

**ОГРАНИЧЕНИЯ СКОРОСТИ ИЗМЕНЕНИЯ УРОВНЕЙ ВОДЫ
ВОДОХРАНИЛИЩ ПРИ УПРАВЛЕНИИ РЕЖИМАМИ РАБОТЫ
ГИДРОЭЛЕКТРОСТАНЦИЙ В СООТВЕТСТВИИ С ТРЕБОВАНИЯМИ
ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

© 2012 г. А.Ю.Александровский, С.В. Хасянов

Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт», Москва

Ключевые слова: режим работы водохранилищ, безопасность гидротехнических сооружений, скорость изменения уровня воды.

Рассматривается влияние ограничений скорости изменения уровня воды в водохранилище на режим его работы. Оценивается влияние ограничения на показатели работы гидроэлектростанции. Предложено учитывать ограничения скорости изменения уровня при водохозяйственных и водноэнергетических расчетах.



А.Ю.Александровский

С.В. Хасянов

Введение

Ввод в эксплуатацию гидроэлектростанции обычно связан с созданием водохранилища, основным назначением которого является перераспределение речного стока во времени. Влияние водохранилища на водный режим реки и, соответственно, на окружающую среду тем значительней, чем больше его абсолютный и относительный полезные объемы по сравнению со среднегодовым стоком.

На основании Водного кодекса РФ [1] использование водных ресурсов осуществляется согласно «Правилам использования водных ресурсов водохранилищ» (далее Правила). Правила являются основным документом, регламентирующим принципы и методы управления стоком рек с максимально возможным учетом

интересов всех водопользователей и с учетом безопасности гидротехнических сооружений гидроузла.

Как правило, на этапе проектирования или перед сдачей гидроузла в эксплуатацию для разработки Правил используются исходные данные, содержащиеся в проектных материалах. По мере накопления опыта эксплуатации, изменения водохозяйственной обстановки, экологических требований к режиму использования стока Правила подлежат пересмотру.

В составе Правил разрабатываются диспетчерские графики и положения, которые определяют основное содержание Правил и являются средством управления водными ресурсами водохранилища в условиях гидрологической неопределенности.

Влияние режима работы водохранилища на безопасность гидротехнических сооружений.

Безопасность гидротехнических сооружений гидроузла, следовательно, расположенных в долине реки ниже по течению населения и хозяйственных объектов, а также надежность функционирования электроэнергетического объекта, в значительной мере определяются режимом использования водных ресурсов водохранилища. Однако в настоящее время в Правилах зачастую не отражены полностью условия, связанные с безопасностью. К примеру, характеристика динамики уровня воды в водохранилище – скорость повышения или снижения горизонта в расчетном интервале времени – в диспетчерских графиках не оговаривается. Эта характеристика имеет важное и часто определяющее значение для безопасности гидротехнических сооружений [2].

Колебания уровня воды в водохранилище в процессе его эксплуатации сопровождаются перестройкой напряженно-деформированного и фильтрационного состояния массива. При этом зачастую происходит интенсификация суффозионных процессов (вынос мелких минеральных частиц породы фильтрующейся через нее водой), а также образование зон со снижающейся прочностью вследствие циклических изменений знака напряжений.

При быстрой сработке водохранилища в массиве перегораживающего сооружения могут возникать зоны избыточного давления, в которых развиваются процессы разрушения массива. Наличие в трещинах массива фильтрующей воды существенно влияет на напряженно-деформированное состояние массива в бортах водохранилищ и в местах примыкания плотины [3, 4].

При быстром подъеме уровня воды в водохранилище большие аккумулируемые массы воды не успевают реализовываться в виде объемных гидродинамических сил в скальном массиве и действуют на ложе водохранилища преимущественно как поверхностная нагрузка. Такая нагрузка приводит к деформациям бортов каньона, которые существенно влияют на напряженно-деформированное состояние плотин.

Подобные явления разрушения массива наблюдаются на крупнейшей гидроэлектростанции России – Саяно-Шешенской ГЭС. Уже в первые годы после подъема верхнего бьефа по данным измерительной аппаратуры, установленной в ближней к плотине зоне, отмечалось повышенное трещинообразование и увеличенные фильтрационные расходы в поверхностной части основания. Согласно геофизическим данным процесс дополнительного техногенного разуплотнения массива в русловой части достиг глубин порядка 50–60 м [5].

Большой комплекс исследований, проведенных на плотине лабораторией гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС, наглядно свидетельствует о существенном влиянии колебания уровня воды в водохранилище (39–40 м ежегодно) на деформации скальных примыканий плотины. Многолетние наблюдения показывают, что эти деформации берегов водохранилища непосредственно связаны с сезонными колебаниями уровня воды [4].

Таким образом, результаты наблюдений показали существенное влияние колебаний уровня воды в водохранилище на физико-механические свойства и напряженное состояние массива в примыкании и основании плотины [6]. В результате возникновения вышеописанного явления, оказывающего отрицательное воздействие на безопасность ГЭС, может возникнуть необходимость использования определенных ограничений при назначении режимов работы водохранилища.

Оценка влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели гидроэлектростанции.

Очевидно, что применение ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище приводит к изменению режима работы водохранилища, и как следствие, к изменению режима работы гидроэлектростанции. Также изменяются показатели работы гидроэлектростанции в сравнении с вариантом, при котором эти

ограничения не учитываются, - уменьшатся среднегодовая выработка электроэнергии, гарантированная зимняя мощность и др.

В работе на примере Саяно-Шушенской ГЭС рассмотрено влияние ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели работы гидроэлектростанции.

Саяно-Шушенский гидроэнергокомплекс имеет комплексное назначение. Помимо регулирования стока преимущественно в энергетических целях, он используется для нужд водного транспорта, коммунального хозяйства и срезки максимальных расходов воды для предотвращения наводнений.

Гидроэлектростанция расположена на р. Енисей на границе между Красноярским краем и Хакасией, и является крупнейшей по мощности электростанцией России. Установленная мощность станции составляет 6400 МВт (10×640 МВт), среднегодовая выработка электроэнергии – 23,5 ТВтч. Станция является первой ступенью Енисейского каскада ГЭС, в который также входят Майнская ГЭС (321 МВт и 1,7 ТВтч) и Красноярская ГЭС (6000 МВт и 20,4 ТВтч).

Саяно-Шушенская ГЭС – это мощная высоконапорная гидроэлектростанция приплотинного типа. Напорный фронт образуется бетонной арочно-гравитационной плотиной – уникальное по размерам и сложности возведения гидротехническое сооружение. Конструкция высоконапорной арочно-гравитационной плотины не имеет аналогов в мировой и отечественной практике, она входит в десятку самых высоких плотин мира. Высота сооружения 245 м, длина по гребню 1074 м, ширина по основанию 106 м и по гребню 25 м. Плотина очерчена по напорной грани радиусом 600 м. Устойчивость и прочность плотины обеспечивается не только действием собственного веса (60 %), но и работой верхнего арочного пояса с передачей нагрузки на скальные берега (40 %). Водосбросная часть плотины длиной 190 м расположена у правого берега и является эксплуатационным водосбросным сооружением. Станционная часть плотины располагается в левобережной части русла реки, общая длина составляет 332 м. Проектная отметка нормального подпорного уровня (НПУ) – 540 м, форсированного подпорного уровня (ФПУ) – 544,5 м. После завершения ремонтных работ в теле плотины (1997 г.) отметка НПУ была снижена до 539 м, а ФПУ – до 540 м. После аварии 17 августа 2009 г. на период восстановления станции отметка верхнего бьефа не должна превышать 536 м.

Площадь водосбора бассейна реки, обеспечивающей приток к створу ГЭС, составляет 179 900 км², среднемноголетний сток в створе 46,7 км³. Водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС – сезонного регулирования, с полным объемом 31,3 км³, полезным – 15,3 км³, длиной 320 км и площадью 621 км².

Саяно-Шушенская ГЭС используется для регулирования мощности в единой энергосистеме Сибири. Согласно проектной документации Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс в энергообъединении, выполняет следующие функции:

- выдача в систему активной и реактивной мощности и энергии;
- частотный резерв мощности и аварийный резерв системы.

В настоящее время недостаточная пропускная способность электрических сетей не позволяет полностью использовать мощность Саяно-Шушенской ГЭС в энергосистеме, что в результате приводит к наличию «запертой» мощности. В итоге, на основании вышеизложенной информации было решено произвести расчеты по оценке влияния ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели гидроэлектростанции для двух вариантов. Первый вариант соответствует работе Саяно-Шушенской ГЭС в условиях недостаточной пропускной способности линий электропередач (максимальная мощность станции 4000 МВт). В качестве второго варианта рассматривалось использование проектной установленной мощности станции 6400 МВт.

Для оценки влияния ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище были выполнены водохозяйственные и водноэнергетические расчеты, в результате которых были получены показатели работы гидроэлектростанции при различных значениях ограничений. В качестве показателей работы гидроэлектростанции приняты: $N_{\text{гар}}$ – гарантированная зимняя мощность ГЭС, обеспеченностью 90 %; \mathcal{E}_o – среднемноголетняя годовая выработка электроэнергии; $W_{\text{хол.сбр.}}$ – среднемноголетний годовой объем холостых сбросов. Расчеты выполнялись подекадно по гидрологическому ряду наблюдений за стоком с 1903 г. по 2005 г.

В качестве правил управления водными ресурсами водохранилища использовались действовавшие правила. Если режим работы по диспетчерскому графику нарушал требования по ограничению скорости изменения уровня воды в водохранилище, то водо- и энергоотдача ГЭС корректировались с учетом этих ограничений. Расчеты выполнялись по разработанной в НИУ МЭИ программе «Каскад» [7], позволяющей выполнять водохозяйственные и водноэнергетические

расчеты режима работы каскада водохранилищ с гидроэлектростанциями. Программа осуществляет расчет выработки электроэнергии ГЭС и холостых сбросов из водохранилищ каскада при известных параметрах водохранилищ (батиграфических и/или объемных кривых водохранилищ, пропускных способностей гидроузлов и др.), а также заданных гидрографов притока, ограничений изменения уровня и пр.

Ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище при сработке устанавливались в декабре, январе, феврале, марте и апреле, при наполнении – мае, июне и июле. Ограничения не устанавливались в августе, сентябре, октябре и ноябре, т. е. в период летне-осенней межени, когда режим работы водохранилища характеризуется спокойным состоянием уровня без существенных колебаний. Ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище устанавливались одинаковыми как для летнего периода, так и для зимнего периода.

Результаты расчетов по первому варианту представлены на рис. 1, по второму варианту – рис. 2.

На рис. 1а изображен график, отображающий влияние ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище на среднегодовую годовую выработку электроэнергии Саяно-Шушенской ГЭС. Из рисунка можно сделать вывод, что наибольшее влияние на выработку электроэнергии гидроэлектростанцией оказывает диапазон ограничений в пределах до 500 см в декаду. Рост выработки в диапазоне ограничений от 100 до 500 см составляет 2150 млн кВтч, что равняется 10 % от среднегодовой выработки ГЭС при работе без ограничений (22500 млн кВтч). При ограничении более чем 500 см в декаду влияние не так значительно, а после 700 см практически не заметно.

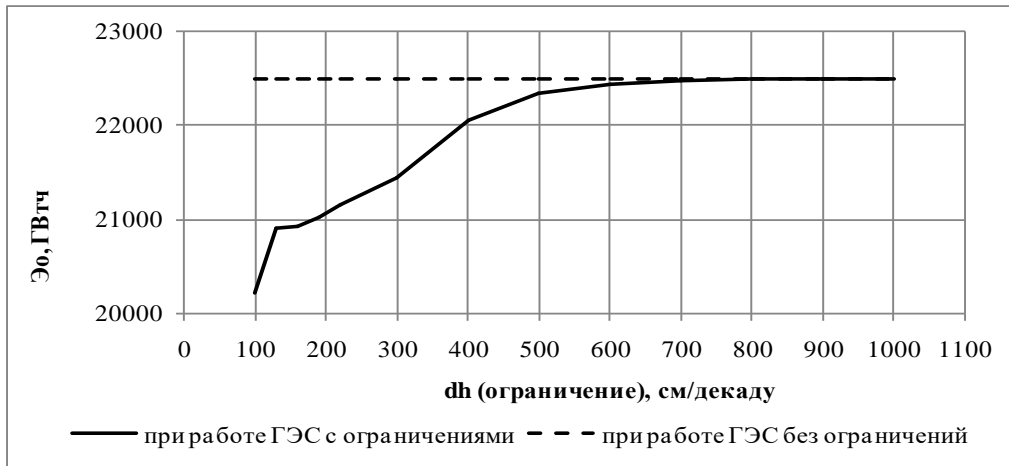
Снижение выработки электроэнергии на ГЭС в результате уменьшения допустимой скорости изменения уровня воды в водохранилище объясняется уменьшением регулирующих водных объемов водохранилища в эти периоды, что как следствие, приводит к уменьшению эффективности использования речного стока. При ограничении скорости подъема уровня увеличиваются холостые сбросы при задержке увеличения напора на турбинах ГЭС. При понижении уровня и ограничении скорости этого понижения снижаются расходы через турбины.

На рис. 1б представлена зависимость холостых сбросов воды от ограничения по скорости изменения уровня воды в водохранилище; на рис. 1в – влияние ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на гарантированную зимнюю

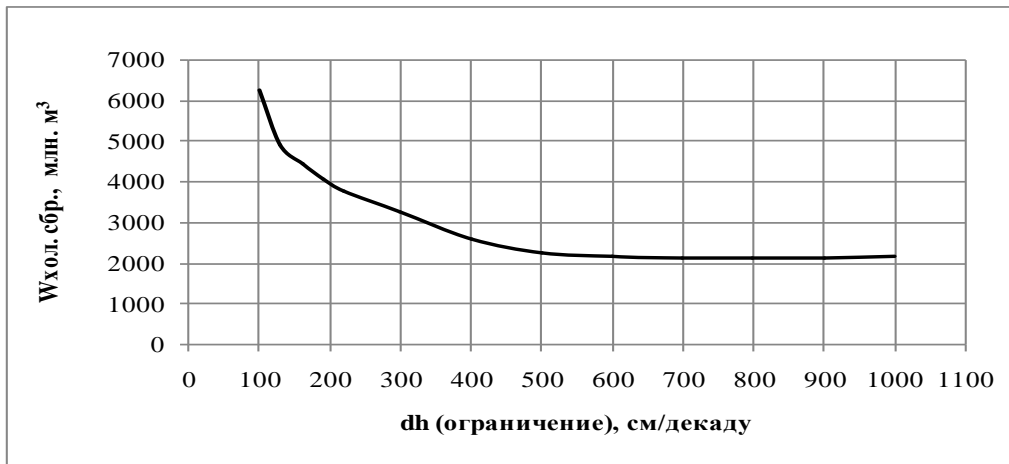
мощность ГЭС. На рис. 1*в* видно, что на гарантированную мощность ГЭС влияет диапазон ограничений до 700 см в декаду, причем это влияние достаточно значительное. Уменьшение допустимого уровня колебания воды в водохранилище с 700 до 400 см приводит к снижению гарантированной мощности на 700 МВт или более чем на 30 %. Это приводит к снижению энергоотдачи ГЭС в зимний период, когда имеет место максимум электропотребления. В результате снижается эффективность использования ГЭС в покрытии пиков нагрузки и регулировании частоты в энергосистеме, что приводит к уменьшению маневренных мощностей в энергосистеме.

Во втором варианте за счет увеличения используемой мощности среднегоголетняя выработка ГЭС больше. В сравнении с первым вариантом характер зависимости практически не изменился. В этом варианте диапазон ограничений, оказывающий влияние на среднегоголетнюю выработку ГЭС, несколько расширился. Установление ограничения в размере 600 см в декаду, в отличие от первого варианта, приводит к снижению выработки на ГЭС 80 млн кВтч (в первом варианте это значение составляет менее 10 млн кВтч). На рис. 2*б* приведена зависимость холостых сбросов воды от допустимых скоростей изменения уровня воды в водохранилище. На рис. 2*в* представлено влияние ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище на гарантированную зимнюю мощность ГЭС для второго варианта. Вид данной характеристики практически не отличается от первого варианта.

а



б



в

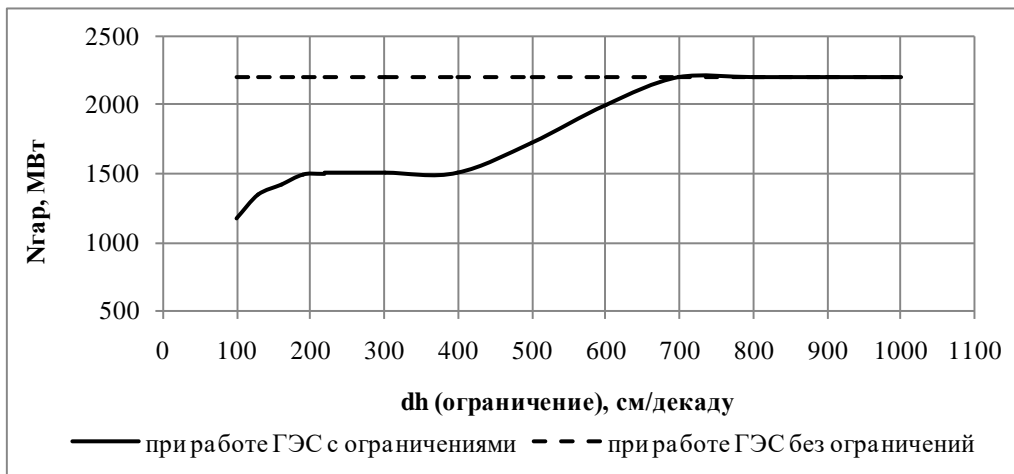
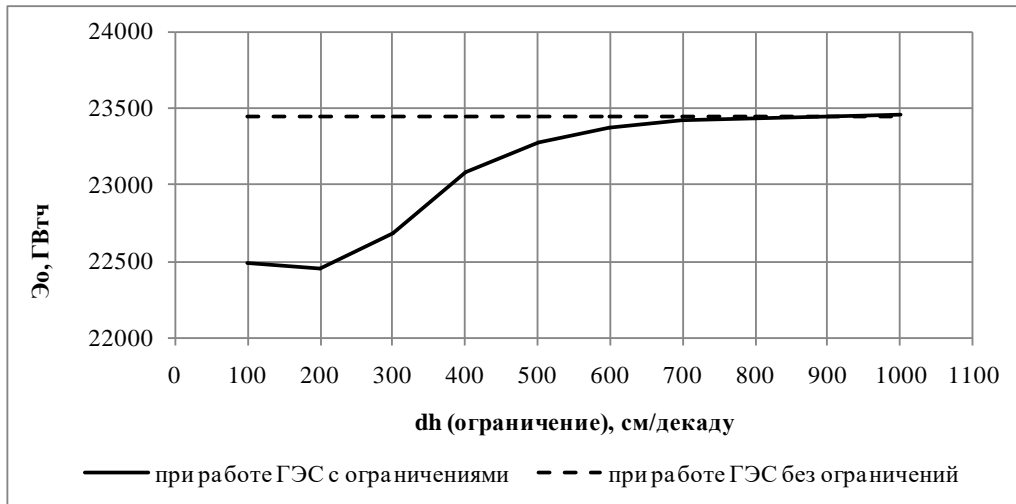
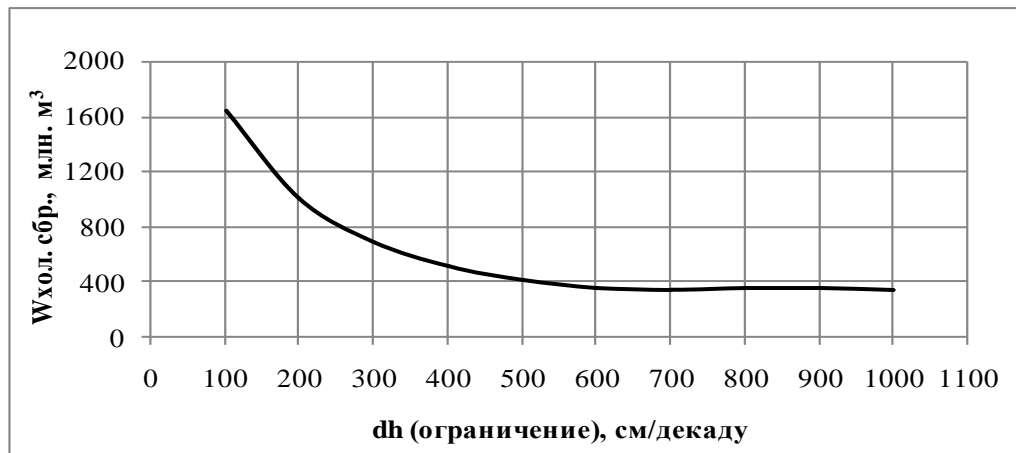


Рис. 1. Изменение среднегодовой выработки (а), холостых сбросов (б) и гарантированной зимней мощности (в) Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище (первый вариант).

а



б



в

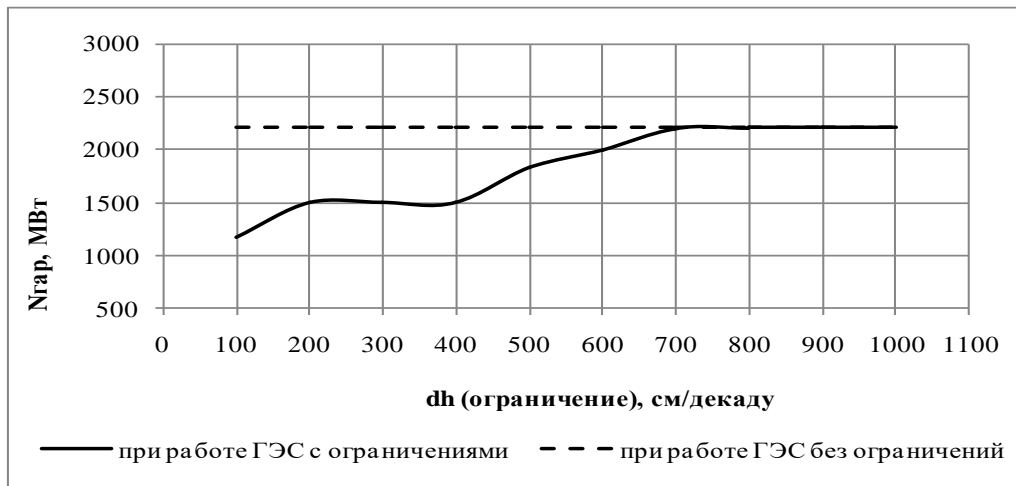


Рис. 2. Изменение среднегодовой выработки (а), холостых сбросов (б) и гарантированной зимней мощности (в) Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище (второй вариант).

Проведенные расчеты показали, что установление ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище может достаточно сильно повлиять на энергетические показатели работы Саяно-Шушенской ГЭС, в особенности на гарантированную зимнюю мощность ГЭС. В случае установления таких ограничений потребуется корректировка «Правил использования водных ресурсов водохранилищ» и проектных показателей их водо и энерго отдачи.

Выводы

1. Учет требований к обеспечению безопасности гидротехнических сооружений приводит к необходимости корректировок «Правил использования водных ресурсов водохранилищ».

2. Введение ограничений по скорости изменения уровня воды в водохранилище может значительно повлиять на энергетические режимы и показатели работы гидроэлектростанции (снижение среднесуточной выработки электроэнергии на Саяно-Шушенской ГЭС может составлять до 10 % от среднесуточной выработки при работе ГЭС без ограничений, снижение гарантированной зимней мощности – до 30 %).

3. При каскадной схеме использования водотока следует рассматривать требования по безопасности гидротехнических сооружений для всех гидроузлов каскада совместно.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Постановление правительства РФ № 349 от 22.04.2009 «Об утверждении Положения о разработке, согласовании и утверждении правил использования водохранилищ, в том числе типовых правил использования водохранилищ».
2. *Мурашов С.В., Дубинина В.Г., Александровский А.Ю.* Требования рыбного хозяйства и их учет при разработке правил использования водных ресурсов водохранилищ ГЭС // Гидротехническое строительство. 2009. № 12. С. 28–32.

3. *Савич А.И., Бронштейн В.И., Ильин М.М.* Геомониторнг на участках крупных гидротехнических сооружений в районах повышенного геодинамического риска // Гидротехническое строительство. 2000. № 4. С. 50–55.
4. *Савич А.И., Газиев Э.Г.* Влияние водохранилищ на поведение скальных массивов оснований высоких плотин // Гидротехническое строительство. 2005. № 5. С. 33–37.
5. *Шуйфер М.И.* Изменения во времени состояния основания Саяно-Шушенской ГЭС по геофизическим показателям // Гидротехническое строительство. 1991. № 6. С. 53–57.
6. *Савич А.И., Ильин М.М., Речицкий В.И., Замахеев А.М.* Особенности влияния водохранилищ на скальные основания больших плотин // Гидротехническое строительство. 2003. № 3. С. 48–53.
7. *Александровский А.Ю., Силаев Б.И., Пугачев Р.В., Якушов А.Н.* Программный комплекс для проведения водохозяйственных и водноэнергетических расчетов каскадов ГЭС «Каскад». Свидетельство о государственной регистрации в Федеральной службе по интеллектуальной собственности, патентам и товарным знакам программы для ЭВМ № 2011613087 от 19 апреля 2011 г.

Сведения об авторах:

Александровский Алексей Юрьевич, д. т. н., профессор, профессор кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ), 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14; e-mail: ayaleksand@mail.ru

Хасянов Сергей Владимирович, аспирант кафедры «Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии», Национальный исследовательский университет «Московский энергетический институт» (НИУ МЭИ), 111250, Москва, ул. Красноказарменная, 14; e-mail: has-sergei2@mail.ru.