

# ЭНЕРГОУСТАНОВКИ НА ОСНОВЕ ВОЗОБНОВЛЯЕМЫХ ВИДОВ ЭНЕРГИИ (05.14.08)

УДК 621.22.01

DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-37-45

## К оценке состояния гидротехнических сооружений гидроузлов в современных условиях

А.Ю. Александровский, Д.С. Сычев

Изучено влияние ограничения интенсивности изменения уровня верхнего бьефа (УВБ) водохранилища на энергетические показатели гидроэлектростанции на примере каскада Енисейских гидроэлектростанций (ГЭС). Для количественного определения влияния ограничений скорости изменения УВБ Саяно-Шушенской ГЭС, в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода, на энергетические показатели работы ГЭС проведены водно-энергетические расчеты по следующим сценариям работы Енисейского каскада:

- работа Саяно-Шушенской ГЭС с переменными ограничениями по скорости изменения УВБ, в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода;
- работа Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС с переменными ограничениями по скорости изменения УВБ, в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода.

В качестве основных показателей работы ГЭС, по которым оценивалось влияние ограничений, приняты среднесезонная выработка электроэнергии ( $E_0$ ) и гарантированная зимняя мощность ГЭС ( $N_{\text{гар}}$ ).

В результате проведенных вычислений в Саяно-Шушенском гидроузле гарантированная зимняя мощность уменьшилась на 17,37, а среднесезонная выработка на 3,29%.

Исходя из выполненных водно-энергетических расчетов, создан новый (скорректированный) режим работы гидроэлектростанции, при котором режим уровней не выходит за пределы температурных ограничений. Изменение режима работы Саяно-Шушенской ГЭС привело к изменению расходов в нижнем бьефе. В результате этого поменялся режим работы Красноярской ГЭС за счет изменившегося гидрографа притока к створу гидроузла. Проведенные исследования наглядно показывают, что применение ограничений температурного воздействия окружающей среды на гидротехнические сооружения Саяно-Шушенской ГЭС напрямую влияет на энергетические показатели Красноярской ГЭС. Наибольшее воздействие на параметры Красноярской ГЭС происходит при средней температуре в районе Карлова створа в зимний от  $-17$  до  $-11,8$  °C и летний от  $+8,5$  до  $+11$  °C периоды. Это связано с формой кривой ограничения интенсивности изменения УВБ Саяно-Шушенской ГЭС, что в свою очередь уменьшает расход в нижнем бьефе станции, и, как следствие, снижает суммарный приток к створу Красноярской ГЭС. При этом температурный диапазон в створе Красноярской ГЭС для зимнего периода составляет от  $-20$  до  $-11$  °C, а для летнего периода — от  $+5$  до  $+8$  °C. Разница среднесезонного значения выработки электроэнергии и гарантированной мощности Красноярской ГЭС при работе в указанных условиях составляет 12,9% по среднесезонной выработке и 13,7% по гарантированной зимней мощности.

*Ключевые слова:* ограничение скорости изменения уровня воды в водохранилище, изменение энергетических параметров, каскад Енисейских ГЭС.

*Для цитирования:* Александровский А.Ю., Сычев Д.С. К оценке состояния гидротехнических сооружений гидроузлов в современных условиях // Вестник МЭИ. 2019. № 3. С. 37—45. DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-37-45.

## On Evaluating the State of a Hydropower System's Hydraulic Engineering Structures under Modern Conditions

A.Yu. Aleksandrovsky, D.S. Sychev

The effect the limitations imposed on the water storage reservoir's headrace level (HRL) variation rate have on the hydroelectric power plant (HPP) power performance indicators is studied taking the cascade of Yenisei HPPs as an example. For quantitatively determining the effect the

limitations imposed on the Sayano-Shushenskaya HPP's HRL variation rate (depending on the air temperature in the preceding period) have on the HPP power performance indicators, water energy calculations were carried out for the following Yenisei cascade operation scenarios:

- operation of the Sayano-Shushenskaya HPP with variable limitations imposed on the HRL variation rate depending on the air temperature in the previous period;
- operation of the Sayano-Shushenskaya and Krasnoyarsk HPPs with variable limitations imposed on the HRL variation rate depending on the air temperature in the previous period.

The mean energy capability ( $E_0$ ) and the guaranteed power output in winter ( $N_{\text{guar}}$ ) were taken as the HPP performance indicators from which the effect of limitations was estimated.

As a result of the accomplished computations, the guaranteed winter power output in the Sayano-Shushenskaya hydropower system decreased by 17.37%, and its mean energy capability decreased by 3.29%.

Based on the accomplished water-energy calculations, a new (corrected) operating mode of the Sayano-Shushenskaya HPP was obtained, in which the regime of levels did not escape beyond the temperature-related limitations. The changes in the Sayano-Shushenskaya HPP operation mode led to a change in the HPP tail race flows. As a result, the Krashoyarsk HPP operation mode was also changed due to the new inflow regime to its site. The study results show very clearly that application of environment temperature-related limitations on the Sayano-Shushenskaya HPP hydraulic structures directly affects the power performance indicators of the Krasnoyarsk HPP. The strongest effect on the Krasnoyarsk HPP parameters takes place at the average temperature in the Karlov site from  $-17\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-11.8\text{ }^{\circ}\text{C}$  in winter and from  $+8.5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+11\text{ }^{\circ}\text{C}$  in summer. This is connected with the Sayano-Shushenskaya HPP HRL variation rate limitation curve pattern, which in its turn entails a decrease in the HPP tail race flow and, as a consequence, a decrease in the total inflow to the Krasnoyarsk HPP site. As regards the temperature range at the Krasnoyarskaya HPP site, it is from  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $-11\text{ }^{\circ}\text{C}$  for the winter period and from  $+5\text{ }^{\circ}\text{C}$  to  $+8\text{ }^{\circ}\text{C}$  for the summer period. The difference in the mean energy capability and guaranteed power output of the Krasnoyarsk HPP during operation under the above-mentioned conditions is 12.9% for mean energy capability and 13.7% for guaranteed winter power output.

*Key words:* limitation of water level variation rate in a water storage reservoir, change of power performance parameters, cascade of Yenisei HPPs.

*For citation:* Aleksandrovsky A. Yu., Sychev D.S. On Evaluating the State of a Hydropower System's Hydraulic Engineering Structures under Modern Conditions. Bulletin of MPEI. 2019;3:37—45. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2019-3-37-45.

Такая характеристика динамики изменения уровня воды в водохранилище, как скорость повышения или снижения горизонта в расчетном интервале времени, в диспетчерских графиках управления режимом работы водохранилища гидроэлектростанции (ГЭС) не оговаривается. Однако она имеет важное и, часто, определяющее значение для безопасности гидротехнических сооружений.

Колебания уровня воды в водохранилище сопровождаются перестройкой напряженно-деформационного и фильтрационного состояний массива в бортах водохранилища и в местах их примыкания к плотине, при этом зачастую происходит интенсификация суффозионных процессов выноса мелких минеральных частиц породы фильтрующей через нее водой, а также образование в массиве зон снижающейся прочности из-за циклических изменений знака напряжений. Вследствие растягивающих напряжений может нарушаться сплошность системы плотина–основание, что приводит к росту фильтрационных расходов через бетон плотины.

Основная причина образования трещин в бетонных конструкциях — неравномерное изменение температуры в них, возникающее на начальной стадии вследствие экзотермии цемента, а в дальнейшем колебания температуры внешней среды. Температурные напряжения в плотинах в эксплуатационный период возникают в результате разности температур у граней плотины и внутри нее, а также из-за невозможности массива плотины свободно расширяться (благодаря связи с основанием) при сезонных и годовых колебаниях наружной температуры, проникающих глубоко внутрь массива (иногда охватывающих его полностью). Величины

растягивающих напряжений зимой превосходят предел прочности бетона на растяжение, вследствие чего в плотине образуются вертикальные, очень опасные трещины.

Крупные арочно-гравитационные и гравитационные плотины весьма чувствительны к температурному режиму внешней среды наружного воздуха и воды в водохранилище. Изменение уровня воды зачастую происходит при переменном температурном фоне, что и влечет за собой негативные последствия для тела плотины.

Рассмотрим вопрос влияния на напряженно-деформированное состояние (НДС) бетонных плотин интенсивности наполнения и опорожнения водохранилища. Данная тема подробно представлена в [1], где описывается процесс формирования фильтрационных потоков в основании плотины и их влияние на осадки и горизонтальные перемещения сооружения при быстром наполнении водохранилища.

Согласно [1], при быстром наполнении водохранилища со скоростью  $V_1$  основная часть упругой деформации массива локализуется вблизи его поверхности, и тем самым обеспечивается большая осадка основания плотины. Для смягчения этого явления необходимо, по возможности, медленно наполнять водохранилище (рис. 1). При более медленном нагружении ложа водохранилища со скоростью наполнения  $V_2$  или  $V_3$  увлекающие фильтрационные силы (УФ-силы) успевают сформироваться и «унести» в глубокие горизонты массива значительную часть поверхностных деформаций. Эта особенность подтверждается наблюдавшимся запаздыванием горизонтальных перемещений плотины Красноярской ГЭС при изменении уровня верхнего бьефа (ВБ). При наполнении водохранилища с интенсивностью  $0,15\text{ м/сут}$  приращение перемещений русловых секций

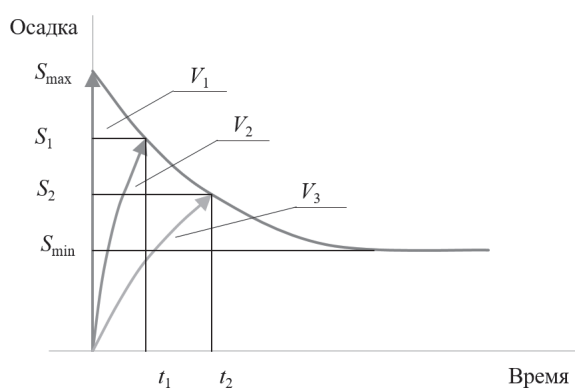


Рис. 1. Форма зависимости осадки основания от скорости наполнения водохранилища и времени

на каждый метр напора в ВБ составляет 0,13 мм/м. При интенсивности наполнения 0,07 м/сут горизонтальное перемещение секций — 0,25 мм/м. Если скорость наполнения водохранилища велика (0,3...0,5 м/сут), то после стабилизации уровня ВБ плотина еще в течение нескольких суток продолжает испытывать линейные и угловые перемещения в сторону нижнего бьефа (НБ) [2]. Стоит отметить, что при указанных обстоятельствах те же события фиксировались и на Саяно-Шушенской ГЭС [3, 4].

Изучены оценки влияния ограничения интенсивности изменения уровня верхнего бьефа (УВБ) Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от температурного воздействия окружающей среды на гидротехнические сооружения и энергетические показатели работы Енисейского каскада.

Для определения климатических особенностей района расположения Саяно-Шушенской ГЭС был проанализирован температурный ряд наблюдений с 1950 по 2015 гг. по данным ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД» [5]. Данные наблюдений взяты по городу Саяногорск, расположенному в 30 км ниже по течению реки Енисей.

Принимая во внимания тот факт, что вероятность попадания максимальной и минимальной температур на один календарный год стремится к нулю, проведено исследование перепадов температуры в рамках каждого календарного года отдельно. Для повышения качества разработанной модели построены кривые обеспеченности по двум основным параметрам, необходимым для принятия решения по скорости ограничения изменения УВБ, — средним температурам зимы и лета. При создании кривой и разработке алгоритма год условно был разбит на два сезона — зимний и летний. К зимнему сезону относятся месяцы с ноября по март, а к летнему — с апреля по октябрь. Кривые обеспеченности показаны на рис. 2, где по оси абсцисс отложено модульное значение средней температуры зимы и лета в градусах Цельсия.

Принимая во внимание работы [6 — 8], основывающиеся на фактических данных наблюдений, выполнены расчет и анализ коэффициентов корреляции, показывающие наличие зависимости между приращениями УВБ и перемещением от температурной и гидростатической составляющих напорной грани плотины Саяно-Шушенской ГЭС. В работе [7] дана диаграмма измеренных горизонтальных перемещений гребня центральной секции плотины с 4 мая 1989 г. по конец 2009 г., в [8] рассмотрены температурные составляющие радиальных перемещений с 2009 по 2012 гг. Обе публикации дополняют данные [6], поскольку в ней рассмотрен период наполнения водохранилища. Результаты расчета коэффициентов корреляции представлены в табл. 1 и основаны на данных наблюдений за 1985 — 2015 гг. для г. Дивногорск (5 км от плотины). Согласно автору [6], «...интенсивность наполнения водохранилища не может привести к ухудшению НДС плотины...». Однако, если проанализировать данные табл. 2 видно, что наполнение водохранилища на втором этапе интенсивнее в 2013 г. и величина  $U_{изм}$  в тот же год за указанный период выше. Данный факт означает влияние скорости

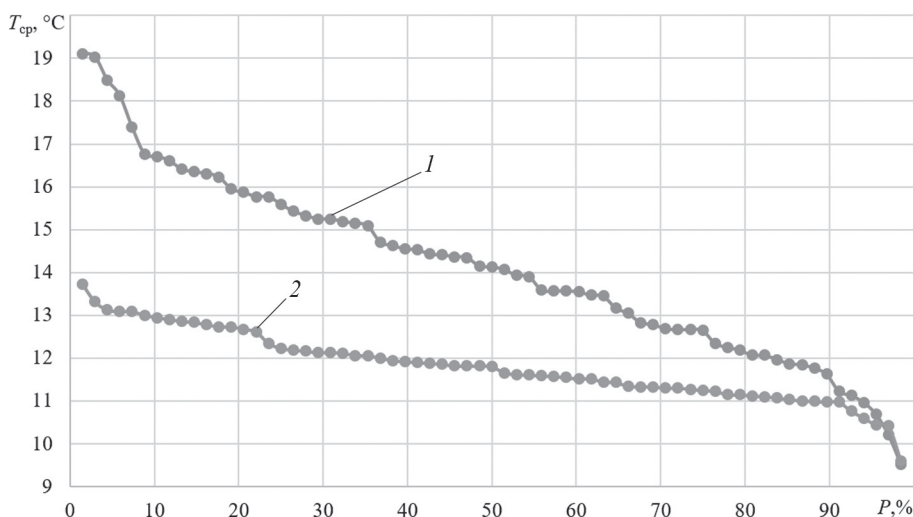


Рис. 2. Кривые обеспеченности модуля средних температур зимнего (1) и летнего (2) периодов в районе Саяно-Шушенской ГЭС

Таблица 1

## Результаты расчета коэффициентов корреляции для Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС

Красноярская ГЭС				Саяно-Шушенская ГЭС			
$Z_{вб}$	$T_{ср}$	$Q_{\text{фильтр}}$	$dU$ , мм	$Z_{вб}$	$T_{ср}$	$Q_{\text{фильтр}}$	$dU$ , мм
1,00	0,25	0,08	0,39	1,00	0,37	0,11	0,49
0,17	1,00	0,19	0,37	0,31	1,00	0,23	0,43
0,08	-0,45	1,00	0,61	0,11	-0,51	1,00	0,67
0,39	-0,51	0,61	1,00	0,49	-0,59	0,67	1,00

Таблица 2

## Скорость изменения измеренных радиальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС

УВБ, м	Дата	Количество дней на второй этап	$U_{\text{изм}}$ , мм	$\Delta U_{\text{изм}}$ за период, мм
519,44	09.06.2013	15	95,29	20,73
530,30	24.06.2013		116,02	
519,47	12.06.2016	18	88,76	22,73
530,73	30.06.2016		111,49	

наполнения УВБ на радиальные перемещения, а, соответственно, и на НДС плотины.

Рассмотрим зависимость между скоростью изменения уровня воды в водохранилище и температурой предшествующего периода и представим, что она имеет линейный вид, как это показано на рис. 3.

Линейный подход к построению графиков ограничений скорости изменения УВБ имеет достаточно существенный недостаток, он не может быть применен для граничных условий. Точки в начале кривых, опи-

сывающих ограничение при достаточно холодном лете и зиме, накладывают излишне серьезные ограничения на работу гидроузла. В настоящем случае единственным способом приблизить график ограничений к реальным физическим процессам, происходящим с плотиной, является её «скругление» в граничных точках в начале и конце кривой.

Если представить кривую в виде уравнения регрессии второго порядка и наложить данные натурных наблюдений из табл. 2 [6], то кривая примет вид, изображенный на рис. 4.

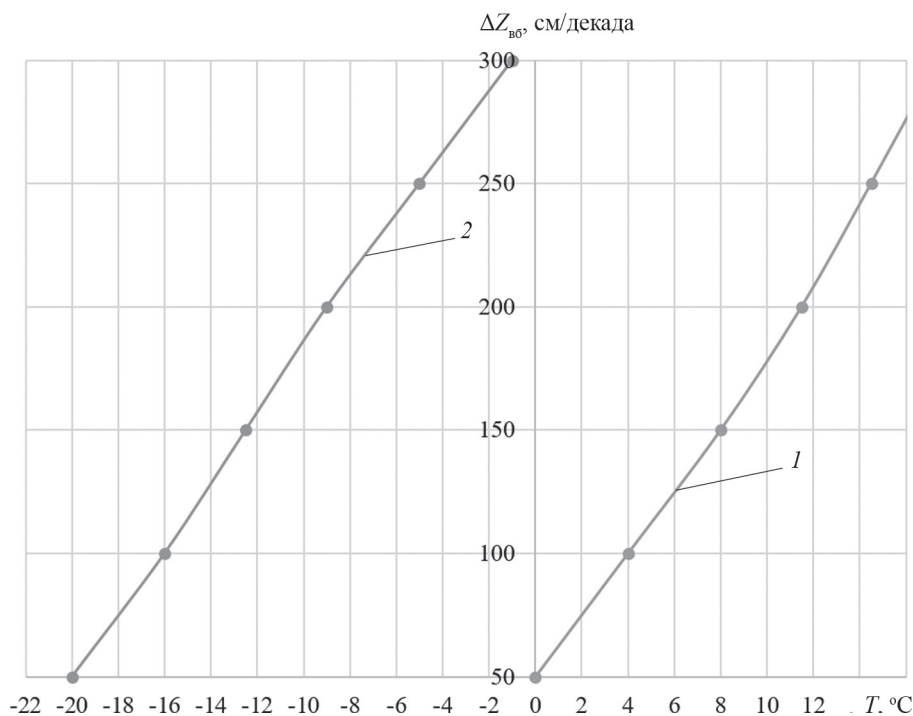


Рис. 3. Линейные кривые ограничения скорости изменения уровня воды в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС в летний (1) и зимний (2) периоды

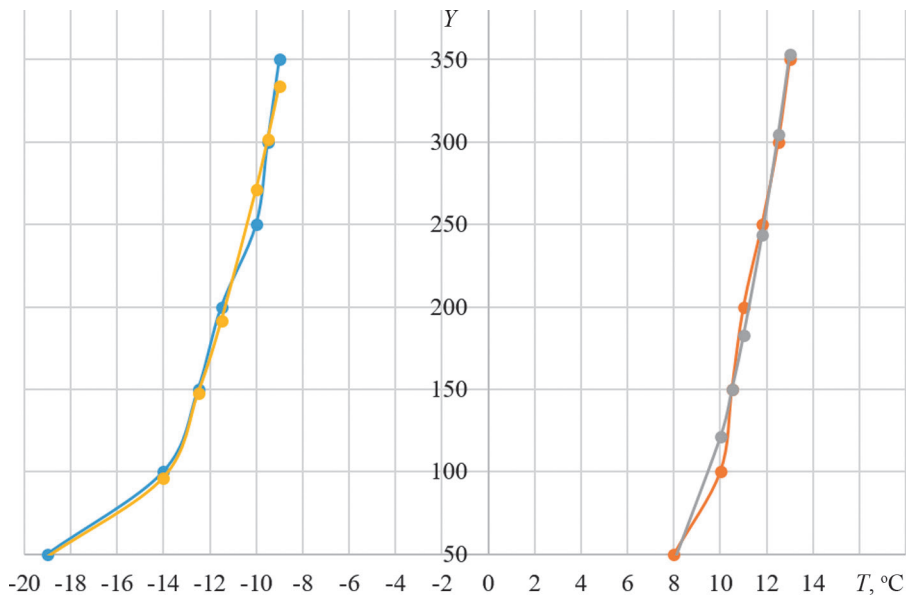


Рис. 4. Функции регрессии (● — зима; ● — лето) и графики ограничений УВБ (● — зима; ● — лето) для зимнего и летнего периодов в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода Саяно-Шушенской ГЭС

Для описания этой зависимости в виде математического уравнения применен метод регрессивного анализа. Построение функции регрессии описывает зависимость среднего значения результирующего признака  $Y_i(dZ_{вб})$  от заданных значений аргументов  $X_i(\bar{T})$ . Метод наименьших квадратов максимально приближает функцию к построенной модели. Согласно этому подходу минимизируется квадрат отклонения наблюдаемых значений результирующего показателя  $Y_i$  ( $i = 1, 2, \dots, P$ ) от модельных значений  $f(x_i)$ , где  $x_i$  — значение вектора аргументов в  $i$ -м наблюдении ( $y_i - f(x_i)^2 > \min$ ). Получаемая регрессия является среднеквадратической.

Зависимости функций регрессии для летнего и зимнего периодов равны:

$$Y = 7,93X_2 - 104,98X + 378;$$

$$Y = 3,79X_2 + 134,68X + 1239.$$

Для определения влияния ограничений по интенсивности наполнения водохранилища СШГЭС на энергетические параметры Енисейского каскада необходимо выполнить водно-энергетические расчеты (ВЭР). При моделировании процесса работы гидроэлектростанции режим ее работы выбран по диспетчерскому графику работы водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС.

При проведении расчетов предполагается наложение на диспетчерский график условий температурных ограничений, которые изменят скорость сработки и наполнения водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС в соответствии со средней температурой предшествующего периода и графиком на рис. 4. Подобные расчеты уже проводились в [9] на примере Красноярской ГЭС, поэтому подробно на этом останавливаться не будем.

В результате расчетов энергетические параметры Саяно-Шушенского гидроузла изменились как это показано в табл. 3. Графически кривые обеспеченности гарантированной зимней мощности изображены на рис. 5.

По итогам водно-энергетических расчетов получился новый (скорректированный) режим работы гидроэлектростанции, при котором режим уровней не выходит за пределы температурных ограничений. Изменение режима работы станции поменяло расходы в нижнем бьефе. В результате этого произошла смена режима работы Красноярской ГЭС за счет изменившегося гидрографа притока к створу гидроузла.

Обновленный приток к створу гидроузла определяется по формуле:

$$Q_{КГЭС} = Q_{бок} + Q_{нб.СШГЭС}$$

Таблица 3

**Изменение энергетических параметров Саяно-Шушенской ГЭС**

Параметры	Без ограничений	С ограничениями	Разница, %	
			абсолютная	относительная
Среднеголетняя выработка, ГВт·ч	22 262	21 529	733	3,290
Гарантированная мощность, МВт	2 165	1 789	376	17,37

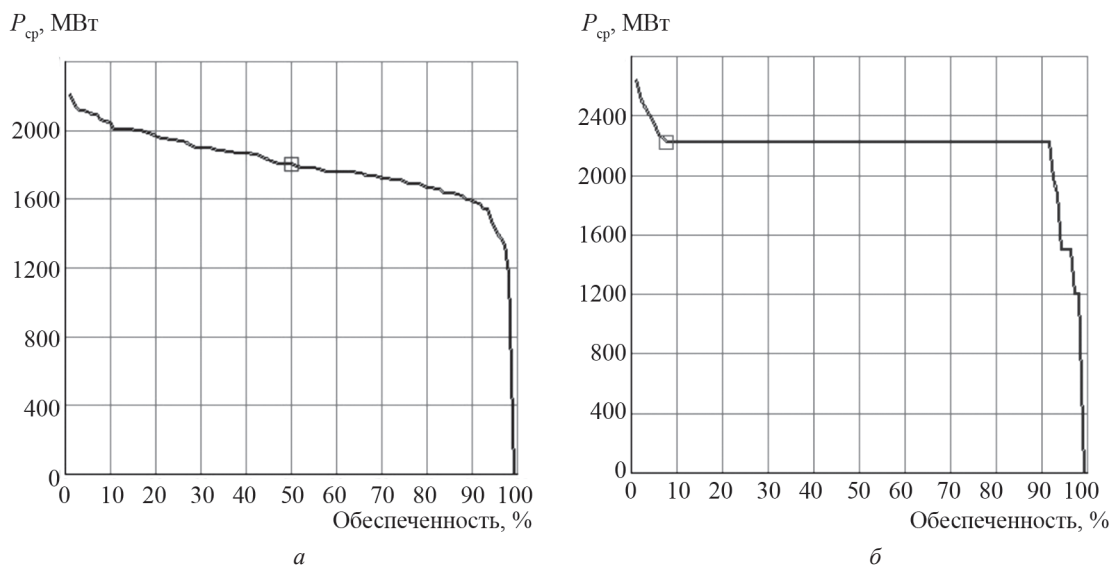


Рис. 5. Кривые обеспеченности гарантированной зимней мощности Саяно-Шушенской ГЭС:

*a* — с ограничением скорости изменения уровня ВБ по температуре предшествующего периода; *b* — без ограничений скорости изменения ВБ

где  $Q_{\text{КГЭС}}$ ,  $Q_{\text{бок}}$  — суммарный и боковой притоки к створу Красноярской ГЭС;  $Q_{\text{нб,сшГЭС}}$  — обновленный расход в НБ Саяно-Шушенской ГЭС.

Для уточнения влияния ограничений скорости изменения уровня ВБ Саяно-Шушенской ГЭС в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода на энергетические показатели работы Красноярской ГЭС необходимо произвести ВЭР по следующим сценариям работы Енисейского каскада:

- работа Саяно-Шушенской ГЭС с переменными ограничениями по скорости изменения УВБ, в зави-

симости от температуры воздуха предшествующего периода (аналогичные ограничения на Красноярскую ГЭС не накладываются);

- работа Саяно-Шушенской и Красноярской ГЭС с переменными ограничениями по скорости изменения УВБ в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода.

Методика построения функции ограничения скорости изменения УВБ Красноярской ГЭС описана в [9] и представлена на рис. 6. Схема водно-энергетического расчета дана на рис. 7.

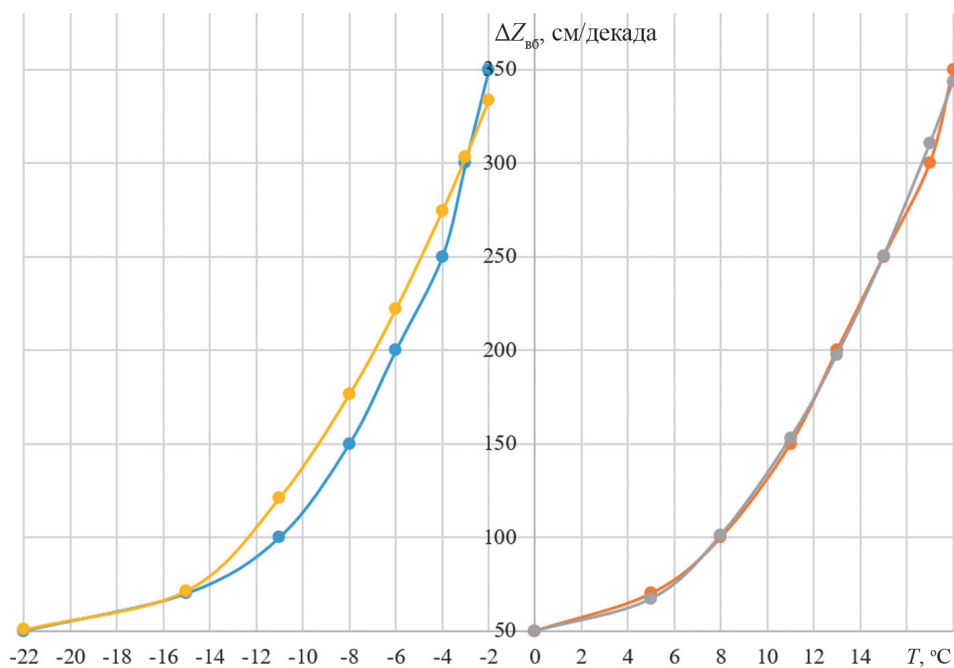


Рис. 6. Функции регрессии (● — зима; ● — лето) и графики ограничений УВБ (● — зима; ● — лето) для зимнего и летнего периодов в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода Красноярской ГЭС

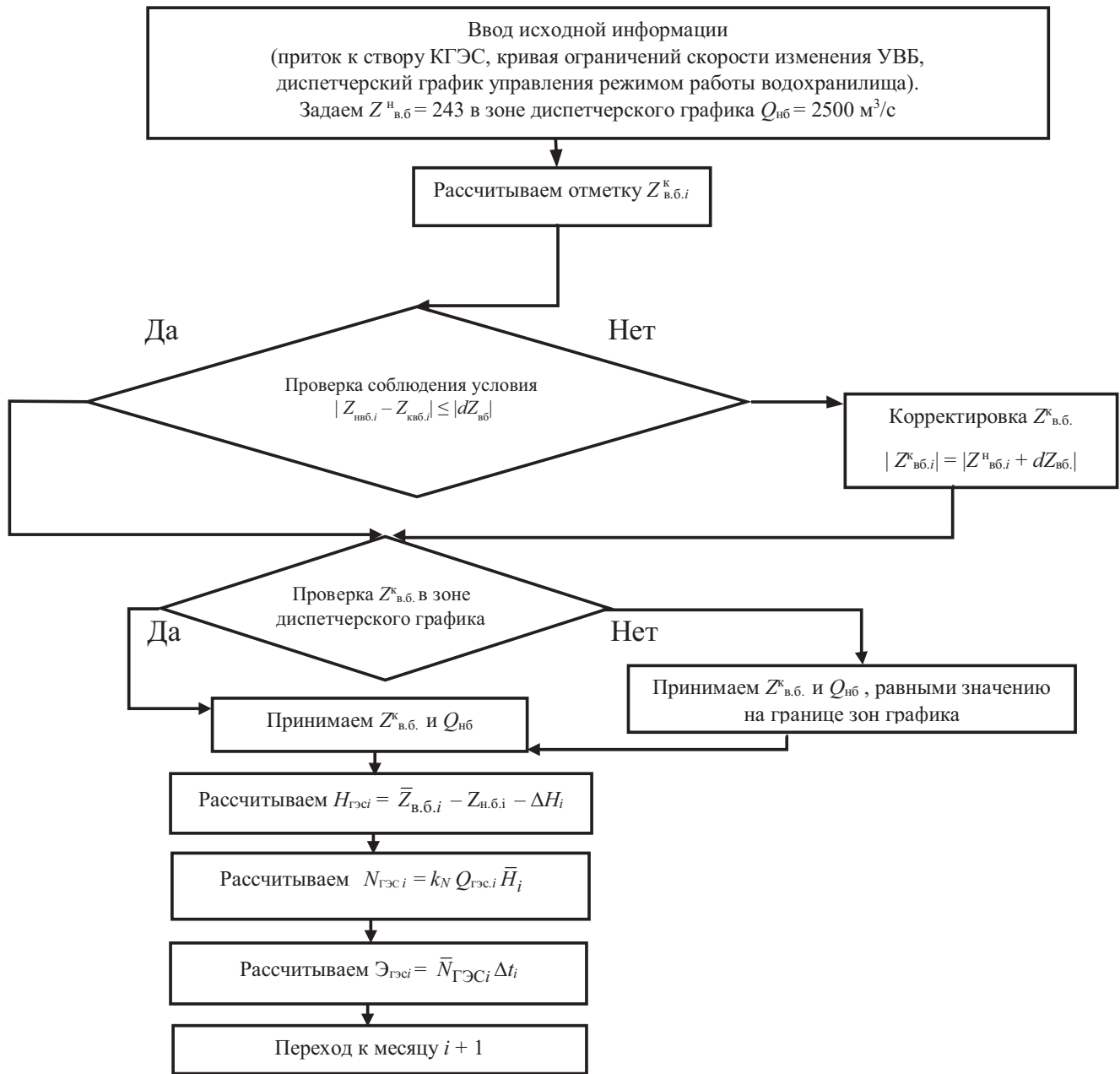


Рис. 7. Принципиальная схема работы программы по определению влияния температурного фактора на энергетические показатели ГЭС:

$Z_{вб}^к, Z_{вб}^н$  — начальный и конечный уровни верхнего бьефа гидроэлектростанции;  $Q_{нб}$  — расход воды в нижний бьеф гидроэлектростанции;  $dZ_{вб}$  — допустимый перепад уровня верхнего бьефа при определенном температурном режиме;  $H_{ГЭСi}$  — напор гидроэлектростанции с учетом потерь;  $N_{ГЭСi}, Э_{ГЭСi}$  — мощность и выработка гидроэлектростанции

При проведении расчетов на диспетчерский график накладывались условия температурных ограничений, меняющих скорость сработки и наполнения водохранилища Красноярской ГЭС.

Основные показатели работы Красноярской ГЭС, по которым оценивали влияние ограничений, следующие:

- $Э_0$  — среднесуточная выработка электроэнергии;
- $N_{гар}$  — гарантированная зимняя мощность ГЭС обеспеченностью 90%;

В результате проведенных водно-энергетических расчетов за период с 1994 по 2006 гг. построены эмпирические кривые обеспеченности для  $N_{гар}$  и  $Э_0$  гидроэлектростанции при различных вариантах ограничений.

Режим работы Красноярской ГЭС выбран по диспетчерскому графику водохранилища, представленному в «Разработке второй редакции Проекта правил использования водных ресурсов Красноярского водохранилища на р. Енисей». Проведенные расчеты продемонстрировали, что применение ограничений

## Снижение энергетических показателей Красноярской ГЭС

Параметры	Без ограничений	С ограничениями на СШГЭС	С ограничениями на СШГЭС и КГЭС
Среднеголетняя выработка, ГВтч	19 167,48	18 506,03	16 679,23
Гарантированная мощность, МВт	2 072,83	1 925,87	1 788,40

температурного воздействия окружающей среды на гидротехнических сооружениях Саяно-Шушенской ГЭС напрямую влияют на энергетические показатели Красноярской ГЭС. Наибольшее воздействие на параметры Красноярской ГЭС в районе Карлова створа наблюдается при средних температурах от  $-17$  до  $-11,8$  °С зимнего и от  $+8,5$  до  $+11$  °С летнего периодов. Это связано с формой кривой ограничения на рис. 4, что в свою очередь приводят к уменьшению расхода в нижнем бьефе станции, и, как следствие, снижению суммарного притока к створу Красноярской ГЭС. При этом температурный диапазон в створе Красноярской ГЭС составляет  $-20 \dots -11$  °С и  $+5 \dots +8$  °С для зимнего и летнего периодов. Данный температурный диапазон также обусловлен формой кривой на рис. 6. Разница среднеголетнего значения выработки электроэнергии и гарантированной мощности Красноярской ГЭС

при работе в указанных условиях с учетом применения переменного значения ограничений представлены в табл. 4.

Таким образом, интенсивность наполнения водохранилища высоконапорных бетонных плотин влияет на напряженно-деформированное состояние тела плотины и требует учета данного фактора при выборе режима работы гидроузла.

Наложение ограничений по скорости изменения УВБ в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода на Саяно-Шушенскую ГЭС приводит к уменьшению её энергетических показателей и изменению режима в НБ.

Наложение ограничений по скорости изменения УВБ СШГЭС в зависимости от температуры воздуха предшествующего периода приводит к уменьшению энергетических показателей Красноярской ГЭС.

## Литература

1. Тетельмин В.В. Роль глубинной фильтрации в обеспечении подвижности основания высоких плотин // Гидротехника. 2015. № 1 (38). С. 72—79.
2. Тетельмин В.В. Плотина Саяно-Шушенской ГЭС: состояние, процессы, прогноз. М.: Librokom, 2011.
3. Носова О.Н., Марголина О.Г. Фильтрационный режим в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС в процессе поэтапного наполнения водохранилища // Гидротехническое строительство. 1990. № 8. С. 32—36.
4. Брызгалов В.И. Из опыта создания и освоения Красноярской и Саяно-Шушенской гидроэлектростанций. Красноярск: Сибирский издат. дом «Суриков», 1999.
5. Погода и климат [Официальный сайт] [http://cliware.meteo.ru/goskom\\_cat/list/index.jsp](http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/index.jsp) (дата обращения 10.10.2018).
6. Вульфович Н.А., Потехин Н.П. Об интенсивности наполнения и опорожнения водохранилища бетонных плотин (на примере арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС) // Гидротехническое строительство. 2017. № 12 (12). С. 11—19.
7. Савич А.И., Бронштейн В.И., Грошев М.Е. Статическое и динамическое поведение Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины // Гидротехническое строительство. 2013. № 3. С. 3—13.
8. Вульфович Н.А. Оценка несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных

## References

1. Tetel'min V.V. Rol' Glubinnoy Fil'tratsii v Obespechenii Podvizhnosti Osnovaniya Vysokikh Plotin. Gidrotekhnika. 2015;1 (38):72—79. (in Russian).
2. Tetel'min V.V. Plotina Sayano-Shushenskoy GES: Sostoyanie, Protsessy, Prognoz. M.: Librokom, 2011. (in Russian).
3. Nosova O.N., Margolina O.G. Fil'tratsionnyy Rezhim v Osnovanii Plotiny Sayano-Shushenskoy GES v Protsesse Poetapnogo Napolneniya Vodokhranilishcha. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 1990;8:32—36. (in Russian).
4. Bryzgalov V.I. Iz Opyta Sozdaniya i Osvoeniya Krasnoyarskoy i Sayano-Shushenskoy Gidroelektrostantsiy. Krasnoyarsk: Sibirskiy Izdat. Dom «Surikov», 1999. (in Russian).
5. Pogoda i klimat [Ofits. sayt] [http://cliware.meteo.ru/goskom\\_cat/list/index.jsp](http://cliware.meteo.ru/goskom_cat/list/index.jsp) (data obrashcheniya 10.10.2018). (in Russian).
6. Vul'fovich N.A., Potekhin N.P. Ob Intensivnostyakh Napolneniya i Oporozhneniya Vodokhranilishcha Betonnykh Plotin (na Primere Arochno-gravitatsionnoy Plotiny Sayano-Shushenskoy GES). Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2017;12 (12):11—19. (in Russian).
7. Savich A.I., Bronshteyn V.I., Groshev M.E. Staticheskoe i Dinamicheskoe Povedenie Sayano-Shushenskoy Arochno-gravitatsionnoy Plotiny. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2013;3:3—13. (in Russian).
8. Vul'fovich N.A. Otsenka Nesushchey Sposobnosti Plotiny Sayano-Shushenskoy GES po Dannym Natur-



наблюдений в послеаварийный период эксплуатации (2009 — 2012 гг.) // Гидротехническое строительство. 2013. № 4. С. 10—18.

9. **Александровский А.Ю., Сычев Д.С.** Влияние ограничения скорости изменения уровня воды в водохранилище на энергетические показатели ГЭС // Гидротехническое строительство. 2017. № 6 (40). С. 40—45.

nykh Nablyudeniyy v Posleavariynyy Period Ekspluatatsii (2009 — 2012 gg.). Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2013;4:10—18. (in Russian).

9. **Aleksandrovskiy A.Yu., Sychev D.S.** Vliyaniye Ogranicheniya Skorosti Izmeneniya Urovnya Vody v Vodokhranilishche na Energeticheskie Pokazateli GES. Gidrotekhnicheskoe Stroitel'stvo. 2017;6 (40):40—45. (in Russian).

#### **Сведения об авторах:**

**Александровский Алексей Юрьевич** — доктор технических наук, профессор кафедры гидроэнергетики и возобновляемых источников энергии НИУ «МЭИ», e-mail: ayaleksand@mail.ru

**Сычев Дмитрий Сергеевич** — начальник отдела реализации проектов ООО «ЭНТЕК», e-mail: sychev11-d-s@mail.ru

#### **Information about authors:**

**Aleksandrovsky Aleksey Yu.** — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Hydropower and Renewable Energy Sources Dept., NRU MPEI, e-mail: ayaleksand@mail.ru

**Sychev Dmitriy S.** — Head of the Project Implementation Department of LLC "ENTEK", e-mail: sychev11-d-s@mail.ru

**Работа выполнена при поддержке:** Российского научного фонда (грант № 18-19-00662)

**The work is executed at support:** Russian Science Foundation (grant No. 18-19-00662)

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

**Conflict of interests:** the authors declare no conflict of interest

**Статья поступила в редакцию:** 30.10.2018

**The article received to the editor:** 30.10.2018