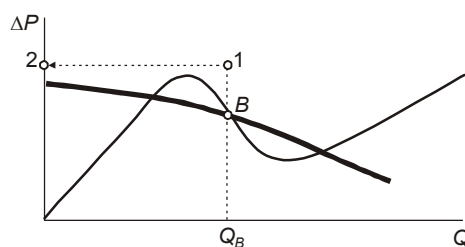


Рис. 4. Остановка системы и гидроудар в результате увеличения расхода в трубе

Гидравлическая характеристика пласта линейно зависит от расхода, но описанные процессы неустойчивого поведения системы “труба–напорная станция” имеют место и в системе “пласт–скважина”. При этом неустойчивость в системе “пласт–скважина” или “вулканическая камера–жерло вулкана” может быть результатом действия обоих рассмотренных механизмов. Заметим, что для трубопровода, расположенного на более или менее равнинной местности, гидравлическое давление не играет роли в развитии процессов неустойчивого поведения системы, поэтому на рис. 2, 3 гидростатическое давление не учтено.

Опишем еще один механизм неустойчивости, относящийся к вулканической деятельности и, возможно, к скважинам с парафинистой и асфальтеносмолистой нефтью. Он связан с появлением структур из-за уменьшения текучести жидкости как при остывании магмы в жерле вулкана, так и нефти в скважине. Зависимость напряжения трения от скорости сдвига такова, что гидравлическая характеристика канала имеет форму кривой, выпуклой вниз, как для тиксотропной среды [Алиев, Марон, Немудров, 1989]. В этом случае существуют две рабочие точки. Одна из них находится на нисходящей части кривой и является неустойчивой; другая – устойчивая – на восходящей. Существование неустойчивой рабочей точки служит возможной причиной потери устойчивости всей системы и гидравлических ударов в ней. Для возникновения каждого из

описанных механизмов неустойчивости можно предложить математические модели, решения которых будут неустойчивыми при некоторых параметрах модели.

Теперь рассмотрим возможные причины аварии на Саяно-Шушенской гидроэлектростанции им. П.С. Непорожного, механизм которой сходен с описанными и связан с особенностями гидравлической характеристики гидрогенератора.

В официальном сообщении компании РусГидро [Акт..., 2009] говорится, что 17 августа 2009 г. на Саяно-Шушенской ГЭС работали девять гидроагрегатов из десяти – один агрегат (шестой) после ремонта, начатого 27 января 2009 г. и заканчиваемого по графику 21 августа 2009 г., находился в резерве.

Примерно в 4 ч 13 мин по московскому времени в машинном зале раздался громкий хлопок в районе второго гидроагрегата, где вслед за хлопком произошел мощный выброс воды. Частично разрушенная гидротурбина и крышка второго гидрогенератора были выброшены из колодца. На оставшихся восьми гидрогенераторах произошел сброс нагрузки, вследствие чего станция была обесточена. Вода, под большим давлением хлещущая из турбинного колодца второго агрегата, разрушила часть конструкций машинного зала и залила другие гидроагрегаты; машинный зал и помещения под ним были затоплены.

К 5 ч 20 мин на гребне плотины вручную были закрыты аварийно-ремонтные затворы на водоводах всех гидроагрегатов, благодаря чему был прекращен доступ воды с верхнего бьефа в машинный зал.

При аварии погибли 75 человек из персонала станции. Внешний осмотр, проведенный несколько дней спустя, показал, что второй, седьмой и девятый гидроагрегаты разрушены; серьезные повреждения получили первый и третий гидроагрегаты; незначительные – четвертый, пятый, восьмой и десятый; шестой гидроагрегат находится в удовлетворительном состоянии.

На фотографии разрушенного второго гидроагрегата, сделанной после откачки воды (рис. 5, *внизу*), достаточно хорошо видна турбина вместе с ее крышкой, валом и остатками крепежа ротора электрогенератора.

Турбинная крышка, разделяющая поток воды и пространство над турбиной, крепится 80 шпильками М80, внутренний диаметр которых по резьбе равен 75.67 мм при шаге резьбы 4.0 мм. Расследование показало, что состояние крепежных шпилек было плохим, на некоторых из них не было гаек.

Высказывались различные версии произошедшего со вторым агрегатом [Штерн, 2009]. Версии о взрыве трансформатора или оплавлении обмотки электрогенератора из-за нарушения синхронизации не подтвердились. Предположение о теракте тоже не нашло подтверждения из-за отсутствия каких-либо следов взрывчатки. Версия о возможном заводском браке в турбине также не кажется обоснованной, так как турбина неплохо сохранилась даже после катастрофы. То, что произошло со вторым гидрогенератором, привело к практически мгновенному разрушению его креплений и выбросу из турбинного колодца.

Описанные разрушения второго гидрогенератора с отрывом турбинной крышки можно объяснить только внезапными повышениями давления в колодце гидроагрегата, что могло быть результатом гидроударов в системе водовод–гидрогенератор. Чтобы понять, почему возникли эти гидроудары, рассмотрим типичную гидравлическую характеристику гидрогенератора (рис. 6).

Напомним, что гидравлические характеристики водоканала и гидроагрегата показывают, какое давление на входе в устройство нужно создать, чтобы преодолеть гидростатическое давление, потери давления на трение и обеспечить заданное давление на выходе из устройства. Совместная работа водотока и гидроагрегата возможна только в точках пересечения гидравлических характеристик, называемых рабочими.



Рис. 5. Общий вид машинного зала Саяно-Шушунской ГЭС до аварии (*вверху*) и разрушенная турбина второго гидрогенератора (*внизу*)

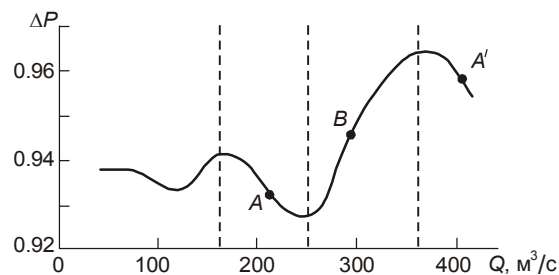


Рис. 6. Типичная гидравлическая характеристика гидрогенератора

На вертикальной оси указана величина падения давления на трение по отношению к давлению в 20 атм. в водоводе, идущем к агрегату. Расход воды через второй агрегат, соответствующий этому давлению, составляет $389.7 \text{ м}^3/\text{с}$.

Характеристики гидрогенераторов имеют восходящие и нисходящие участки. Рабочие точки на нисходящих (точки *A* и *A'* на рис. 6) неустойчивы из-за отрицательной величины производной давления по расходу; на этих участках совместная работа водоканала и гидроагрегата оказывается неустойчивой.

Особенности гидравлических характеристик гидрогенераторов связаны с тем, что в отличие от центробежного насоса скорость вращения турбины гидрогенератора не

задана и определяется, прежде всего, величиной давления на входе (весом столба жидкости в водоводе) и режимами течения в гидроагрегате, в частности, возникновением кавитационных жгутов под турбиной в зонах неустойчивости. Кавитационные жгуты “съедают” значительную часть вырабатываемой электроэнергии, поэтому в правилах эксплуатации работа агрегата на этих участках либо запрещена, либо нежелательна (рис. 7).

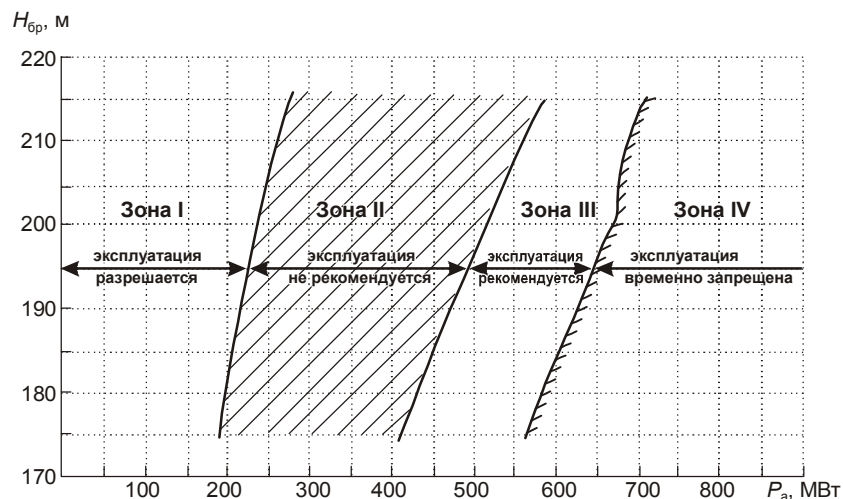


Рис. 7. Регламентируемые инструкцией режимы работы гидрогенератора

Гидравлические характеристики водовода в основном определяются местными сопротивлениями на входе в гидроагрегат и выходе из него и различаются в зависимости от типа гидрогенератора. Аналитически они близки к параболической зависимости падения давления от расхода.

Крутизна восходящих и нисходящих участков гидравлической характеристики турбины и параболическая зависимость гидравлической характеристики водовода от расхода приводят к тому, что возвращение системы в устойчивое состояние после возмущения давления и расхода в системе сопровождается многочисленными гидравлическими ударами, что относится и к устойчивым, и к неустойчивым рабочим точкам.

На рис. 8, 9 показано поведение системы водовод–гидрогенератор после возмущения давления на шаге 1 в устойчивой рабочей точке *B* и неустойчивой рабочей точке *A'*.

На рис. 8 видно, что система водоканал–гидрогенератор вернулась в исходное состояние, т.е. в рабочую точку *B*, на десятом шаге. На каждом шаге из-за изменения давления и расхода происходили гидравлические удары с различной амплитудой давления.

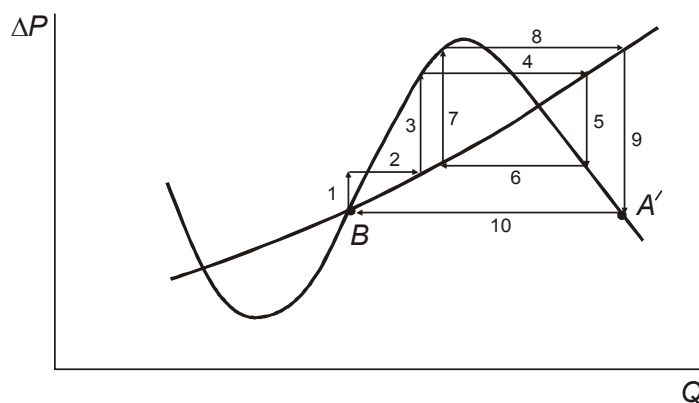


Рис. 8. Поведение системы в устойчивой рабочей точке *B*

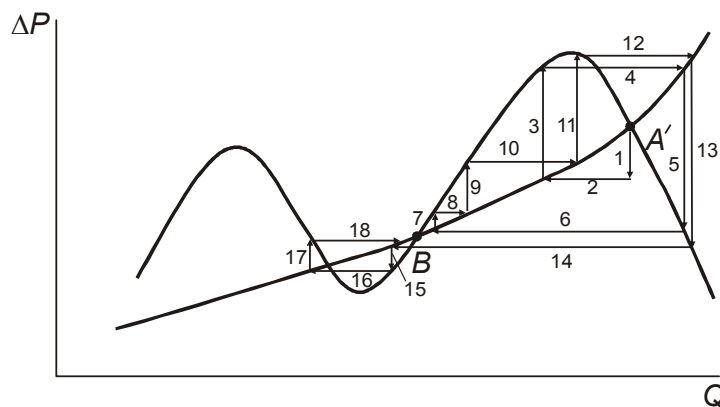


Рис. 9. Поведение системы в неустойчивой рабочей точке A'

В Акте комиссии Ростехнадзора [Акт..., 2009] сообщалось, что 16 августа 2009 г. в 19 ч 14 мин по московскому времени, т.е. за 9 часов до катастрофы, по решению оперативного персонала станции второй гидроагрегат был выведен из резерва. Все это время он работал в режиме регулируемой нагрузки по заданию филиала ОАО “СО ЕЭС” – ОДУ “Сибири” под автоматическим управлением регулирования мощности АРЧМ–ГРАРМ. Вплоть до катастрофы его мощность регулировалась не менее 13 раз в диапазоне от 10 до 610 МВт. Комиссия считает, что второй гидроагрегат в момент аварии работал в рабочей точке на нисходящей кривой A' в зоне временного запрета на эксплуатацию (объемный расход $Q = 312 \text{ м}^3/\text{с}$, мощность $N = 600 \text{ МВт}$).

Для случая возмущения давления в рабочей точке A' нарисованы 18 шагов (см. рис. 9). Число шагов будет расти, так как система не может вернуться в исходное состояние. Система может перейти в рабочую точку только на устойчивом участке гидравлической характеристики, однако за восемнадцать изображенных шагов это не произошло.

На рис. 9 видно, что наибольшие по амплитуде давления гидроудары имели место на шестом и четырнадцатом шагах (отметим, что число шагов и соответственно гидроударов зависит от знака и величины возмущения).

Доказательством того, что во втором гидрогенераторе имели место связанные с гидроударами волновые процессы, может служить сообщение сейсмологической станции “Черемушки”, находящейся в четырех километрах от Саяно-Шушинской ГЭС. За 15–45 мин до аварии на ГЭС на сейсмологической станции фиксировалась аномальная вибрация с частотами от 14 до 18 Гц. Эти частоты являются доминантными для окружающих ГЭС пород и, в отличие от других частот, генерируемых гидроударами, практически не затухают на названных расстояниях [Николаевский, 2010].

Все говорит в пользу версии о том, что в гидроагрегате имела место серия гидроударов, продолжавшаяся почти час и приведшая к разрушению крепежных шпилек турбинной крышки и последующей масштабной аварии. Тогда возникают два вопроса. Почему не сработала система управления гашения волн давления? Почему аварийно-ремонтные затворы на водоводах были закрыты вручную только через час после аварии, и до этого момента вода поступала на агрегаты?

Благодарности

Автор благодарен А.В. Каракину, который не только инициировал его интерес к рассматриваемой в статье проблеме, но и предоставил работы Ю.И. Лобановского, использованные при написании данной статьи.

Литература

- Акт технического расследования причин аварии, произошедшей 17 августа 2009 г. в филиале Открытого акционерного общества “РусГидро” – “Саяно-Шушенская ГЭС имени П.С. Непорожного” // <http://www.gosnadzor.ru/news/aktSSGbak.doc>
- Алиев Р.А., Марон В.И., Немудров А.Г. Исследование устойчивости перекачки тиксотропной жидкости по трубопроводу // Надежность и эффективность сооружения и эксплуатации трубопроводных систем / Под ред. В.Л. Березина. Вып. 215. М.: МИНГ, 1989. С.120–125.
- Марон В.И. Гидродинамика однофазных и многофазных потоков в трубопроводе. М.: МАКС-Пресс, 2009. 340 с.
- Николаевский В.Н. Доминантные частоты / Собрание трудов. Геомеханика. Т. 2. М.; Ижевск: ИКИ – РХД, 2010. С.285–338.
- Штерн Б. Хроника катастрофы и ее версии // <http://www.scientific.ru/trv/36N.pdf>

Сведения об авторе

МАРОН Вениамин Исаакович (1937–2011) – доктор технических наук, профессор Государственной академии нефти и газа, действительный член РАЕН, член Комиссии по геомеханике при президиуме РАН, Международной лаборатории нанотехнологии и нанобиологии (Рим, Италия); лауреат премии им. академика И.М. Губкина. Автор более двухсот работ, в том числе семи книг, шести изобретений и двух патентов. Выведенное В.И. Мароном интегродифференциальное уравнение с ядром запаздывания в иностранной литературе названо его именем.

VOLCANIC ERUPTION AND WELL FUNCTIONING INSTABILITY MECHANISMS. THE CAUSE OF ACCIDENT AT SAYANO-SHUSHENSKOYE HYDROPOWER STATION, 2009

V.I. Maron

Gubkin Russian State University of Oil and Gas, Moscow, Russia

Abstract. The article examines mechanisms of instability formation and hydraulic shocks at different natural and technogenetics objects. One possible version of the 2009 accident at Sayano-Shushenskoye hydropower station is considered.

Keywords: volcano, crater, magma, hydraulic characteristics.