

**В.И. МАСЛИКОВ**  
**Г.И. СИДОРЕНКО**

## **АНАЛИЗ ВОДНО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ЖИГУЛЕВСКОЙ ГЭС И СВЯЗЬ ВЫРАБОТКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ СО СТОКОМ**

*EVALUATION OF WATER ENERGETIC MODES OF ZHIGULEVSKAYA HYDROELECTRIC POWER STATION AND CORRELATION BETWEEN ELECTRIC ENERGY GENERATION AND WATER DISCHARGE*

*Выполнен анализ водно-энергетических режимов работы Жигулевской ГЭС. Выявлен ряд несоответствий между эксплуатационными режимами и регламентируемыми требованиями по поддержанию уровней воды в верхнем бьефе водохранилища, а также расходов воды в нижнем бьефе в период весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени, определяемыми Правилами использования водных ресурсов, что указывает на необходимость корректировки Правил. Анализ фактических режимов работы Жигулевской ГЭС показал, что среднесуточная годовая выработка электроэнергии и среднемесячная гарантированная зимняя мощность превышают проектную. Получены устойчивые статистические закономерности между показателями энергоотдачи Жигулевской ГЭС и характеристиками речного стока. Полученные зависимости могут быть использованы при прогнозировании выработки электроэнергии Жигулевской ГЭС на перспективу с учетом изменения водности, вызванной климатическими изменениями.*

**Ключевые слова:** гидроэлектростанция, Жигулевская ГЭС, водно-энергетический режим, правила эксплуатации водохранилища, выработка электроэнергии, сток.

Жигулевская ГЭС входит в состав Волжско-Камского каскада гидроэлектростанций, которые дают около 20 % электроэнергии, производимой на ГЭС России. Его установленная мощность составляет 12,8 ГВт, а годовая выработка электроэнергии колеблется от 35 до 40 ТВт·ч в зависимости от водности [1, 8, 11]. В каскаде эксплуатируется 11 гидроузлов. Участниками комплекса являются энергетика, водный транспорт, орошение, рыбное хозяйство, водоснабжение. ГЭС гидроузлов работают в одной и той же энергосистеме. Важную роль играют водохранилища каскада для поддержания судоходных глубин (регулярное судоходство от города Ржева более 3200 км), а также в борьбе с наводнениями и т.д.

*Evaluation of water energetic modes of Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station is performed. It is found that operating modes are not always strictly in accordance with requirements for maintaining of water level in head water as well as with water discharge in tail water during the period of spring flood, summer-, autumn- and winter runoff low. Evaluation results point to the need for review of the Rules of water management. Analysis of real operating modes of Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station shows that long-time annual electric energy generation and guaranteed monthly mean capacity in winter period exceed design specification. Stable statistic patterns of energy indexes and water discharge characteristics are defined. These patterns can be applied for predicting of electric energy generation by Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station taking into account climatic water changes.*

**Key words:** hydroelectric power station, Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station, water energetic mode, operating rules of water-storage reservoir, electric energy generation, water discharge.

Основные технические характеристики Жигулевской ГЭС приведены в табл. 1.

В настоящее время актуальным является анализ режимов работы Жигулевской ГЭС с учетом действующих Правил использования водных ресурсов. Основным документом, регламентирующим режимы работы Жигулевского водохранилища и использования их водных ресурсов в условиях нормальной эксплуатации, являются «Методические указания по разработке правил использования водохранилищ» (Приказ Минприроды России от 26 января 2011 г. № 17), которые базируются на методологии комплексного подхода к регулированию речного стока, в основном отражающей отечественный опыт

Основные технические характеристики Жигулевской ГЭС Волжско-Камского каскада

Показатель	Ед. изм.	Значение
Год ввода в эксплуатацию	г	1972
Нормальный подпорный уровень (НПУ)	м	53
Форсированный подпорный уровень (ФПУ)	м	53,3
Уровень мертвого объема (УМО)	м	45,5
Объем водохранилища при НПУ	км <sup>3</sup>	57,3
Полезный объем водохранилища	км <sup>3</sup>	21
Средний многолетний расход воды в створе ГЭС*	м <sup>3</sup> /с	767,4
Расчетный напор расчетный по мощности	м	22,5
Установленная мощность ГЭС	МВт	2400
Проектная выработка электроэнергии	ГВт.ч	9600
Среднемноголетняя годовая выработка электроэнергии	ГВт ч	10400
Число гидроагрегатов	-	20
Мощность гидроагрегата	МВт	120
Тип гидротурбин		ПЛ 587-ВВ-930
Тип генератора		СВ 1500/200-88
Диаметр рабочего колеса турбины	м	9,3

\*Соответствует среднемноголетнему стоку в створе ГЭС в 242 км<sup>3</sup>/год

водохозяйственного управления в условиях планового развития экономики.

В работе [2] выполнен анализ практики разработки и применения Правил в нашей стране за сорокалетний период на начало 2000 г. Рассмотрены основные разделы, порядок использования водных ресурсов водохранилищ в маловодные периоды, порядок пропуска высоких вод через сооружения гидроузла и др., а также ведомственные нормативные документы и постановление правительства Российской Федерации «О порядке эксплуатации водохранилищ» № 762 от 20 июня 1997 г. Ценностью данного исследования является методика разработки диспетчерских правил регулирования стока водохранилищами. Эта работа была крайне актуальна, так как на момент ее выхода Правила управления многих водохранилищ России устарели [4]. За это время изменились режим и объем водопотребления, критерии удовлетворения требований к воде, возрос приоритет экологических проблем, появились возможности

для исследования функционирования водохозяйственных систем с использованием компьютерных технологий. Предпринятые доработки и уточнения Правил не решают в полной мере накопившиеся проблемы, и требуется разработка новых [4].

Обсуждается необходимость разработки новой методологии регулирования речного стока [5], которая должна учитывать в полной мере существенно изменившиеся условия функционирования водохозяйственных и электроэнергетических систем за последние десятилетия. Рассмотрена законодательная и нормативная база управления режимами гидроэлектростанций в электроэнергетических и водохозяйственных системах и выявлены серьезные противоречия в принципах, организации и средствах управления режимами водохранилищ комплексных гидроузлов гидроэлектростанций [5]. Сделано заключение о необходимости адаптации методологии разработки диспетчерских правил использования водных ресурсов водохранилищ к рыночным услови-

ям, когда взаимоотношения между водопользователями при распределении водных ресурсов должны регулироваться рыночными механизмами на базе экономически обоснованной системы платежей за пользование водными ресурсами.

Предлагается узаконивание в Правилах наряду с модифицированными диспетчерскими графиками использования водохранилищ также расчетов водно-энергетических показателей работы ГЭС и их каскадов, отражающих реальные текущие условия, складывающиеся в электроэнергетических и водохозяйственных системах. Следует отметить, что задача разработки методологии управления речным стоком и водохранилищами ГЭС значительно усложняется в условиях происходящих динамичных климатических изменений, так как возрастает неопределенность при прогнозировании водности рек и показателей энергоотдачи гидроэлектростанций [9-16].

В работе [8] выполнен анализ соответствия эксплуатационных режимов Жигулевской ГЭС Волжско-Камского каскада за период 1981-2012 гг. основным положениям Правил, которые были разработаны в 60-80-е гг. прошлого века и используются в настоящее время [6, 7]. Выполнена оценка жизнеспособности диспетчерских правил для планиро-

вания обеспечения гарантированной энергоотдачи ГЭС, безопасности гидротехнических сооружений, нормального функционирования участников водохозяйственного комплекса на объектах. Это позволяет определить факторы, подлежащие корректировке, уточнить принципы управления режимами работы водохранилищ, отражающие прогнозные природно-климатические, водохозяйственные и экологические условия, разработать правила использования водных ресурсов водохранилищ, обеспечивающие максимальную энергоотдачу ГЭС, надежную и безопасную эксплуатацию гидротехнических сооружений.

Жигулевский гидроузел, имеющий водохранилище годичного регулирования стока и ГЭС с установленной мощностью, значительно превышающей мощность ГЭС вышележащих гидроузлов, является основным компенсатором в Волжско-Камском каскаде. Гидроузел обеспечивает получение максимальной выработки энергии на ГЭС Саратовского и Волжского гидроузлов, а также требуемое энергосистемой внутригодовое распределение энергоотдачи каскада.

Подпор от Жигулевского гидроузла в меженный период при нормальном подпорном уров-

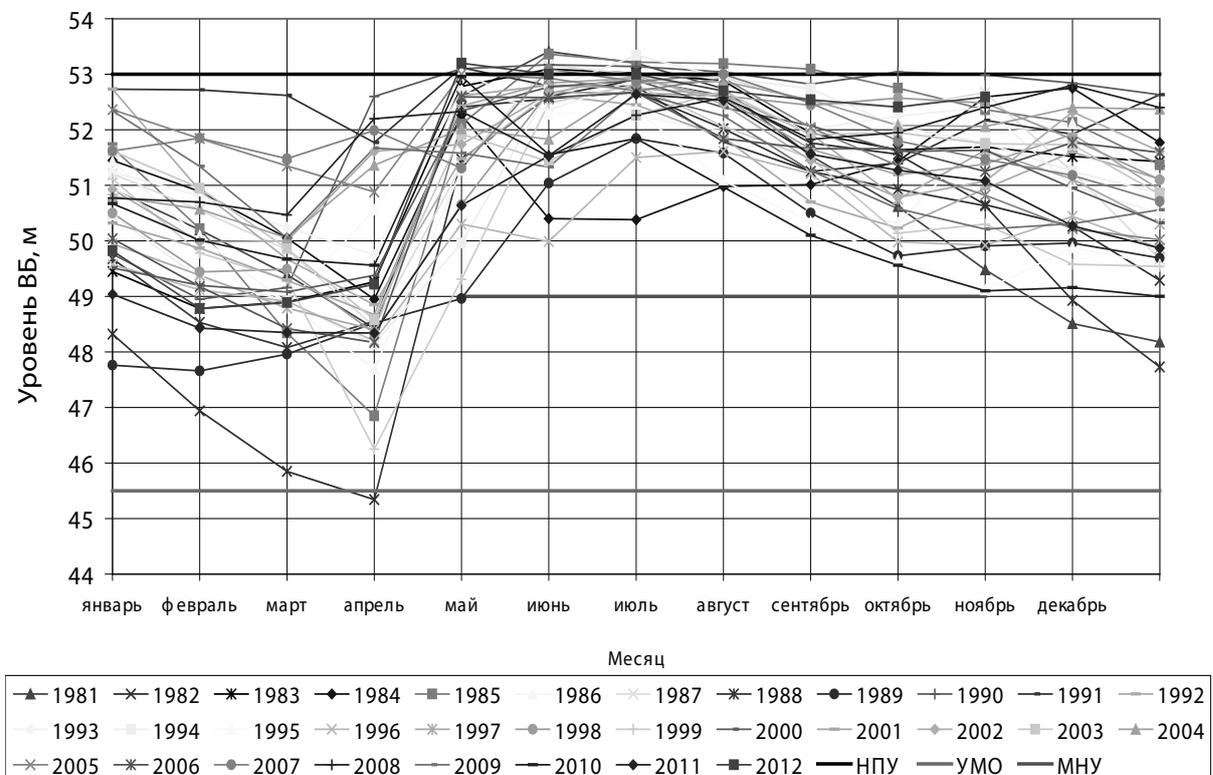


Рис. 1. Внутригодовое изменение уровней воды в верхнем бьефе Жигулевского водохранилища

не у плотины распространяется вверх по течению р. Волги до Чебоксарского гидроузла и по р. Каме до Нижнекамского гидроузла. Внутригодовое распределение стока в створе Жигулевского гидроузла определяется режимом работы Волжско-Камского каскада гидроузлов. Полезный объем Жигулевского водохранилища, равный 0,14 от среднегодового объема притока к водохранилищу за многолетие, позволяет осуществлять неполное годовое (сезонное), недельное и суточное регулирование стока р. Волги в интересах различных водопотребителей и водопользователей. Главными из них являются: энергетика, водный транспорт, водоснабжение, рыбное хозяйство, сельское хозяйство.

Водохранилище играет особую роль в качестве основного регулятора волжского стока в обеспечении режима специального весеннего попуска в низовья Волги, ежегодно проводимого в интересах рыбного и сельского хозяйства. Эта роль заключается в преобразовании поступающего в водохранилище остропикового притока в заданный режим сбросных расходов, соответствующий графику спецпропуска. Для оценки соответствия эксплуатационного режима водохранилища Жигулевской ГЭС Правилам [7] были проанализированы графики изменения уров-

ней в верхнем бьефе водохранилища (рис. 1, 2) и расходов в нижнем бьефе гидроузла.

На рис. 1 приведено внутригодовое распределение изменения уровня воды в верхнем бьефе Жигулевского водохранилища для различных лет. На рис. 2 показан календарный график изменения уровня воды в верхнем бьефе за многолетний период. За рассматриваемое время водохранилище один раз срабатывалось до отметки несколько ниже УМО. В отдельные годы уровень воды в водохранилище к концу периода сработки приближался к отметке НПУ. На начало апреля недоиспользовалось от 6 до 93 % полезного объема водохранилища. Требование поддержания в водохранилище минимального навигационного уровня воды выполнялось.

На основе проведенного анализа можно констатировать, что за последние десятилетия изменился характер регулирования стока водохранилищами. Вместо сезонного и годового регулирования стока, предусмотренного Правилами, фактически на всех ГЭС (кроме Чебоксарской) выполняется такое регулирование стока, которое позволяет обеспечить требования водного транспорта и рыбного хозяйства, однако приводит к энергетическому недоиспользованию стока из-за холостых сбросов.

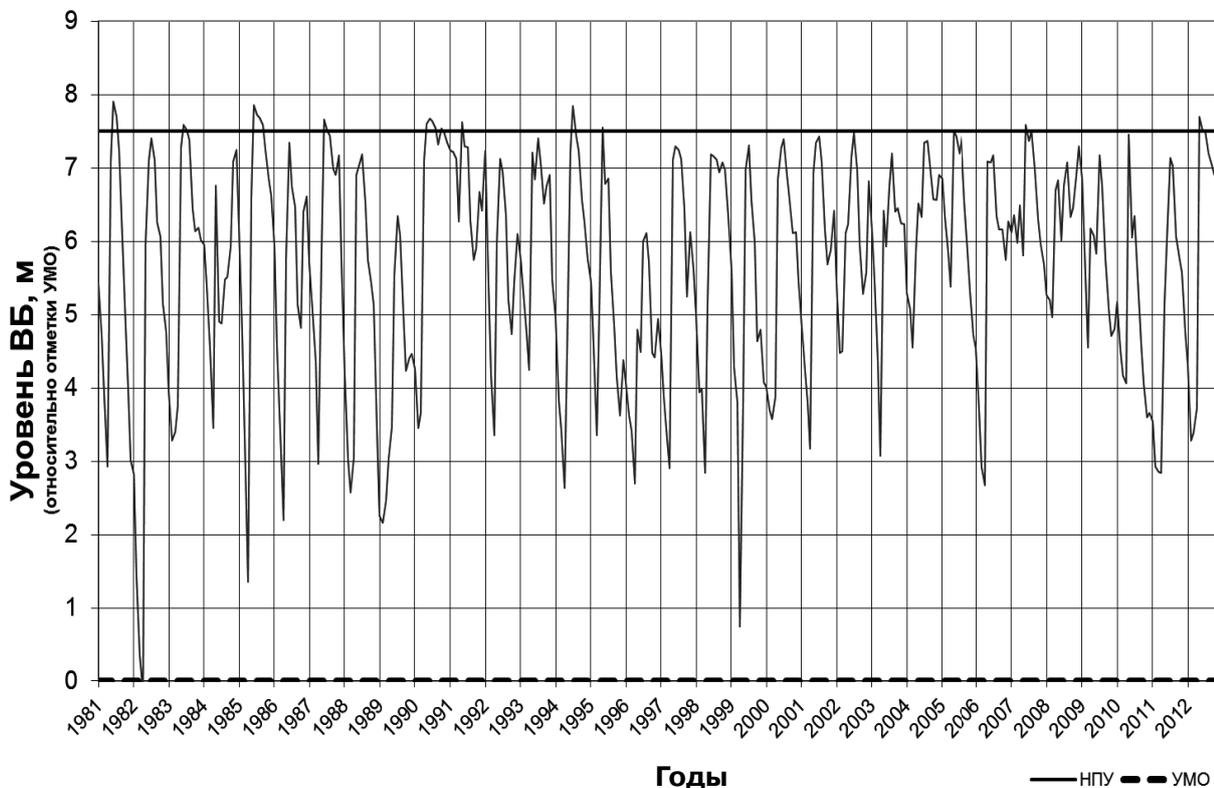


Рис. 2. График изменений уровней воды в верхнем бьефе Жигулевского водохранилища

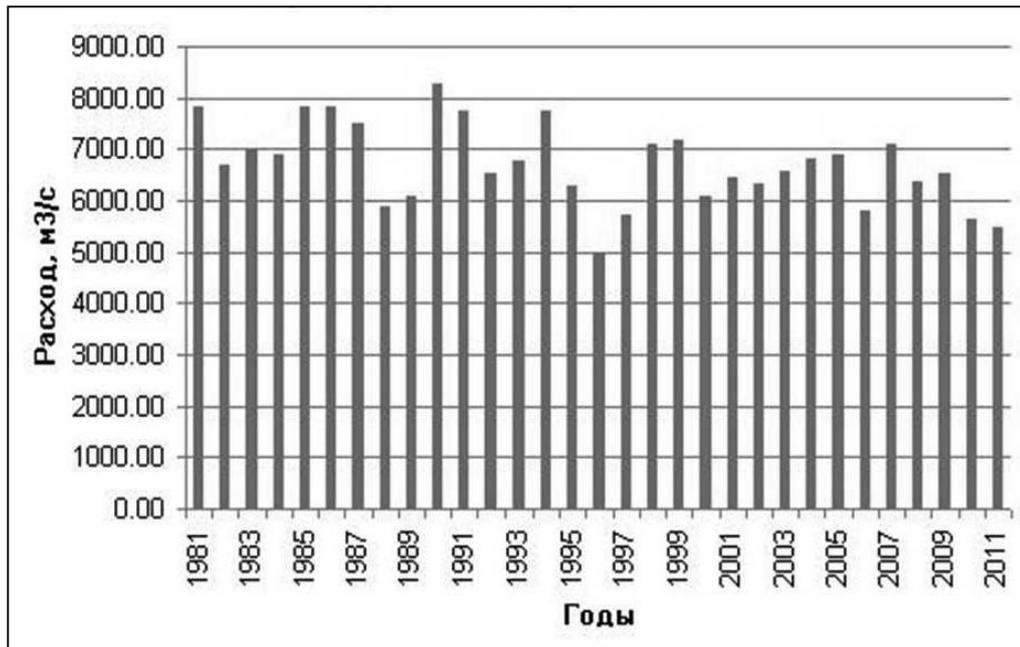


Рис. 3. Динамика изменения турбинного расхода Жигулевской ГЭС

Таблица 2

Основные характеристики выработки электроэнергии Жигулевской ГЭС

Анализируемый период, лет	Среднее значение выработки электроэнергии за период, ГВт·ч	Коэффициент вариации	Коэффициент асимметрии
31	10614,4	0,121	-0,102

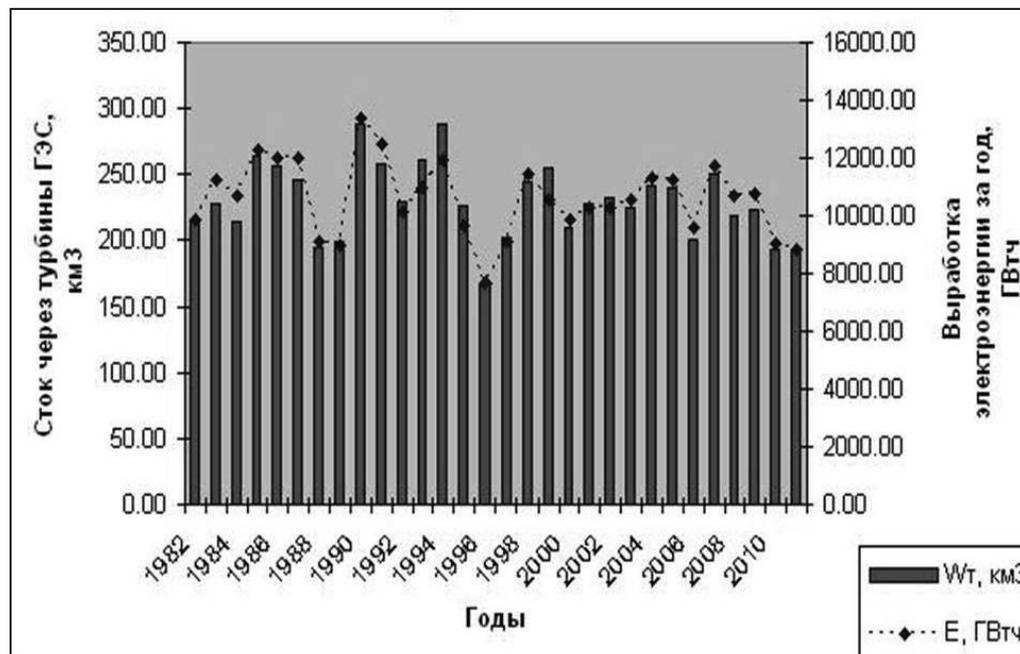


Рис. 4. Динамика изменения среднегодовой выработки электроэнергии Жигулевской ГЭС и объёмов годового стока через турбины

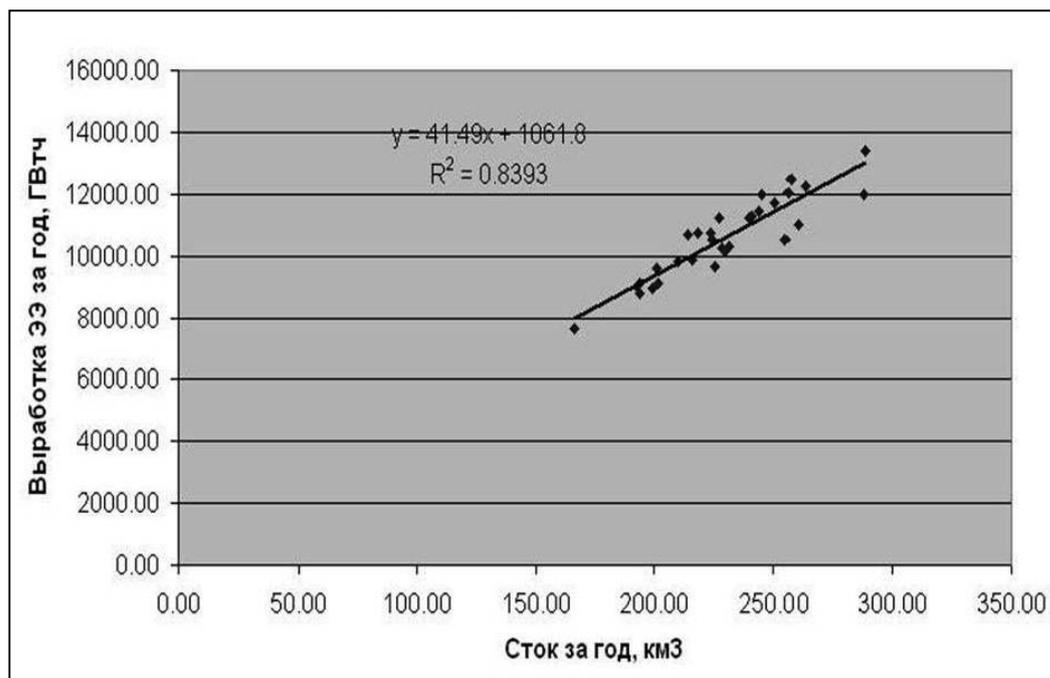


Рис. 5. Зависимость годовой выработки электроэнергии Жигулевской ГЭС от объёма годового стока через турбины ГЭС

Динамика изменения среднегодового расхода через турбины ГЭС показана на рис. 3. Среднегодовое значение стока в створе Жигулевской ГЭС равно 242 км³. Отношение полезного объема к среднегодовому стоку оценивается в 0,144. Минимальный расход через турбины ГЭС составил 4983 м³/с (1996 г.), а максимальный – 8261 м³/с (1990 г.). Коэффициент неравномерности турбинных расходов ГЭС равен 1,66. Средний удельный расход воды на производство электроэнергии составил 21,685 м³/кВт.ч.

За рассматриваемый период наблюдался рост среднемесячной зимней мощности, что связано с увеличением водности. Среднегодовая выработка электроэнергии ГЭС (P=50 %) за период 1982–2011 гг. составила 10687 ГВт.ч, что больше проектной (9600 ГВт.ч) на 11,3 %. Среднемесячная зимняя мощность (декабрь–март, P=90 %) составила 689 МВт, что превышает проектную (634 МВт) на 8,7 %. Наибольшее значение имеет климатообусловленное изменение стока рек. Изменение выработки гидроэлектроэнергии на Жигулевской ГЭС в отдельные годы при неизменности технических условий функционирования их оборудования и стабильности экономической ситуации в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу.

Проведен статистический анализ годовой выработки электроэнергии ГЭС каскада и определе-

ны основные характеристики: среднее значение, коэффициенты вариации и асимметрии (табл. 2). Коэффициент неоднородности выработки электроэнергии составляет 1,76. Построены кривые обеспеченности среднемесячной мощности за период декабрь–март, а также кривая обеспеченности годовой выработки электроэнергии.

Изменение выработки гидроэлектроэнергии на Жигулевской ГЭС в отдельные годы при неизменности технических условий функционирования их оборудования и стабильности экономической ситуации в основном зависит от изменения притока воды к водохранилищу.

Выполнен ретроспективный анализ связи выработки электроэнергии на Жигулевской ГЭС с водностью. Для этого были проанализированы фактические ряды, отражающие режим работы ГЭС как внутри года, так и при многолетнем разрезе (1982–2012 гг.). Между среднегодовой выработкой электроэнергии на Жигулевской ГЭС и стоком установлена устойчивая корреляционная зависимость. Наличие достаточно тесной связи между выработкой электроэнергии и стоком показано на рис. 4. Зависимость годовой выработки электроэнергии от турбинного стока имеет вид:  $E = 1091 + 41,49W_T$ . Тесноту корреляционной связи подтверждает коэффициент корреляции, равный 0,916 (рис. 5).

В качестве параметра, влияющего на выработку электроэнергии на ГЭС, может быть принят сток через турбины или сток в нижнем бьефе ГЭС. Использование первого параметра (стока через турбины) позволяет получить более тесную корреляционную связь. Использование второго параметра (стока в нижнем бьефе ГЭС) возможно при отсутствии данных по турбинным расходам.

Полученная зависимость может быть использована при прогнозировании выработки электроэнергии Жигулевской ГЭС на перспективу с учетом изменения водности, вызванной климатическими изменениями [11-13].

**Выводы.** 1. Основные принципы использования водных ресурсов водохранилища Жигулевской ГЭС, заложенные в Правилах, в целом показали устойчивость и работоспособность, несмотря на значительные изменения хозяйственных и экономических условий за прошедшие годы с момента их разработки.

2. Выявлен ряд несоответствий между их эксплуатационными режимами и регламентируемыми требованиями по поддержанию уровней воды в верхнем бьефе водохранилища, а также расходов воды в нижнем бьефе в период весеннего половодья, летне-осенней и зимней межени, определяемыми Правилами использования водных ресурсов, что указывает на необходимость корректировки Правил.

3. Анализ фактических режимов работы Жигулевской ГЭС за рассматриваемый период 1981-2012 гг. показал, что в условиях использования устаревших Правил среднесезонная годовая выработка электроэнергии и среднемесячная гарантированная зимняя мощность (декабрь-март,  $P=90\%$ ) превышает проектную.

4. Установлены статистические закономерности между показателями энергоотдачи Жигулевской ГЭС и характеристиками речного стока.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гидроэлектростанции России / АО «Институт Гидропроект». М., 2001.
2. Методические указания по составлению правил использования водных ресурсов водохранилищ гидроузлов электростанций. (Утверждены в 1999 г.). М.: Минтопэнерго РФ. 56 с.
3. О временных методических рекомендациях по установлению минимально допустимых расходов воды. Письмо МПР РФ от 17.01. 1997 № НМ-53/163.
4. Раткович Л.Д., Русякова П.А. Водохозяйственные аспекты правил управления водохранилищами комплексных гидроузлов // Материалы международной научно-практич. конф. «Роль природообустройства в

обеспечении устойчивого функционирования и развития экосистем». М., 2006. С. 38-42.

5. Колмогоров В.В., Халяпин Л.Е., Савельев В.А. О правилах использования водных ресурсов водохранилищ гидроэлектростанций в рыночных условиях // Гидротехническое строительство. 2005. №6. С. 38-42.

6. Резниковский А.Ш., Рубинштейн М.И. Диспетчерские правила управления режимами водохранилищ. М.: Энергоатомиздат, 1984. 104 с. (Б-ка гидротехника и гидроэнергетика; Вып.78).

7. Основные правила использования водных ресурсов Куйбышевского водохранилища на реке Волге. М.: Министерство мелиорации и водного хозяйства РСФСР, 1983. 19 с.

8. Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Анализ водно-энергетических режимов работы ГЭС Волжско-Камского каскада // Пятое Всероссийское совещание гидроэнергетиков. Сильной России - мощную обновленную гидроэнергетику. М., 2013. Расширенные тезисы докладов. СПб., 28-29 ноября 2013. С.411-416.

9. Романов А.А. Жигулевская ГЭС. Эксплуатация гидротехнических сооружений. Самара: Издательский дом «Агни», 2010. 360 с.

10. Методика расчёта водохозяйственных балансов водных объектов. Утверждена Приказом МПР России от 30 ноября 2007 г. № 314.

11. Елистратов В.В., Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Водно-энергетические режимы ГЭС Волжско-камского каскада // Гидротехническое строительство. 2014. №11. С. 11-15.

12. Климатические факторы возобновляемых источников энергии / В.В. Елистратов, Е.М. Акентьева, М.М. Борисенко, Н.В. Кобышева, Г.И. Сидоренко, В.В. Стадник; под ред. В.В. Елистратова, Н.В. Кобышевой, Г.И. Сидоренко. СПб.: Наука, 2010. 35 с., ил.

13. Акентьева Е.М., Сидоренко Г.И., Тюсов Г.А. К оценке влияния наблюдаемых и ожидаемых в будущем климатических изменений на гидроэнергетический потенциал регионов РФ // Труды Главной геофизической обсерватории им. А.И. Воейкова. 2010. Вып. 570. С. 95-105.

14. Гидрологические основы гидроэнергетики. 2-е изд., перераб. и доп. / А.Ш. Резниковский, М.А. Великанов, С.Г. Костина, М.И. Рубинштейн; под ред. А.Ш. Резниковского. М.: Энергоатомиздат, 1989. 261 с.

15. Беднарчук С.Е. Опыт управления режимами работы гидроузлов Волжско-Камского каскада водохранилищ и проблемы обеспечения социально-экономической и экологической стабильности в регионах Поволжья // Международный форум «Чистая вода - 2010», 2012.

16. Арсеньев Г.С. Основы управления гидрологическими процессами: водные ресурсы. СПб.: РГГМУ, 2005. 231 с.

17. Бальзанников М.И. Влияние рек на формирование промышленных территорий города Самары // Научное обозрение. 2014. № 6. С. 49-55.

© Масликов В.И., Сидоренко Г.И., 2015

Об авторах:

**МАСЛИКОВ Владимир Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры  
гражданского строительства и прикладной экологии  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург,  
ул. Политехническая, 29, тел. (812) 297-20-95  
E-mail: sgenergom@yandex.ru

**СИДОРЕНКО Геннадий Иванович**

доктор технических наук, профессор кафедры  
водохозяйственного и гидротехнического строительства  
Санкт-Петербургский политехнический университет  
Петра Великого  
195251, Россия, г. Санкт-Петербург, Политехническая, 29,  
тел. (812) 297-20-95  
E-mail: sgenergom@yandex.ru

**MASLIKOV Vladimir**

Doctor of Engineering Science, Professor of the Civil Engineering and Applied Ecology Chair  
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University  
195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29  
tel. (812) 297-20-95  
E-mail: sgenergom@yandex.ru

**SIDORENKO Gennady**

Doctor of Engineering Science, Professor of the Civil Engineering and Applied Ecology Chair  
Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University  
195251, Saint-Petersburg, Polytechnicheskaya str., 29  
tel. (812) 297-20-95  
E-mail: sgenergom@yandex.ru

Для цитирования: Масликов В.И., Сидоренко Г.И. Анализ водно-энергетических режимов Жигулевской ГЭС и связь выработки электроэнергии со стоком // Вестник СГАСУ. Градостроительство и архитектура. 2015. Вып. № 2(19). С. 73-80. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.02.12

For citation: Sidorenko V.I., Maslikov G.I. Evaluation of Water Energetic Modes of Zhigulevskaya Hydroelectric Power Station and Correlation between Electric Energy Generation and Water Discharge // Vestnik SGASU. Gradostroitelstvo i arhitektura [Vestnik of SSUACE. Town Planning and Architecture]. 2015. №2 (19). Pp. 73-80. DOI: 10.17673/Vestnik.2015.02.12 (in Russian)