

**005054563**

*На правах рукописи*

Институт водных проблем, гидроэнергетики и экологии АН Республики Таджикистан  
Институт водных проблем РАН

**ПЕТРОВ** Георгий Николаевич

**КОМПЛЕКС ПРИКЛАДНЫХ МЕТОДОВ  
И МОДЕЛЕЙ ДЛЯ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ  
ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ  
РЕСУРСОВ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК ЦЕНТРАЛЬНОЙ  
АЗИИ**

Специальность 25.00.27-Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

**- 8 НОЯ 2012**

МОСКВА – 2012

Работа выполнена в Институте водных проблем, гидроэнергетики и экологии  
Академии наук Республики Таджикистан.

**Официальные оппоненты:**

доктор технических наук,  
*Асарин А. Е.*  
(ОАО институт «Гидропроект»)

доктор технических наук, профессор  
*Александровский А. Ю.*  
(Национальный исследовательский университет МЭИ  
"Московский энергетический институт")

доктор технических наук, профессор  
*Исмайлов Г. Х.*  
(«Московский государственный университет  
природообустройства» )

**Ведущая организация:**

ОАО «Всероссийский научно-исследовательский  
институт гидротехники имени Б.Е.Веденева»

Защита диссертации состоится 13 декабря 2012 г. в 14 часов на заседании  
диссертационного совета Д.002.040.01 при Учреждении Российской академии наук  
Институте водных проблем РАН по адресу:

119333, Москва ул. Губкина, д.3

Факс: +7(499)135-54-15

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Института водных проблем РАН

Автореферат разослан « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2012 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
доктор геолого-минералогических наук,  
профессор



Р.Г. Джамалов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность проблемы.** Проблема обеспеченности водными ресурсами становится в последнее время одной из самых актуальных и сложных во всем мире. Особенно это относится к территориям Центральной Азии, характеризующимся засушливым климатом и практически полным использованием (в первую очередь на орошение) ограниченных водных ресурсов.

Центральная Азия в целом обладает достаточными запасами водных и энергетических ресурсов, но расположены они по странам крайне неравномерно, что определяет необходимость кооперации стран региона в совместном использовании водноэнергетических ресурсов.

Водные ресурсы используются в Центральной Азии, как для орошения, так и для выработки гидроэлектроэнергии.

Орошение является в регионе традиционной отраслью, ее история насчитывает уже не одну тысячу лет и все водные ресурсы для нее сегодня можно считать полностью исчерпанными.

В то же время гидроэнергетика начала интенсивно развиваться в Центральной Азии только в последние 50 лет и к настоящему времени освоено менее 5% гидроэнергетического потенциала рек региона.

Особенностью Центральной Азии является то, что основные массивы орошения расположены в странах нижнего течения рек – Казахстане, Узбекистане, Туркменистане, а гидроэнергетика с крупными регулирующими водохранилищами развивается в странах верхнего течения рек – Кыргызстане и Таджикистане. При этом все основные реки региона являются трансграничными и их водный сток на 80% формируется в странах верхнего течения.

Это создает конфликт интересов между отраслями и странами, который после распада СССР и образования в регионе пяти независимых суверенных республик приобрел межгосударственный характер.

Дополнительные сложности могут возникнуть в связи с глобальными изменениями климата и их негативным влиянием на водные ресурсы, являющимися основой жизнеобеспечения населения и формирующими экологию всего региона.

Теоретическую основу настоящего диссертационного исследования составили фундаментальные труды Авакяна А. Б., Александровского А. Ю., Асарина А. Е., Василевского А. Г., Великанова А. Л., Вознесенского А. Н., Данилова-Данильяна В. И., Крицкого С. Н., Менкеля М. Ф., Ратковича Д. Я.

Большое влияние на формирование выводов и научных положений диссертации оказали исследования ученых, посвященные проблемам оптимизации режимов работы комплексных гидроузлов - Образцова В. И., Обрезкова В. И., Пряжинской В. Г., Резниковского А. Ш., Храмовича И. Л.

При исследовании вопросов оценки и комплексного использования водно-энергетических ресурсов и их экономической эффективности использовались научные труды и публикации Ахроровой А. Д., Бабурина Б. Л., Готовцева А. В., Файн И. И.

В исследованиях межгосударственных отношений при совместном использовании водно-энергетических ресурсов использовались положения и выводы, содержащиеся в трудах ученых Духовного В. А., Маматканова Д. М., Сарсембекова Т. Т., Серика Примбетова, Усубалиева Е. У.

На формирование основных положений настоящей работы непосредственно относящихся к использованию водно-энергетических ресурсов Центральной Азии определенное влияние оказали труды Абдуллаевой Ф. С., Аллаева К. Р., Наврузова С. Т., Сорокина А. Г., Хамраева Н.

Кроме этого, начиная с 1992 г., для исследования всех вопросов, касающихся использования водноэнергетических ресурсов в Центральной Азии, было выполнено большое количество международных проектов с участием ЕЭК и ЭСКАТО ООН, ПРООН, ЮСАИД, ЮНЕСКО, Евросоюза, Мирового, Азиатского, Евразийского Банков Развития, и др.

Таджикистан и Кыргызстан обладает большими запасами водных и гидроэнергетических ресурсов, в десятки раз превышающими их собственные потребности. При этом водные ресурсы региона используются одновременно для гидроэнергетики стран верхнего, и орошаемого земледелия стран нижнего течения. Первые не имеют промышленных запасов минерального и углеводородного топлива, а вторые обладают ими, но испытывают дефицит воды для исторически сложившегося орошения, обеспечивающего работой миллионы людей.

Все это требует комплексного, интегрированного подхода, включающего водноресурсный, гидроэнергетический, экологический и социальный аспекты, неразрывно связанных между собой. Решение этих проблем требует использования специальных методов анализа и математического моделирования.

**Объектом диссертационного исследования** являются водные ресурсы крупных рек Центральной Азии, имеющих преимущественно трансграничное значение.

**Предметом исследования** является водный сток и его регулирование в интересах ирригации и гидроэнергетики. При этом как ирригация, так и гидроэнергетика рассматриваются только как отрасли водного хозяйства.

**Целями диссертационного исследования** являются: анализ состояния и современных тенденций использования и развития водноэнергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии; разработка практических методов оптимизации комплексного регулирования и использования стока, в том числе с применением математических моделей; разработка механизмов согласования и оптимизации интересов ирригации и гидроэнергетики при совместном использовании водноэнергетических ресурсов.

**Основные задачи работы.** Для решения поставленной цели решались следующие задачи:

- Комплексное изучение существующей ситуации в водохозяйственном комплексе Центральной Азии, выявление основных проблем и тенденций развития.
- Исследование эффективности использования водных и гидроэнергетических ресурсов крупных рек Центральной Азии.
- Разработка метода расчета оптимальных параметров гидроузлов при каскадном освоении водноэнергетических ресурсов крупных рек.
- Разработка математических моделей регулирования речного стока и оптимизации режима работы гидроузлов и каскадов гидроузлов комплексного назначения.
- Обоснование оптимальных решений проблемы конфликта между гидроэнергетикой и ирригацией и эффективных способов управления совместным использованием водноэнергетических ресурсов трансграничных рек.

**Методы исследования.** При решении поставленных задач использованы методы гармонического, регрессионного и корреляционного анализов, оптимизационного и имитационного моделирования и вычислительных экспериментов. При обработке материалов использовались также методы сравнительного анализа, SWOT-анализа, Ивент-анализа и кластерного анализа. Все выполненные в диссертации исследования основаны на фактических материалах, полученных в результате обобщения данных натурных наблюдений и исследований и анализа реальной деятельности предприятий водного сектора.

**Практическая значимость и внедрение результатов исследований.** Полученные результаты были применены:

1. При разработке стратегий и программ комплексного, интегрированного использования водноэнергетических ресурсов Центральной Азии

2. При разработке региональной стратегии ООН: «Strengthening Cooperation for Rational and Efficient use of Water and Energy resources in Central Asia. Special Programme for the Economies of Central Asia Project Working Group on Energy and Water Resources». ECE/ESCAP. 2004.
3. При разработке «Программы конкретных действий по улучшению экологической обстановки в бассейне Аральского моря на ближайшие 3-5 лет с учетом социально-экономического развития региона (основные направления)», (ПБАМ-1), 1994-2000 гг., «Программы конкретных действий по улучшению экологической и социально-экономической обстановки в бассейне Аральского моря на период 2003-2010 гг.», (ПБАМ-2), 2003-2010 гг. и ПБАМ-3 (2010-2011гг).
4. Для оптимизации режимов работы Нурекской и Кайраккумской ГЭС в Таджикистане и Токтогульской в Кыргызстане.
5. В проекте «Информирования общественности по планируемой Всемирным банком Социально-Экологической оценке для Рогунской ГЭС». МБ, Tajik Branch of the Regional Environmental Centre for Central Asia. 2010-2011 гг.

**Основные положения, выносимые на защиту:**

1. Комплекс оптимизационных и имитационных математических моделей управления работой гидроузлов и регулирования стока в интересах ирригации и гидроэнергетики.
2. Методика расчета стоимости услуг по регулированию водного стока и межгосударственный механизм взаимоотношений между ирригацией и гидроэнергетикой - странами формирования и ирригационного использования водных ресурсов.
3. Механизм регионального сотрудничества при совместном использовании водноэнергетических ресурсов трансграничных рек.
4. Метод оперативного прогноза водного стока и математическая модель для его практического использования.
5. Способ и математическая модель мониторинга полезного объема водохранилищ и динамики его изменения.
6. Стратегия комплексного освоения водно-энергетических ресурсов (каскадного строительства гидроузлов), оптимизирующая регулирование стока в интересах ирригации и гидроэнергетики и обеспечивающая экономическую эффективность и экологическую безопасность.

**Научная новизна работы** заключается в получении оригинальных результатов исследований по основным положениям, вынесенным на защиту.

Разработана методика оперативного прогноза водного стока, обеспечивающая эффективное использование водных ресурсов для гидроузлов комплексного, ирригационно-энергетического назначения.

На основе анализа изменчивости водного стока и морфометрических характеристик крупных горных рек определены параметры гидроузлов и водохранилищ, обеспечивающие полное освоение водных ресурсов в интересах ирригации и гидроэнергетики, минимизирующие воздействие на окружающую среду.

Разработана методика оценки стоимости гидрологического прогноза рек.

Получены критерии сработки водохранилищ, обеспечивающие эффективное использование водных ресурсов в интересах гидроэнергетики.

Разработана модель перманентного мониторинга полезного объема водохранилищ и динамики его изменения.

Разработаны математические модели устойчивой работы гидроузлов, обеспечивающие необходимую подачу воды для ирригации и стабильное энергоснабжение потребителей.

Предложена методика расчёта стоимости водных ресурсов при комплексном регулировании водного стока в интересах гидроэнергетики и ирригации.

Исследована многолетняя изменчивость водного стока крупных рек региона Центральной Азии и показана связь с изменением климата. Отмечена необходимость дальнейших исследований.

Предложен интеграционный механизм, оптимизирующий межгосударственные взаимоотношения стран Центральной Азии при совместном использовании водноэнергетических ресурсов трансграничных рек.

**Достоверность полученных результатов** обеспечивается использованием разных методов анализа и взаимодополняющих материалов с обработкой статистическими методами. Все результаты работы подвергались сравнительному анализу с фактическими данными, показавшему их достаточно высокую точность.

**Апробация работы.** Основные положения и результаты работы докладывались на Энергетических сессиях ЕЭК ООН в Женеве, Международных, всесоюзных, российских конференциях, семинарах, симпозиумах в 1989-2012 гг.

**Личный вклад автора** состоит в постановке задач, разработке способов их решения, в том числе с использованием математических моделей, обобщении и интерпретации результатов, и получении указанных выше научных положений и результатов, выносимых на защиту.

Все основные научные результаты и выводы, представленные в диссертации, получены автором самостоятельно или под его руководством.

**Публикации.** Основные результаты, представленные в диссертации, изложены в 59 научных работах, в том числе 27 в изданиях, рекомендуемых ВАКом.

**Структура и объем диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка использованных источников (322 наименований) и приложений.

Общий объем работы, без списка литературы и приложений составляет 297 машинописных страниц, включая 69 таблиц и 140 рисунков.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении определена актуальность работы, установлены ее цели и задачи, показана практическая значимость.

### **Глава 1. ВОДНЫЕ РЕСУРСЫ В ЦЕНТРАЛЬНОЙ АЗИИ, ИХ СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

В первой главе рассматриваются общие вопросы использования водноэнергетических ресурсов Центральной Азии – распределение по странам и республикам, их эффективность, стратегии развития и оптимизация их освоения и использования.

В разделе 1.1 рассматривается ситуация в Центральной Азии в области ирригации и гидроэнергетики. Показана динамика их развития до настоящего времени. Отмечено интенсивное развитие ирригации в 60-90-х годах прошлого века, приведшее к полному исчерпанию водных ресурсов и деградации окружающей среды. Выявлен большой потенциал использования водных ресурсов для развития гидроэнергетики.

В разделе 1.2 показаны большие возможности и безальтернативность освоения гидроэнергетических ресурсов в странах верхнего течения рек Центральной Азии – Таджикистане и Кыргызстане. Например, Таджикистан, площадь территории и население которого составляет 0.1% общемировых, обладает 4% всех гидроресурсов мира. По общим запасам гидроресурсов он занимает восьмое, а по экспортному их потенциалу – третье место в мире. Также большой гидропотенциал имеет Кыргызстан. При этом на сегодняшний день он освоен менее чем на 5%.

Таджикистан и Кыргызстан, в отличие от других республик региона, практически не обладают промышленными запасами минерального топлива и вынуждены

импортировать их, прежде всего из соседних стран. В таблице 1 показана структура энергоресурсов Таджикистана. Такая же ситуация имеет место и в Кыргызстане.

Таблица 1. Сравнительный анализ запасов энергоресурсов Таджикистана. млн. т.у.т. (%)

	Гидроресурсы	Уголь	Нефть	Газ	всего	всего в год
Годовые запасы	158,12	13,35	1,85	0,75		174,07
	(90,84)	(7,67)	(1,06)	(0,43)		(100)

В то же время в Таджикистане и Кыргызстане формируются более 80% всех водных ресурсов региона, в использовании которых для ирригации заинтересованы все страны нижнего течения – Казахстан, Туркменистан, Узбекистан.

В этих условиях промышленное освоение гидроресурсов странами верхнего течения рек не может не оказать существенного влияния как на общую ситуацию в водном секторе региона, так и, особенно, на ирригацию стран нижнего течения. Можно отметить, что уже сегодня, при минимальном уровне освоения гидроресурсов, начало строительства только по одному новому крупному гидроузлу в странах верховьев рек, Рогунского – в Таджикистане и Камбаратинского-1 – в Кыргызстане, привело к серьезному межгосударственному конфликту.

Это определяет одну из задач диссертационного исследования – разработку основных положений стратегии освоения водно-энергетических ресурсов, оптимизирующих регулирование водного стока в интересах ирригации и гидроэнергетики при обеспечении экономической эффективности и экологической безопасности.

С учетом этого, а также принимая во внимание, что все основные реки Центральной Азии имеют трансграничный характер, становится понятной необходимость интеграции всех стран бассейна Аральского моря в области совместного использования водноэнергетических ресурсов.

В целях практического использования ресурсов гидроэнергетики в Таджикистане и регионе, исследуется энергетическая эффективность наиболее крупных рек. Выявлено существенное различие в энергоэффективности даже самых крупных из них (рис. 1).

Показано, что энергоэффективность рек является основным фактором, определяющим стоимость освоения гидроресурсов.

Получена зависимость между энергоэффективностью рек и их участков и экономической эффективностью гидроузлов:

$$\frac{p_1}{p_2} = \frac{1.429}{(k+0.429)}$$

где:  $p_i$  – удельные стоимости строительства гидроузлов на реках разной энергоэффективности,  
 $k$ –отношение энергоэффективностей рассматриваемых рек.

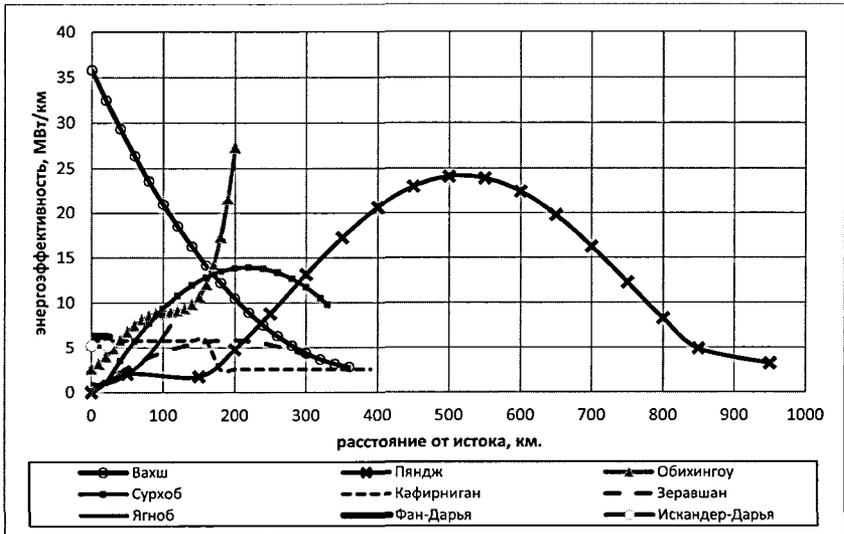


Рис. 1. Энергоэффективность крупных рек Таджикистана

Расчеты, выполненные для разных рек, показывают, что стоимости строительства гидроузлов на них могут отличаться более чем в 2 раза (табл. 2).

Таблица 2. Удорожание строительства ГЭС на крупных реках Таджикистана по сравнению с р. Вахш

река	Вахш	Обихингоу	Сурхоб	Фан-Дарья	Искандер-Дарья	Зеравшан	Кафирниган	Ягноб
$k$	1.00	0.68	0.67	0.43	0.35	0.29	0.27	0.21
$p_i/p_{\text{Вахш}}$	1.00	1.29	1.30	1.67	1.83	1.98	2.05	2.25

В разделе 1.3 обсуждаются вопросы стратегии развития гидроэнергетики Таджикистана и Кыргызстана. Показано, что сегодня эти республики находится среди

стран с очень низким уровнем экономического развития (рис. 2) и им для достижения среднемирового уровня необходим рост экономики в 7-9 раз.

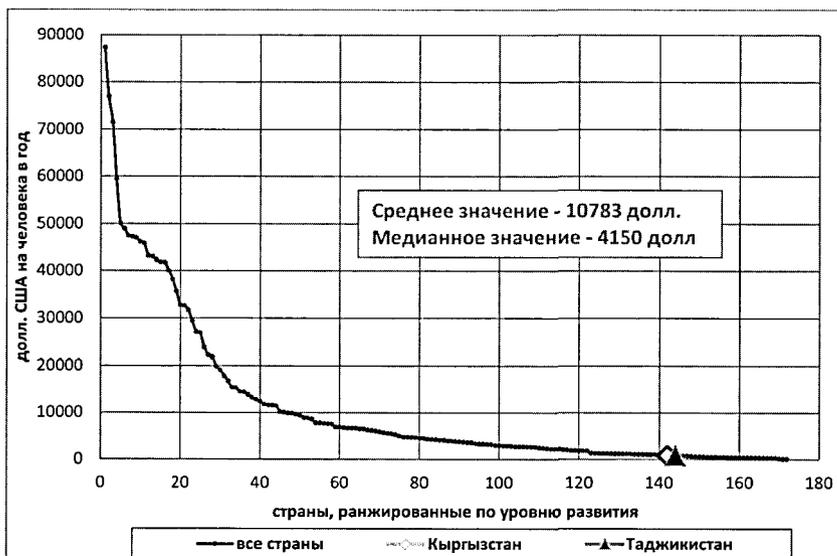


Рис. 2. Уровень экономического развития стран мира. 2010 г.

При существующей сегодня в мире пропорциональной зависимости экономического развития от энергопотребления это требует такого же роста последнего. Анализ показал, что решение этой проблемы возможно как за счет ввода новых мощностей энергетики, так и за счет повышения эффективности использования энергии, находящейся сегодня на достаточно низком уровне. После повышения эффективности использования энергии в рассматриваемых странах до среднемирового уровня необходимость прямого роста мощности энергосистемы снижается с 7-9 раз до 2.5-3 раз, и становится реальной.

В разделе 1.4 обсуждается стратегия комплексного, ирригационно-энергетического, освоения и использования водных ресурсов Центральной Азии, вопросы строительства гидроузлов с водохранилищами и оптимизации их параметров. Решается задача максимально полного хозяйственного использования водных ресурсов, при обеспечении экономической эффективности инвестиций и экологической безопасности. Критерием является высота плотин в каскаде, обеспечивающие объемы водохранилищ в сумме достаточные для полного

регулирования стока и максимальную выработку электроэнергии. Показано, что при наиболее эффективном для массового строительства каскадном освоении гидроресурсов, оптимальной высотой плотин для крупных рек региона является 95-125 м. При этом может быть обеспечено как полное освоение энергоресурсов, так и регулирование, необходимое для ирригации.

## Глава 2. СОВРЕМЕННАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ И ЕЕ ПРОГНОЗ

Во второй главе рассматриваются вопросы изменчивости водных ресурсов, в том числе связанных с глобальным изменением климата, и возможные способы адаптации к ним.

В разделе 2.1 анализируются разные виды изменчивости водного стока крупных рек бассейна Аральского моря.

Для сезонной изменчивости двух основных рек бассейна – Вахша и Нарына – разработан метод оперативного прогноза стока и его годового гидрографа, Метод базируется на фактических гидрологических замерах расходов рек и его точность постоянно возрастает со временем – уже к началу вегетации ошибка прогноза годового стока составляет  $\approx 3\%$ , а к зимнему периоду, особенно важному для гидроэнергетики – менее  $1\%$  (рис. 3).

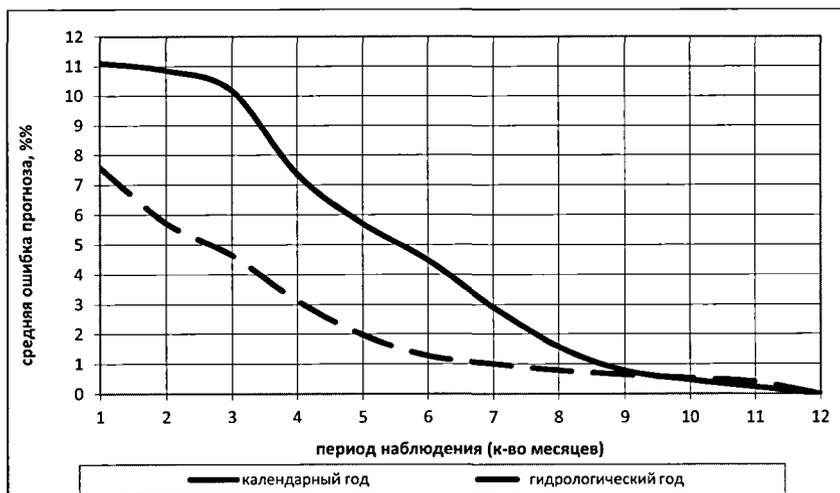


Рис. 3. Средняя ошибка прогноза годового объема стока в зависимости от периода наблюдения. р. Вахш

Оценку точности оперативного прогноза стока можно сделать также на основании сравнения с наблюдаемыми величинами естественных колебаний годового стока рек Вахш и Нарын.

Вахш за период наблюдений 1932÷2005 гг. имеет среднегодовой сток  $Q_{cp} = 20.18 \text{ км}^3$  со среднеквадратической ошибкой  $\sigma = 2.73 \text{ км}^3$  (13.52%). Соответственно для Нарына:  $Q_{cp} = 11.68 \text{ км}^3$  при  $\sigma = 2.35 \text{ км}^3$  (21.86%).

Отсюда границы 95% доверительных интервалов ( $t_{0.95} = 1.96$ ) будут равны:

- для Вахша:  $\pm 26.5\%$
- для Нарына  $\pm 42.85\%$

Поэтому точность оперативного прогноза водного стока, достигаемая уже на 4-м месяце наблюдений (Вахш – 3.13%; Нарын – 3.2%), безусловна достаточно высокая.

В дальнейшем этот метод прогноза был использован для разработки математической модели управления режимом стока (раздел 3.2).

Линейные тренды изменения водного стока характерных рек Таджикистана показали, что они различны для крупных, средних и мелких рек (рис. 4 и 5), что, в свою очередь, связано с различием высот их водосборных бассейнов. Это говорит о том, что изменения климата в разных конкретных условиях проявляются по-разному и изучить эти процессы можно только при помощи постоянного мониторинга.

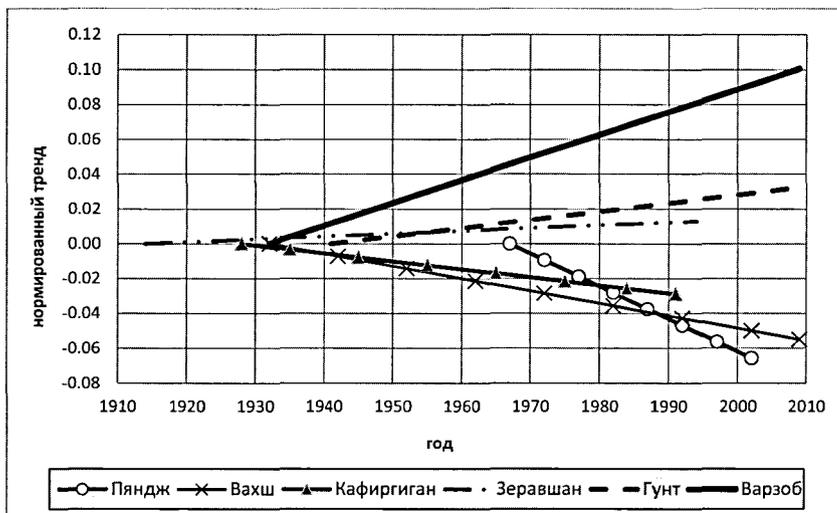


Рис. 4. Нормированные линейные тренды рек Таджикистана

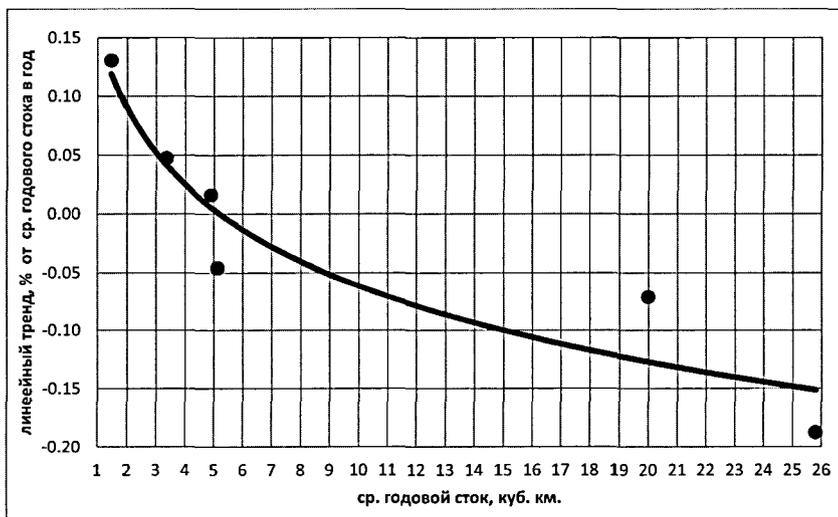


Рис. 5. Зависимость линейного тренда от среднегодового стока рек

Исследования циклических колебаний речного стока выполнялись методами гармонического анализа. Выявлены две основные составляющие циклических колебаний водности рек Таджикистана с периодом 5 и 30 лет. Показано, что циклические колебания водности всех рек Таджикистана синхронны между собой (рис. 6).

При этом выявлены корреляционные связи водности рек с основными факторами, ее формирующими – осадками и температурой (рис. 7), и получена аналитическая зависимость:

$$W = 0.017498 * O + 2.303711 * T - 9.98014$$

где:  $W$  – годовой сток реки Вахш, км<sup>3</sup>,  $O$  – среднегодовые осадки по республике, мм,

$T$  – среднегодовая температура воздуха по республике, °С.

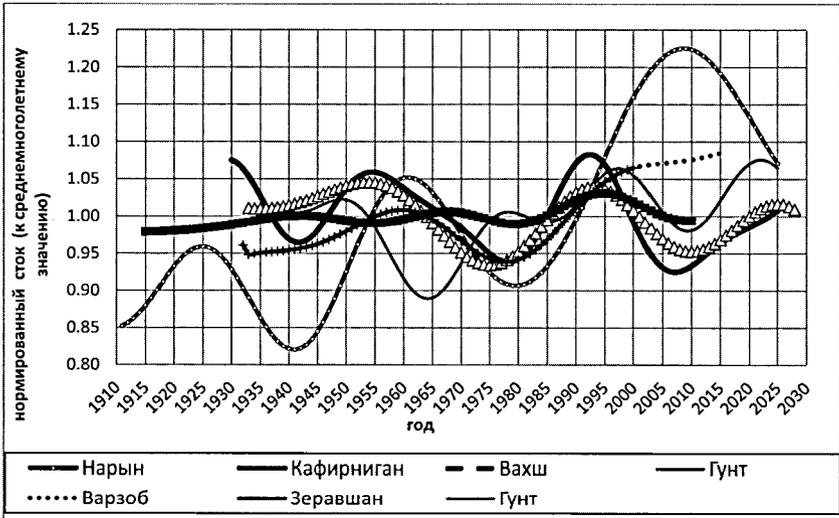


Рис. 6. Цикличность водного стока рек Таджикистана.

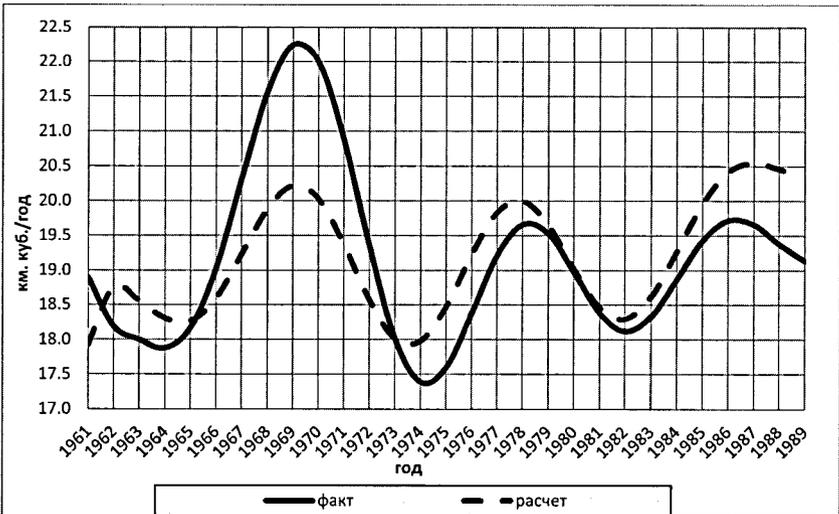


Рис. 7. Фактическая и расчетная  $[W = f(\text{осадки, температура})]$  цикличность водного стока р. Вахш

При этом нужно отметить, что в отличие от оперативного прогноза, результаты исследований многолетней изменчивости рек не получили практического применения. Для этого нужны дальнейшие исследования.

В разделе 2.2 излагается метод оценки стоимости гидрологического прогноза в приложении к гидроэнергетике. Эффективность энергоиспользования водных ресурсов зависит от точности прогноза, поэтому в качестве стоимости последнего можно принять потери электроэнергии, связанные с его неточностью. Расчеты показывают, что для такого гидроузла, как Нурекский, стоимость гидрологического прогноза может составлять десятки миллионов долларов в год (табл. 3).

Таблица 3.

Тариф на электроэнергию, цент/кВт.ч.	Общая стоимость гидрологического прогноза, млн. долл.	Стоимость прогноза паводка, млн. долл.
0,5	5,0	3,0
1,0	10,0	6,0
2,0	20,0	12,0
3,0	30,0	18,0
5,0	50,0	30,0
10,0	100,0	60,0

В разделе 2.3 анализируется влияние на водность рек глобальных изменений климата. Отмечено очень большое различие прогнозов, выполненных по существующим сегодня моделям-сценариям. При этом выявлен важный факт, что оказывая в целом на водность рек негативное влияние, изменение климата приводит к увеличению в регионе атмосферных осадков, что в свою очередь увеличивает годовой сток, и уменьшает величину паводков (рис. 8 и 9). Последнее положительно сказывается на безопасности использования водных ресурсов.

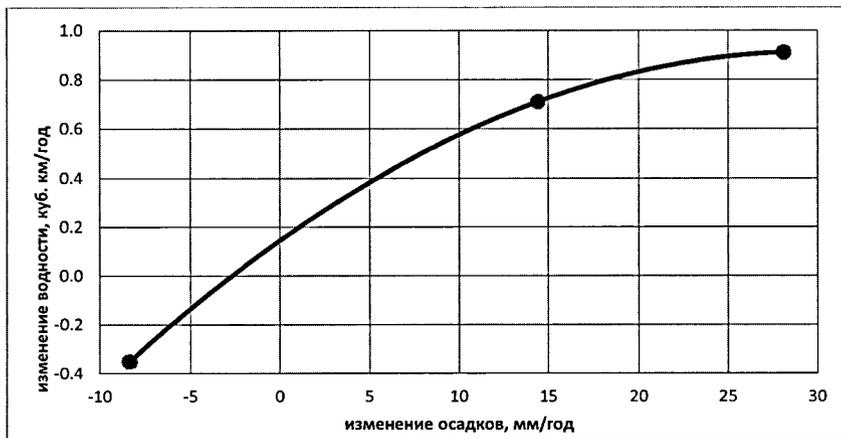


Рис. 8. Изменение годового стока р. Вахш от изменения количества осадков

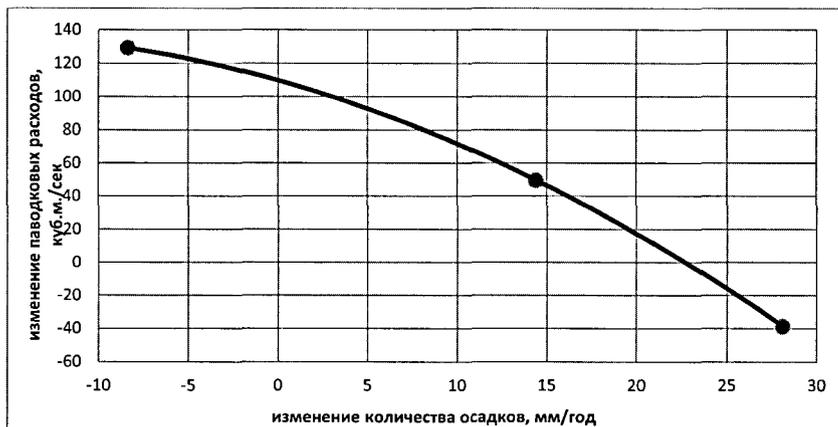


Рис. 9. Изменение паводковых расходов р. Вахш от изменения количества осадков

В разделе 2.4 рассматриваются вопросы безопасности, связанные с использованием водных ресурсов и их изменчивостью. Предлагается уточненное определение безопасности для гидротехнических объектов, как *свойство, характеризующееся способностью предотвращать возникновение всех видов опасных воздействий на эксплуатирующий объект персонал, население и окружающую среду, или, если они возникли, ограничивать их воздействие допустимыми пределами.*

На основе анализа аварийных ситуаций в бассейнах двух самых крупных рек Таджикистана подтверждается, что одним из важнейших факторов повышения безопасности использования водных ресурсов является регулирование стока строительством плотин.

В разделе 2.5 рассматриваются вопросы адаптации объектов водного хозяйства к изменчивости речного стока. Показано, что существующие сегодня нормы проектирования гидросооружений в достаточной мере обеспечивают их необходимую надежность. В то же время адаптация играет важнейшую роль при эксплуатации гидросооружений и повышении эффективности их работы. При этом и безопасность, и эффективность объектов водного хозяйства и гидроэнергетики в большой мере зависят от точности гидрологических прогнозов.

И, наконец, безопасность использования водных ресурсов, в первую очередь экологическая, определяется эффективным регулированием режимов стока. Это можно показать на примере двух самых крупных рек Таджикистана – Пянджа и Вахша. Пяндж сегодня используется очень ограниченно в целях ирригации, энергетически он

совершенно не освоен. На Пяндже нет крупных водохранилищ, и регулирование его стока не производится. Вахш в отличие от Пянджа практически полностью освоен как для гидроэнергетики, так и для ирригации – на нем построен крупнейший Нурукский гидроузел с водохранилищем общим объемом 10.5 км<sup>3</sup> и ряд других, более мелких. При этом с 1985 по 2011 годы, в бассейне реки Пяндж произошло 8 крупных, зарегистрированных мировой статистикой и 30 более мелких, отмеченных МЧС страны, наводнений. В то же время на реке Вахш, ресурсы которой, как отмечено выше, полностью используются для гидроэнергетики и ирригации, за исследуемый период не было ни одного серьезного наводнения.

### **Глава 3. УПРАВЛЕНИЕ РЕЖИМОМ СТОКА ДЛЯ РЕШЕНИЯ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННЫХ ЗАДАЧ**

Глава 3 посвящена вопросам управления режимами речного стока в интересах гидроэнергетики и ирригации, а также оптимизации работы гидроузлов с использованием специально разработанных оптимизационных и имитационных математических моделей.

В разделе 3.1 исследуются общие вопросы эффективности работы водохранилищ. Используя критерий эффективности сработки водохранилища в виде:

$$\frac{\mathcal{E}_2}{\mathcal{E}_1} \geq 1$$

где:  $\mathcal{E}_1$  - выработка электроэнергии при работе ГЭС в течение всего расчетного периода работает без какой - либо сработки водохранилища, при его максимальном наполнении (на транзитном стоке),

$\mathcal{E}_2$  - выработка электроэнергии при равномерной сработке водохранилища в течение всего расчетного периода, были получены его конкретные выражения через параметры водохранилищ и режима работы гидроузла:

$$T \leq \frac{S(H_1+H_2)}{86400Q_0}$$

$$Q_0 \leq \frac{S(H_1+H_2)}{86400T}$$

где:  $S$  – площадь поверхности водохранилища,  $H_1 = \nabla_{ББ}^{max} - \nabla_{НБ}$  напор (максимальный) на ГЭС,  $H_2 = \nabla'_{ББ} - \nabla_{НБ}$  - напор на ГЭС, в конце сработки водохранилища,  $Q_0$  - расход воды через водохранилище и ГЭС,  $T$  - продолжительность рассматриваемого периода в сутках.

Пример использования полученного критерия для Кайраккумского гидроузла показан на рис. 10. Видно, что эффективность сработки водохранилища в виде дополнительной выработки электроэнергии ( $\mathcal{E}_2/\mathcal{E}_1 \geq 1$ ) достигается только при времени сработки  $T \leq 120$  суток.

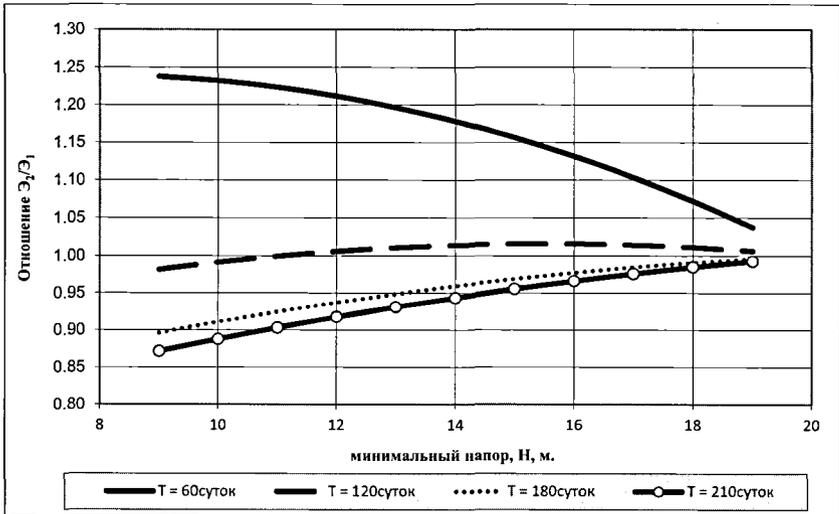


Рис. 10. Эффективность сработки Кайраккумского водохранилища в зависимости от конечного напора и времени

В разделе 3.2 решаются задачи оптимизации режимов сезонного и многолетнего регулирования стока для нужд гидроэнергетики и ирригации.

Во всех случаях основными исходными данными моделей являются притоки и расходы воды, и емкости существующих (и проектируемых водохранилищ). В этой постановке решается несколько основных задач:

- Выравнивание выработки электроэнергии для рассматриваемого периода – сезона, года, многолетнего периода,
- Максимизация выработки электроэнергии для рассматриваемого периода – сезона, года, многолетнего периода,
- Определение выработки электроэнергии при обеспечении заданной потребности в воде для ирригации,
- Минимизация, или полное исключение холостых сбросов из водохранилищ,

- Определение объемов перерегулирования стока (компенсаций) при переходе от энергетического к ирригационному режиму.

Все модели имеют прикладной характер и разработаны для конкретных стран, бассейнов и гидроузлов Центральной Азии.

Одна из моделей разработана для решения задачи управления режимом стока на примере Нурекской ГЭС на р. Вахш.

Задачей данной модели является максимально возможное для Нурекского водохранилища сезонного регулирования выравнивание стока в течение всего года. Критерием оптимального режима стока в данном случае является наиболее полное и эффективное использование водного стока и возможностей водохранилища для обеспечения нужд ирригации и устойчивого энергоснабжения потребителей.

Задача решается в рамках перспективного планирования режима работы гидроузла (ГЭС и водохранилище). Период планирования – 1 апреля n-го года  $\pm 31$  марта n+1-го года. Оптимальный с точки зрения выравнивания стока и, соответственно, выработки электроэнергии режим разрабатывается, начиная с первого месяца исследуемого периода и уточняется в последующие месяцы по мере получения данных о фактическом стоке. Общая модель состоит из 10 блоков:

Блок 1 - прогноз параметров стока

Блок 2 – расчет интегральных кривых естественного стока

Блок 3 - расчет интегральных кривых зарегулированного стока

Блок 4 - Расчет среднемесячных расходов зарегулированного стока

Блок 5 – Расчет среднемесячных отметок верхнего бьефа

Блок 6 – Расчет среднемесячных отметок нижнего бьефа

Блок 7 - Расчет среднемесячных потерь напора

Блок 8 - Расчет среднемесячных напоров ГЭС

Блок 9 - Расчет среднемесячных значений  $K = 9.81\eta$  в формуле выработки электроэнергии:  $\mathcal{E} = KQH$

Блок 10 - Расчет среднемесячной выработки электроэнергии

Модель разработана на базе оперативного прогноза стока, представленного в разделе 2.1.1.

Интерфейс этой модели в виде электронной таблицы Excel показан в окне № 1 ниже. Оценку эффективности разработанной математической модели регулирования стока можно сделать на основании сравнения выполненных с ее помощью расчетов с фактическими данными (табл. 4).

Математическая модель регулирования режима стока для Нурекской ГЭС на реке Вахш  
Окно № 1

<i>Исходные данные</i>												
год	2008									2009		
месяц	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
Средне месячный расход, м <sup>3</sup> /сек	430	780	1158	1103	1090	502	254	211	193	186	195	237
Месячный объем стока, км <sup>3</sup>	1.115	2.089	3.001	2.954	2.919	1.301	0.680	0.565	0.517	0.498	0.472	0.635
Накопленный объем стока	1.115	3.204	6.205	9.159	12.079	13.380	14.060	14.625	15.142	15.640	16.112	16.747
<i>Результаты</i>												
Выработка электроэнергии, млн. кВт.ч				годовой сток, км <sup>3</sup>				паводок, км <sup>3</sup>				
дата прогноза	за год	за XI - III	W <sub>год.</sub> км <sup>3</sup>	Q <sub>ср. год.</sub> м <sup>3</sup> /с	июнь-ав густ	май-сентя брь						
1-го мая	11470.3	3779.6	20.48	649.4	11.206	15.358						
1-го июня	11377.7	3769.8	20.38	646.2	11.151	15.280						
1-го июля	11230.2	3737.6	20.04	635.5	10.969	15.022						
1-го августа	10236.7	3564.8	18.24	578.5	9.990	13.633						
1-го сентября	9899.6	3506.5	17.63	559.2	9.658	13.162						
1-го октября	9675.7	3558.6	17.22	546.1	9.431	12.842						
1-го ноября	9598.0	3516.8	17.08	541.6	9.355	12.734						
1-го декабря	9582.3	3506.5	17.05	540.8	9.339	12.712						
1-го января	9595.9	3515.4	17.08	541.5	9.353	12.731						
1-го февраля	9635.0	3540.9	17.15	543.7	9.391	12.785						
1-го марта	9685.0	3573.6	17.24	546.6	9.440	12.854						
1-го апреля	9743.1	3611.4	17.34	549.9	9.497	12.935						

Сравнение показывает, что использование модели позволяет на 13.5% увеличить общую выработку электроэнергии в наиболее холодный сезон – декабрь-март:

$$(2836.3 - 2499.9)/2499.9 \times 100 = 13.5\%$$

И, самое главное, при этом происходит ее существенное выравнивание в этот период. Фактическая выработка в этот сезон изменялась от максимальной, 882.33, до

минимальной, 364.77 млн. кВт.ч, то есть в 2.4 раза. При использовании модели, это различие уменьшается до 1.2 раз:

$$765.5/644.9 = 1.18$$

Таблица 4. Сравнительный анализ расчетной и фактической выработки электроэнергии Нурекской ГЭС. 2008-2009 г.

Дата прогноза	млн. кВт.ч													
	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март	Э <sub>общ.</sub>	Э <sub>г.э.</sub>
Расчеты модели	620.1	967.8	996.8	1073.7	1118.9	961.4	807.1	762.2	765.5	740.9	644.9	684.9	10141	2836.3
Реальная выработка ОАХК "Барки Точик"	572.64	1053.45	1336.75	1423.95	1366.27	887.99	751.28	761.34	882.33	852.20	400.60	364.77	10653.6	2499.9

Другая математическая модель регулирования режима стока разработана для Токтогульского гидроузла на реке Нарын. Она основана на алгоритмах оперативного прогноза стока реки Нарын, полученных в разделе 2.1.1.

Задачей модели является полное выравнивание стока для Токтогульского водохранилища многолетнего регулирования в течение года. Критерием оптимального режима стока в данном случае является наиболее эффективное использование водного стока для устойчивого энергоснабжения потребителей с учетом потребностей будущих лет.

Период планирования так же, как и для модели Нурекского гидроузла – 1 апреля n-го года ÷ 31 марта n+1-го года.

При этом, учитывая, что водохранилище Токтогульской ГЭС - многолетнее, а рассматриваемый период – 1 год, дополнительным условием планирования режима было установлено равенство объемов водохранилища в начале и конце года:

$$W_{в-ца}^{нач} = W_{в-ца}^{кон}$$

Общая модель состоит из 2 блоков:

Блок 1 - прогноз стока.

Блок 2 - расчет интегральных кривых стока

Входные данные и результаты модели Токтогульской ГЭС в виде электронной таблице Excel показан в окне № 2, а их графическое представление на рис. 11.

Математическая модель регулирования режима стока для  
Токтогульской ГЭС на реке Нарын

Окно № 2

<b>Исходные данные</b>												
<b>ГОД</b>	<b>2007</b>										<b>2008</b>	
<b>месяц</b>	апрель	май	июнь	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь	январь	февраль	март
Средне месячный расход, м <sup>3</sup> /сек	464	679	742	672	498	323	242	161	158	108	92	187
Месячный объем стока, км <sup>3</sup>	1203	1818	1922	1801	1333	837	648	417	424	290	231	500
Накопленный объем стока	1203	3021	4943	6744	8077	8914	9562	9979	10403	10693	10924	11424
<b>Результаты</b>												
Дата прогноза		Гидрограф (кривая наполненного водохранилища), млн. м <sup>3</sup>										
		1.04	1.05	1.09	1.04							
1-го мая		0	1203	11092	15198							
1-го июня		0	1203	10183	14068							
1-го июля		0	1203	8747	12282							
1-го августа		0	1203	8210	11614							
1-го сентября		0	1203	8080	11453							
1-го октября		0	1203	8135	11521							
1-го ноября		0	1203	8194	11595							
1-го декабря		0	1203	8145	11534							
1-го января		0	1203	8157	11548							
1-го февраля		0	1203	8085	11459							
1-го марта		0	1203	7993	11345							
1-го апреля		0	1203	8077	11424							

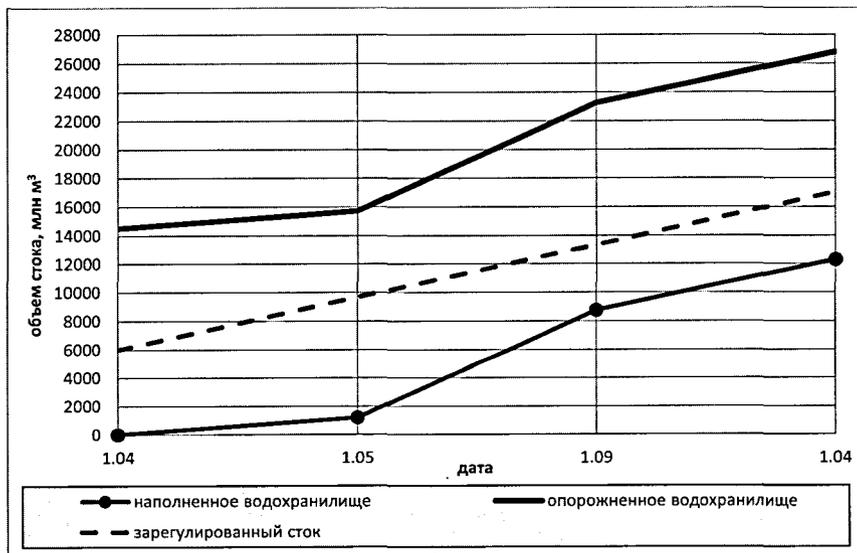


Рис. 11. Модель сезонного регулирования стока Токтогульской ГЭС. 2007-2008 г.

Показанная на рис. 11 одна из возможных кривых зарегулированного стока Токтогульского водохранилища, с объемом его использования, равным среднегодовой приточности р. Нарын –  $11.4 \text{ км}^3$  является только примером. Можно видеть, что большой полезный объем Токтогульского водохранилища -  $14.5 \text{ км}^3$  позволяет не только полностью выровнять его использование в отдельных годах, но также и в многолетнем периоде. Поэтому, в отличие от Нурекской ГЭС, где оптимальный режим заключается в полном использовании годового стока, оптимизация режимов работы Токтогульской ГЭС может заключаться только к максимизации многолетней выработки электроэнергии при определенных ограничениях на ее неравномерность и в ограничениях на глубину сработки водохранилища в интересах ирригации.

Модель такого многолетнего регулирования стока Токтогульского гидроузла в интересах ирригации и гидроэнергетики представлена ниже. При этом решались две основные задачи:

- Стабильное и постоянное по годам энергоснабжение потребителей с возможной максимизацией суммарной выработки электроэнергии,
- Сохранение необходимого объема водохранилища для для гарантированного водообеспечения ирригации в маловодный период.

В модели исследуется уже прошедший период времени 1991÷2007 гг, то есть она имеет ретроспективный характер. Это позволяет дать объективную оценку фактической работы гидроузла и разработать предложения по ее оптимизации на перспективу.

Объем воды в водохранилище в любом году «n» определяется по балансовому уравнению:

$$W_n^{\text{кон}} = W_n^{\text{нач}} + W_n^{\text{приток}} - W_n^{\text{попуск}}$$

Притоки воды в водохранилище,  $W_n^{\text{приток}}$  принимаются равными фактическим их значениям, попуски на нужды гидроэнергетики и ирригации – независимыми изменяемыми переменными в исследованиях. Последние ограничиваются только допустимыми расходами через ГЭС (холостые сбросы исключаются):

$$0 \leq Q^{\text{попуск}} = Q^{\text{ГЭС}} \leq Q_{\text{max}}$$

где:

$Q_{\text{max}} = f(H, Q^{\text{ГЭС}})$  – максимально допустимые по условиям кавитации и пропускной способности значения расходов воды через ГЭС.

Отметки верхнего и нижнего бьефов рассчитываются так же, как в модели Нурека по полученным экспериментальным путем зависимостям:

$$H_{\text{в.б}} = f(W_{\text{в-ща}})$$

$$H_{\text{н.б}} = f(Q^{\text{попуск}})$$

Выработка электроэнергии рассчитывается также по экспериментально полученной формуле:

$$\mathcal{E}_n = q(H) \times W_n^{\text{попуск}}$$

где:

$q$  – удельный расход воды на выработку электроэнергии, функция напора

В общем виде критериями модели многолетнего регулирования стока Токтогульского гидроузла являются:

- Максимизация запасов воды в водохранилище для гарантированного водообеспечения ирригации в многолетний период:

$$W_{\text{min}} = f(W_{\text{в-ща}}, H; Q) \rightarrow \max$$

- Максимизация суммарной выработки электроэнергии за весь период:

$$\sum \mathcal{E} = f(W_{\text{в-ща}}, H; Q) \rightarrow \max$$

- Минимизации сработки водохранилища в целях повышений кпд, ГЭС и обеспечения требований ирригации

$$\Delta W = f(W_{\text{в-ща}}, H; Q) \rightarrow \min$$

- Минимизации неравномерности выработки электроэнергии по годам исследуемого периода:

$$\Delta \mathcal{E}_n = f(W_{\text{в-ща}}; H; Q) \rightarrow \min$$

Были выполнены несколько вариантов расчетов для:

- Максимизации общей выработки электроэнергии, без ограничений на ее изменчивость по годам,
- Максимизации общей выработки электроэнергии при ограничении ее годовой выработки диапазоном: 5500-6800 млн. кВт.ч./год
- Максимизации выработки электроэнергии при ограничении ее годовой выработки диапазоном 5350-5550 ТВт.ч /год
- Максимизации выработки электроэнергии при ее полном, 100-% выравнивании по годам.

Кроме того, для сравнения, был рассчитан на модели вариант работы Токтогульского гидроузла при фактических попусках воды из водохранилища. Результаты всех этих вариантов показаны на рис. 12.

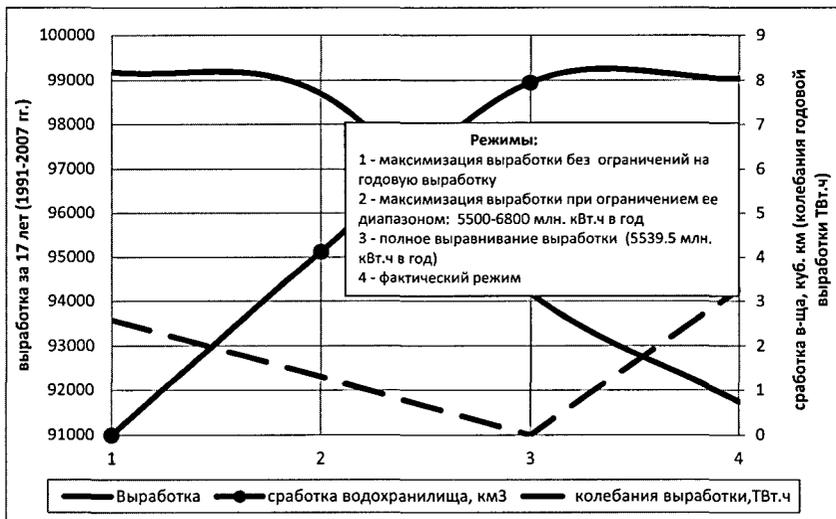


Рис. 12. Фактический и расчетные режимы работы Токтогульской ГЭС.

Видно, что максимальная выработка электроэнергии достигается при постоянной работе ГЭС с максимальным напором, то есть при НПУ водохранилища, и бытовом стоке. Но достигается такая максимизация за счет того, что годовые

выработки объемы электроэнергии для разных лет очень сильно отличаются друг от друга: от 4600 млн. кВтч. до 7200 млн. кВтч. То есть выработка электроэнергии в отдельные годы изменяется почти в 2 раза. Очевидно, что это не лучший вариант для республики, годовые потребности в электроэнергии в которой достаточно стабильны.

Далее, по мере увеличения годового выравнивания выработки электроэнергии одновременно увеличивается глубина сработки водохранилища.

При этом фактический режим работы Токтогульской ГЭС по своим результатам является самым худшим из всех возможных - весь рассматриваемый период Токтогульский гидроузел фактически работал в неоптимальном режиме, создавая искусственные проблемы с водообеспечением ирригационного сектора Узбекистана и Казахстана, и при этом не получая для себя каких-либо выгод. Даже, наоборот, при сработанном водохранилище удельная выработка электростанции (в расчете на единицу объема воды), существенно уменьшалась.

Приведенный сравнительный анализ режимов показывает, что любая, даже не самая лучшая, стратегия работы Токтогульского гидроузла, разработанная с использованием предложенных математических моделей, являлась бы более эффективной по сравнению с фактическим режимом, как по выработке электроэнергии и ее равномерности в многолетнем периоде, так, и это самое главное, по глубине сработки запасов воды в водохранилище. Это позволяет использовать полученные результаты для перспективного планирования режима работы Токтогульского гидроузла.

По-видимому, самым оптимальным многолетним вариантом работы Токтогульского гидроузла является показанный на рис. 13 режим полного выравнивания выработки электроэнергии.

Рассматривая рис. 12 и 13, можно отметить один очень важный момент – для любых оптимальных с точки зрения Кыргызстана энергетических режимов работы Токтогульской ГЭС требуется очень небольшая сработка водохранилища, максимум 8 км<sup>3</sup>, при его полезном объеме 14.5 км<sup>3</sup>. Оставшийся объем – 6.5 км<sup>3</sup> для энергетики не нужен и он может быть использован для ирригации. Поэтому и в сегодняшних рыночных условиях, а не только во времена единой страны – СССР, Токтогульский гидроузел может осуществлять многолетнее ирригационное регулирование стока для стран нижнего течения без каких-либо потерь для собственной энергетики.

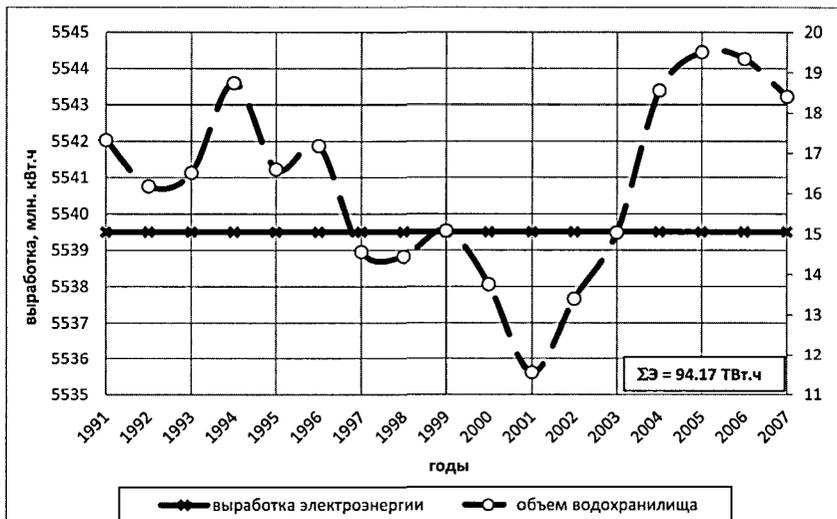


Рис. 12. Оптимальный режим работы Токтогульского гидроузла.

В разделе 3.3 разработана оптимизационная математическая модель работы гидроузла энергетического назначения.

В модели используются естественные начальные условия и ограничения, имеющие понятный физический смысл:

1. Начальные условия по объему водохранилища должны воспроизводиться к концу рассматриваемого в моделях периода.
2. Расходы воды через турбины ГЭС должны быть больше или равны нулю. (В качестве другого ограничения может быть принято условие, что общий расход через турбины и холостые сбросы в сумме не должны быть меньше принятых санитарных попусков).
3. Объем водохранилища в любой рассматриваемый период времени не должен быть меньше минимально возможного и больше максимально возможного.
4. Расходы воды через турбины ГЭС не должны быть больше максимально допустимых по условиям пропускной способности (для небольших напоров) и по условиям кавитации (для высоких напоров);

$$Q_{\text{ГЭС}} \leq Q_{\text{ГЭС}}^{\text{max}}$$

Модель разработана для персональных компьютеров, в рамках программ Excel Microsoft Office.

В окне №3 приведены результаты тестовых расчетов такой оптимизационной модели для Нурекской ГЭС. В этом варианте показан расчет выработки электроэнергии при фактически имевших место притоках к водохранилищу, расходах ГЭС и начальном объеме водохранилища. Сравнение расчетной в модели и фактической выработки на рис. 14 показывает их практическое совпадение, что говорит о надежности разработанной модели. Также на рис. 14 приведен оптимальный вариант работы Нурекской ГЭС, при котором полностью отсутствует зимний провал в выработке электроэнергии и несколько снижена летняя, излишняя.

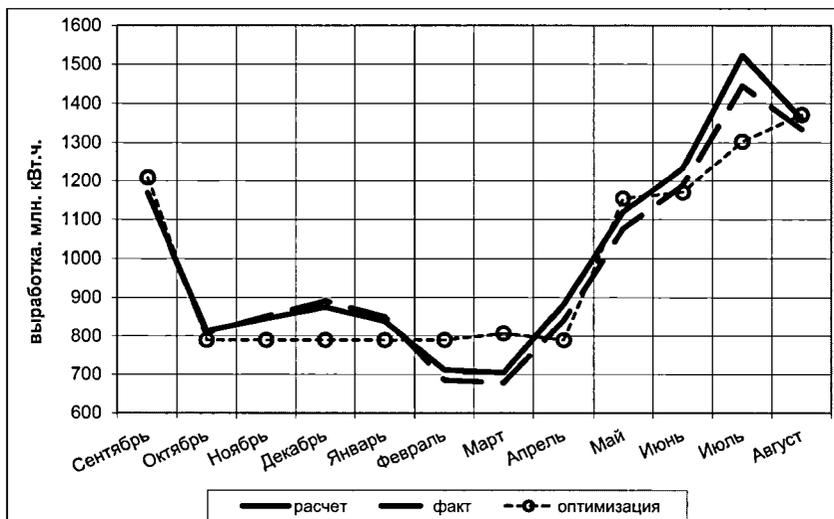


Рис. 14. Результаты модельных расчетов работы Нурекской ГЭС

Окно № 3. Модель оптимизация режима работы Нурекского водохранилища

Год	2003г.												2004г.														
	Месяц	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август	Сентябрь	Октябрь	Ноябрь	Декабрь	Январь	Февраль	Март	Апрель	Май	Июнь	Июль	Август		
Q <sub>спринок</sub>	718.97	321.23	321.23	248.20	225.68	181.35	148.55	278.74	591.33	936.55	1437.23	1502.42	1203.13	1.86	0.00	0.86	0.64	0.60	0.49	0.37	0.75	1.53	2.51	3.73	4.02	3.22	
W <sub>спринок</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Q <sub>насос</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
W <sub>насос</sub>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
S <sub>ккм<sup>3</sup></sub>	91.11	90.75	90.75	88.76	85.37	81.24	76.42	71.99	69.24	68.73	71.08	78.89	85.96	0.0554	0.0283	0.0283	0.0143	0.0066	0.0037	0.0066	0.0157	0.0314	0.0513	0.0736	0.0813	0.0782	
κ=Q/S	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	
W <sub>испарен.</sub>	719.73	486.55	486.55	534.23	552.35	550.06	496.83	474.77	626.50	765.42	832.93	939.42	817.03	1.87	1.30	1.30	1.38	1.48	1.47	1.24	1.27	1.62	2.05	2.16	2.52	2.19	
Q <sub>гэс</sub>	-0.02	-0.45	-0.45	-0.74	-0.88	-0.99	-0.87	-0.53	-0.10	0.45	1.55	1.49	1.02	-0.02	-0.45	-0.45	-0.74	-0.88	-0.99	-0.87	-0.53	-0.10	0.45	1.55	1.49	1.02	
W <sub>гидр.-W<sub>гэс</sub></sub>	10.58306	10.50	10.50	10.05	9.31	8.43	7.44	6.57	6.04	5.94	6.39	7.94	10.45	10.57	10.05	9.31	8.43	7.44	6.57	6.04	5.94	6.39	7.94	10.45	10.57		
W <sub>испол.проект.</sub>	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
W <sub>холост.</sub>	26.06094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	26.06094	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
W <sub>холост.расчетн.</sub>	10.50	10.05	10.05	9.31	8.43	7.44	6.57	6.04	5.94	6.39	7.94	9.43	10.45	10.54	10.28	9.68	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	8.87	
W <sub>гэс.расчетн.</sub>	10.54	10.28	10.28	9.68	8.87	7.93	7.00	6.30	5.99	6.17	7.17	8.69	9.94	910.9234	910	904.9418	896.3453	885.8797	873.6254	862.3892	855.4181	854.1231	860.0792	879.912	897.8434		
Н <sub>нач.в.б.</sub>	910.4621	907.4833	907.4833	900.6776	891.1597	879.8126	868.0542	858.9208	854.7712	857.1135	870.1436	889.0142	903.705	646.58	645.62	645.62	645.82	645.89	645.89	645.66	645.57	646.18	646.64	646.84	647.11	646.80	
Н <sub>к.б.</sub>	261.81	260.44	260.44	253.34	243.70	232.37	220.95	211.95	206.83	208.23	220.77	238.84	254.45	261.81	260.44	260.44	253.34	243.70	232.37	220.95	211.95	206.83	208.23	220.77	238.84	254.45	
Q <sub>8.1ч</sub>	8.619644	8.628836	8.628836	8.676583	8.741319	8.817474	8.89423	8.954686	8.989091	8.979735	8.895436	8.774003	8.669124	8.619644	8.628836	8.628836	8.676583	8.741319	8.817474	8.89423	8.954686	8.989091	8.979735	8.895436	8.774003	8.669124	
Q <sub>насос.</sub>	1354.27	1360.76	1360.76	1398.20	1446.73	1480.55	1476.78	1447.80	1423.95	1430.80	1476.41	1465.32	1392.17	1354.27	1360.76	1360.76	1398.20	1446.73	1480.55	1476.78	1447.80	1423.95	1430.80	1476.41	1465.32	1392.17	
Э	1169.45	813.51	813.51	845.50	875.45	838.52	679.54	670.42	670.42	1064.80	1177.74	1454.66	1340.87	1169.45	813.51	813.51	845.50	875.45	838.52	679.54	670.42	670.42	1064.80	1177.74	1454.66	1340.87	
Сумма Э	1169.45	1982.96	1982.96	2828.45	3703.90	4542.42	5221.96	5892.39	6731.05	7795.86	8973.60	10438.26	11779.13	1169.45	1982.96	1982.96	2828.45	3703.90	4542.42	5221.96	5892.39	6731.05	7795.86	8973.60	10438.26	11779.13	

В разделе 3.4 разработана математическая модель оптимизации работы гидроузла комплексного, ирригационно-энергетического назначения. С ее помощью решена задача определения потерь, которые имеет Кайракумская ГЭС на р. Сырдарья при переходе от национального энергетического режима, к региональному ирригационному. Для этого рассмотрены два варианта работы Кайракумской ГЭС – энергетический, с критерием максимизации выработки электроэнергии в зимний период и ирригационный, обеспечивающий фактические потребности стран нижнего течения в воде в вегетационный период.

Алгоритмы расчетов при этом такие же, как для модели оптимизации Нуракской ГЭС. Задачами модельных расчетов режимов работы Кайракумского гидроузла являлись:

- Определение расчетных параметров режима работы для ирригационного и энергетического режимов – выработки электроэнергии и ирригационных попусков,
- Расчет объемов услуг и компенсаций при переходе от энергетического к ирригационному режиму.

Результаты этих расчетов на рис. 15, показывают, что при переходе от национального энергетического режима к региональному ирригационному, выработка Кайракумской ГЭС в период октябрь – апрель снижается на:

$$676.56 - 447.98 = 218.58 \text{ млн. кВт.ч}$$

Но при этом Кайракумская ГЭС оказывает услуги по поставке воды странам нижнего течения реки в объеме 4796,93 млн. м<sup>3</sup>.

При национальном, энергетическом режиме работы Кайракумского гидроузла<sup>1</sup>, выработка электроэнергии на ГЭС в самый тяжелый для него зимний период равна 752,25 млн. кВт.ч, что почти в полтора (в 1,44) раза больше, чем при ирригационном режиме (523,27 млн. кВт.ч.). Но при этом подача воды на орошение в вегетационный период (июль-август) при ирригационном режиме (4946 млн. м<sup>3</sup>) более чем в тридцать раз больше, чем при энергетическом режиме работы гидроузла (149,07 млн. м<sup>3</sup>).

Разница между этими объемами, то есть объем услуг по регулированию стока Кайракумской ГЭС составляет:

$$4946,0 - 149,07 = 4796,93 \text{ млн. м}^3,$$

что в 2 раза больше полезного объема Кайракумского водохранилища, равного:

$$2480 \text{ млн. м}^3$$

---

<sup>1</sup> Критерием оптимизации работы Кайракумского гидроузла в национальном энергетическом режиме является максимизация выработки электроэнергии в период октябрь-май, без каких-либо дополнительных условий и ограничений на остальной период года.

Таким образом, применение математической модели оптимизации позволяет для гидроузла комплексного назначения рассчитать как оптимальный энергетический режим работы, так и объемы потерь и, соответственно, компенсаций, при переходе от энергетического к ирригационному режиму.

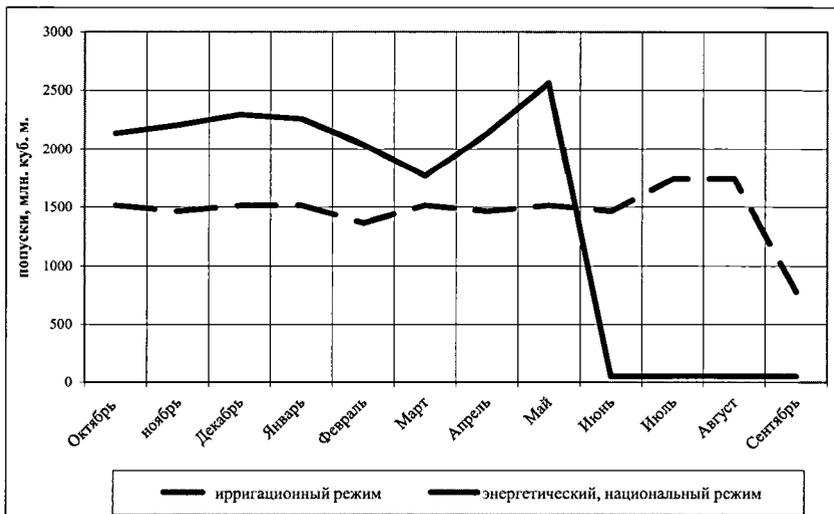


Рис. 15. Результаты модельных расчетов работы Кайраккумской ГЭС

В разделе 3.5 излагается метод мониторинга заилиения водохранилищ, базирующегося на ежесуточных измерениях фактических параметров его работы, осуществляемых службами эксплуатации гидроузлов:

- Расхода воды, пропускаемой через турбины ГЭС –  $Q_{\text{ств.}} \text{ м}^3/\text{сек.}$
- Холостых сбросов через гидроузел –  $Q_{\text{х. сб.}} \text{ м}^3/\text{сек.}$
- Притока воды к водохранилищу –  $Q_{\text{пр.}} \text{ м}^3/\text{сек.}$
- Отметки верхнего бьефа водохранилища –  $\nabla \text{ВБ. м.}$

При известных абсциссах кривой связи объема водохранилища с уровнем его ординаты рассчитываются непосредственно по балансовым уравнениям:

$$W(H_{i+1}) = W(H_i) + W_{\text{акк.}} f(\Delta H),$$

где  $W_{\text{акк.}} = f(\Delta H) = \{Q_{\text{пр.}} - (Q_{\text{ств.}} + Q_{\text{х. сб.}} + Q_{\text{исп.}})\} \times t$

$\Delta H = H_{i+1} - H_i$  – отметки верхнего бьефа в дни «i» и «i+1»

$$t = 1 \text{ месяц} = n \times 24 \times 3600 \text{ секунд}$$

$n$  – количество дней в месяце

Для построения по этим координатам самой кривой связи необходимо выбрать начальную точку:  $W_0$ ;  $H_0$ . В качестве базовой для всех дальнейших расчетов были приняты начальные координаты:

$$W_0 = 10.5 \text{ км}^3; H_0 = 910 \text{ м.},$$

соответствующие проектному состоянию водохранилища. Это геометрически означает параллельный перенос фактических кривых объема водохранилища в одно общее начало и позволяет их наглядно сравнивать. Понятно, что такие расчеты можно сделать только в диапазоне реально имеющих место в эксплуатации колебаний уровня водохранилища, то есть такой анализ возможен только для полезного объема водохранилища.

Применение метода показано для водохранилища Нурекской ГЭС (рис. 16). Расчеты проводились как для ежесуточных данных, так и для среднемесячных. Видно, что они практически идентичны. Можно отметить также достаточно высокую точность построенных аналитическим способом кривых – значение коэффициента детерминации  $R^2$  для них находится в диапазоне  $0,997 \div 0,998$

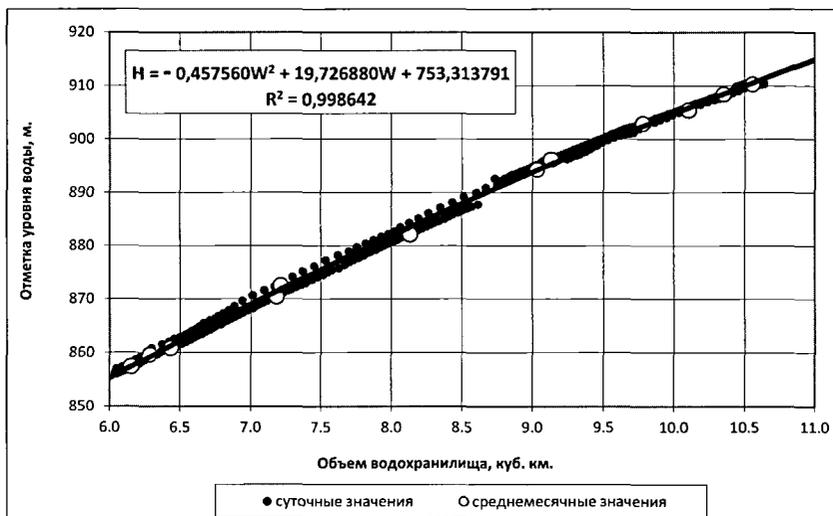


Рис. 16. Зависимость  $H = f(W)$  Расчет 2004 г.

## Глава 4. ЭКОНОМИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ СТРАТЕГИИ РАЗВИТИЯ ГИДРОЭНЕРГЕТИКИ

Глава 4 посвящена вопросам разработки стратегии экономического развития гидроэнергетики.

В разделе 4.1 обсуждаются общие вопросы определения экономической эффективности строительства ГЭС и ТЭС. Оценивается влияние на эффективность объектов энергетики таких факторов как норма дисконта и инфляция.

В разделе 4.2 решается задача выбора оптимальной стратегии развития гидроэнергетики, обеспечивающей необходимый уровень ее развития при получении максимальной прибыли. Для ее решения выведены соответствующие аналитические зависимости:

$$N_n = N_0 \prod_{i=0}^{i=(n-1)} \left( 1 + \frac{\alpha \text{Ч}(\beta^i \tau_0 - c)}{S} \right)$$

$$\sum U_n^{\text{э.с.}} = \sum_{i=0}^{i=(n-1)} \left( \alpha N_0 \text{Ч}(\beta^i \tau_0 - c) \prod_{i=0}^{i=(n-1)} \left( 1 + \frac{\alpha \text{Ч}(\beta^i \tau_0 - c)}{S} \right) \right)$$

$$\sum U_n^{\text{гос.}} = \sum_{i=0}^{i=(n-1)} \left( (1 - \alpha) N_0 \text{Ч}(\beta^i \tau_0 - c) \times \prod_{i=0}^{i=(n-1)} \left( 1 + \frac{\alpha \text{Ч}(\beta^i \tau_0 - c)}{S} \right) \right)$$

где:  $N_0$  и  $N_n$  – начальная и конечная установленная мощность энергосистемы, кВт.;

$\text{Ч}$  – число часов использования установленной мощности энергосистемы, часов в год;

$\tau_0$  – начальный тариф на электроэнергию, долл/кВт.ч.;

$c$  – себестоимость электроэнергии для энергосистемы, долл/кВт.ч.;

$\beta$  – ежегодный рост тарифов на электроэнергию;

$\alpha$  – доля общей прибыли, остающаяся в распоряжении энергосистемы и используемая на ее развитие.

Разработанная с использованием этих зависимостей математическая модель показана в окне № 4. Эта модель позволяет выполнять как имитационные, так и оптимизационные расчеты. В частности, с ее помощью решается задача оптимизации

налогообложения гидроэнергетики, обеспечивающая максимизации прибыли для государства (рис. 17).

### Математическая модель оптимизации развития гидроэнергетики

Окно № 4

Исходные данные				Результаты					
$N_0$	4400	МВт		ГОД	5	10	15	20	25
$\tau$	4000	час/год	$N_t$	4561	4905	5595	7005	10155	18475
$\tau_0$	1	цент/кВт.ч	$U_{\text{Гос}}$	423	1216	2801	6083	13608	34413
$c$	0.5	цент/кВт.ч	$T_t$	1.61	2.59	4.18	6.73	10.83	17.45
$\beta$	1.1	б/р	<b>N - МВт</b> <b>U - млн. долл.</b> <b>ц - цент/кВт.ч.</b>						
$S$	2000	долл/кВт							
$\alpha$	0.5	б/р							

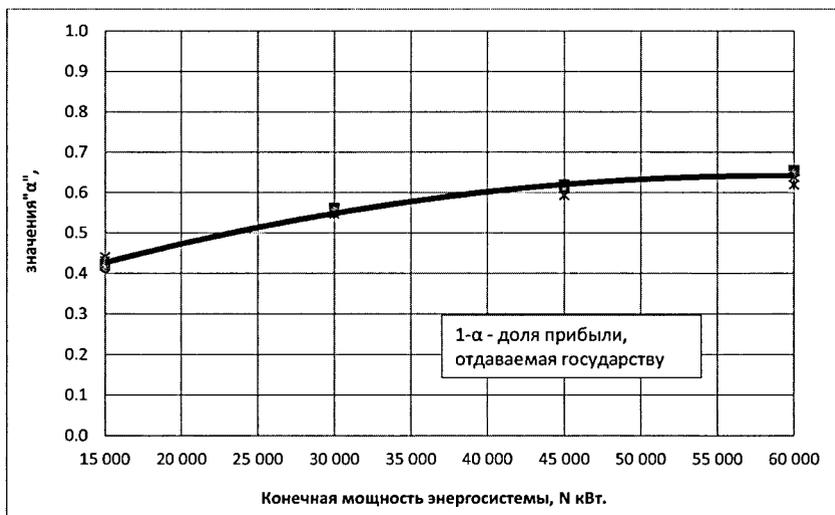


Рис. 17. Оптимальные значения "α" при развитии энергосистемы до мощности N кВт.

В разделе 4.5 получены общие критерии экономической эффективности развития гидроэнергетики:

$$\frac{c \times (\tau - c)}{S} = \frac{N_{\text{э.с}}^{\text{год}}}{N_{\text{сист}}} \geq \frac{(1 - q^{t_2})}{t_2 \times (q^{t_2} - q^{t_1})}$$

$$\frac{c \times t_2 \times (\tau - c)}{S} = \frac{N_{\text{э.с}}^{\text{общ}}}{N_{\text{сист}}} \geq \frac{(1 - q^{t_2})}{(q^{t_2} - q^{t_1})}$$

где:  $q$  - коэффициент дисконтирования;  $t$  – эффективный (после вычета налогов) тариф на электроэнергию;  $c$  – себестоимость электроэнергии;  $Ч$  – число часов использования установленной мощности электростанций в год;  $N_{э,с}^{год}$  - максимальная мощность электростанций, которую можно вводить в строй ежегодно за счет собственной прибыли энергосистемы;  $N_{сист}$  - общая мощность всей существующей энергосистемы;  $N_{э,с}^{общ}$  - общая мощность строящихся электростанций.

## **Глава 5. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ РЕСУРСОВ ТРАНСГРАНИЧНЫХ РЕК ДЛЯ ОПТИМАЛЬНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ВОДНЫХ РЕСУРСОВ**

В главе 5 обсуждаются вопросы совместного использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии, существующие проблемы и предлагаются пути их решения.

В разделе 5.1 дается оценка существующей ситуации в ирригации и гидроэнергетике стран Центральной Азии. Показано, что гидроэнергетика еще только начинает развиваться, в то время как ирригация уже полностью исчерпала потенциал своего развития, и дальнейший рост орошаемых площадей в регионе возможен только за счет внешних источников водообеспечения.

В разделе 5.2 анализируются причины и сущность конфликта между гидроэнергетикой стран верхнего и ирригацией стран нижнего течения. Показана история его возникновения и развития и меры, принимаемые странами региона для его разрешения.

Конфликт между гидроэнергетикой и ирригацией связан с тем, что они требуют разных режимов регулирования водного стока. Гидроэнергетика заинтересована в накоплении воды летом и использовании ее зимой, в самый холодный, энергодефицитный период, ирригация, наоборот, в накоплении воды зимой и использовании ее в летний, вегетационный период.

Отмечено, что конфликт между гидроэнергетикой и ирригацией в Центральной Азии все последнее время усиливается и приобретает кризисную форму. Он рассматривается на уровне Правительств стран региона и международных организаций.

В разделе 5.3 рассматриваются вопросы международного права и национального законодательства стран Центральной Азии в области использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Отмечено, что сегодня Международное водное право в основном состоит из заключаемых между странами договоров, и оно еще только развивается.

Предложено определение трансграничной реки, уточняющее его в соответствии с конкретной ситуацией в Центральной Азии: *«трансграничной, называется река, которая имеет гидравлическую связь с реками и водными объектами на территории других государств, и поэтому хозяйственная деятельность на ней одного из государств может оказать определенное влияние на расположенные в других государствах водные ресурсы».*

Также сформулирован рабочий принцип, определяющий права государств на использование водноэнергетических ресурсов и их взаимоотношения друг с другом: *«суверенное государство обладает всеми правами по безусловному установлению на принадлежащих ему и расположенных на его территории водохранилищах любых, соответствующих его национальным интересам, режимов регулирования речного стока.*

*В случае если эти режимы затрагивают или противоречат интересам других государств бассейна, государство, использующее имеющиеся на своей территории водные ресурсы, должно сделать все возможное, чтобы изменить режимы работы своих гидроузлов в пользу этих заинтересованных государств, с предоставлением ему с их стороны компенсаций возникающих при этом потерь и ущербов».*

В разделе 5.4 обсуждаются пути решения проблемы совместного использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек в интересах гидроэнергетики и ирригации. Анализируются различные подходы к решению проблемы совместного использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек.

Показано, что эффективные решения проблемы взаимоотношения гидроэнергетики и ирригации, учитывающие в полной мере их взаимные интересы, возможны за счет расширения сферы охвата проблемы и частичного выхода за границы этих отраслей.

Одно из таких решений связано с развитием самой гидроэнергетики, строительством, в дополнение к уже действующим, новых крупных гидроузлов с регулирующими водохранилищами. Существующий сегодня конфликт интересов между гидроэнергетикой и ирригацией связан не столько с присущими им свойствами, сколько с тем, что сегодня в каждом из двух основных речных бассейнов в зоне формирования стока имеется только по одному крупному регулирующему водохранилищу. В бассейне реки Сырдарья это Токтогульское, в бассейне реки Амударья – Нурекское. Они не могут работать одновременно в ирригационном и энергетическом режимах, что и является причиной конфликта. Строительство других

гидроузлов даст возможность верхним из них работать в энергетическом режиме, нижние же будут перерегулировать сток в интересах ирригации.

Решение проблемы противоречий между гидроэнергетикой и ирригацией возможно также за счет подключения к участникам процесса общей энергетики стран Центральной Азии. Анализ показывает, что общий объем вырабатываемой гидроэнергии безразличен к режимам стока, он один и тот же как при энергетическом, так и при ирригационном режиме работы водохранилищ. Проблема не в общем объеме вырабатываемой на ГЭС электроэнергии, а в ее распределении по сезонам года. При ирригационном режиме большая часть энергии вырабатывается в летний период, тогда как энергетический режим требует ее равномерной выработки, или даже большего производства электроэнергии в зимний, наиболее холодный период года. Поэтому, если решить проблему перераспределения сезонных объемов вырабатываемой на ГЭС электроэнергии при сохранении ее общей годовой выработки, то одновременно будет решена и проблема взаимоотношения между гидроэнергетикой и ирригацией. И общая энергетика стран Центральной Азии, при существующих между ними связях в виде Объединенной Энергетической Системы, созданной еще в советский период, вполне может обеспечить такие сезонные перетоки энергии между гидроэнергетикой и тепловой энергетикой региона. Это вполне возможно, так как гидроэнергетика составляет только порядка 20% общей энергетики, остальная часть представлена тепловыми станциями. В этом варианте страны-потребители воды должны компенсировать странам, регулирующим сток в интересах ирригации, потерянный объем зимней выработки электроэнергии, получая взамен такой же объем летней.

Задача решается путем сопоставительного расчета двух схем регулирования стока – национального энергетического для стран верхнего течения и национального ирригационного для стран нижнего течения. По разнице в выработке электроэнергии определяется объем компенсаций. Для расчета национального энергетического режима используется математическая модель оптимизации работы ГЭС, разработанная в 3-й главе. Национальный ирригационный режим определяется странами нижнего течения в соответствии с ценой воды.

Для расчета стоимости этих компенсаций предложена методика расчета цены воды в эквиваленте электроэнергии.

За стоимость воды при оказании услуг по регулированию речного стока можно принять объем лишней для страны производителя электроэнергии, вырабатываемой на той или иной ГЭС при подаче воды в вегетацию для стран нижнего

течения. При этом стоимость воды является обратной величиной удельного ее расхода на выработку одного киловатт-часа электроэнергии:

$$q = \frac{W}{\xi} = \frac{Q \cdot t}{9.81 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \cdot T} = \frac{Q \cdot 3600 \cdot T}{9.81 \cdot \eta \cdot Q \cdot H \cdot T} \approx \frac{450}{H}, \quad \text{м}^3/\text{кВт.ч.}$$

В качестве примера в таблице 5 приведены параметры гидроузлов, а в таблице 6 удельные расходы воды для ГЭС и эквивалентная стоимость воды для бассейна р. Сырдарья.

Таблица 5. Основные параметры регулирующих гидроузлов в зоне формирования стока бассейна реки Сырдарья

	Гидроузел	полный объем W, км <sup>3</sup>	полезный объем W, км <sup>3</sup>	напор, W, м	Мощность, МВт
1	Токтогульский	19,5	14	183	1200
2	Андижанский	1,9	1,75	95	140
3	Кайраккумский	3,4	2,48	24	126

Таблица 6. Удельные расходы воды на выработку электроэнергии ГЭС зоны формирования стока бассейна реки Сырдарья

Гидроузел	Токтогульская	Андижанская	Кайраккумская
q, м <sup>3</sup> /кВт.ч.	2,46	4,74	18,75
Эквивалентная стоимость воды, P, кВт.ч/100 м <sup>3</sup>	40,65	21,01	5,33

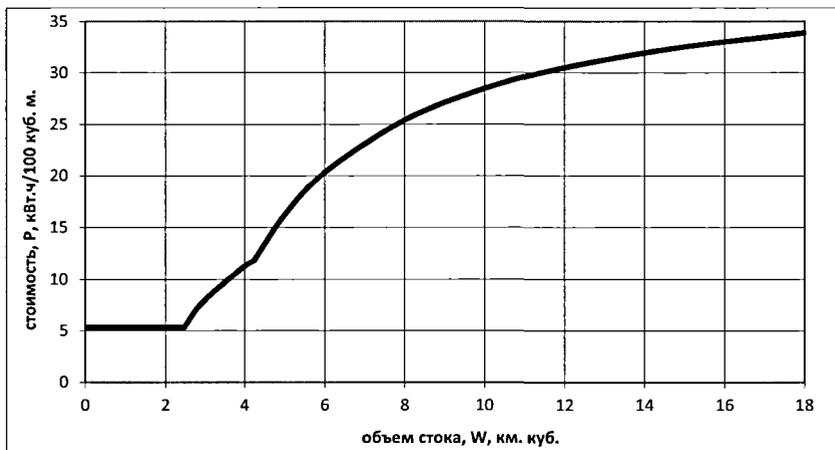


Рис. 18. Стоимость регулирования стока в бассейне р. Сырдарья

По этим данным на рис. 18 построена кривая предложения на воду, то есть график зависимости средней цены воды (в эквиваленте электроэнергии), как функции общего объема ее потребления.

Этот график построен для наиболее оптимальной схемы разделения функций регулирования стока между имеющимися водохранилищами, при которой сначала используются все возможности наиболее дешевого Кайраккумского водохранилища, затем подключается Андижанское и, наконец, самое дорогое – Токтогульское. Причем последнее используется только если ресурсы первых двух становятся недостаточными. Это существенно удешевляет общую стоимость услуг.

К сожалению, сегодня на практике реализуется обратная схема. Сначала задействуется Токтогульское водохранилище и только в последнюю очередь Кайраккумское. В результате стоимость оплачиваемых услуг по регулированию стока значительно возрастает.

## **Заключение**

Основные научные и практические результаты, полученные автором при выполнении диссертационной работы, заключаются в следующем:

1. Разработаны оптимизационные и имитационные математические модели регулирования стока и работы гидроузлов, в том числе в каскаде. Их использование позволяет решать целый ряд практических задач, как национального, так и регионального уровня. Показано, что использование моделей для оптимизации работы Нурекского и Токтогульского гидроузлов повышает эффективность регулирования стока и при обеспечении требований ирригации увеличивает выработку гидроэнергии на 5-15%.
2. Исследованы варианты межгосударственных взаимоотношений между гидроэнергетикой и ирригацией при совместном использовании водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Установлено, что в современных условиях наиболее целесообразным из них является метод услуг и компенсаций. Для его практической реализации разработан метод определения стоимости воды, позволяющий минимизировать общую стоимость услуг при каскадном регулировании стока.
3. Выполнен анализ мирового права и опыта в области использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Показано, что оптимальные решения проблемы конфликта между гидроэнергетикой и ирригацией могут быть

найлены при более широком рассмотрении вопроса, за счет выхода за границы этих двух существующих отраслей. Одно из таких решений связано со строительством новых гидроузлов комплексного ирригационно-энергетического назначения. Другим решением является расширение состава участников, включение в его круг также общей энергетики региона, на 80% состоящей из тепловых электростанций. В этом случае возможно соблюдение интересов, как гидроэнергетики, так и ирригации за счет простых сезонных перетоков электроэнергии, без каких-либо потерь с той или другой стороны.

4. Предложен метод оперативного прогноза водного стока и разработана математическая модель для его практического использования. Основанный на фактических гидрологических замерах, он позволяет с помощью водохранилищ оптимизировать режим водного стока, как с точки зрения летних пусков для ирригации, так и для выработки электроэнергии ГЭС в зимний, наиболее дефицитный период.
5. Разработан практический метод постоянного мониторинга динамики изменения полезного объема водохранилищ с учетом факторов заиления и переработки берегов.
6. Обоснован выбор эффективной стратегии каскадного освоения водно-энергетических ресурсов, обеспечивающей решение комплексных задач хозяйственного использования водных ресурсов - регулирования стока в интересах ирригации и гидроэнергетики с учетом экономической эффективности и экологической безопасности.

#### **Список работ по теме диссертации**

*(публикации в изданиях, рекомендованных ВАКом)*

1. Башмаков В. М., Сирожев Б. С., Петров Г. Н. Повышение эффективности работы каскада Вахшских ГЭС за счет использования части стока р. Пяндж. Гидротехническое строительство, 1995г. №12, с. 5-12.
2. Петров Г. Н. Некоторые вопросы оценки эффективности энергетического комплекса. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 1999г. №2, с.32-39.
3. Петров Г. Н. Правовой режим водохранилищ комплексного назначения на трансграничных реках. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 1999г. №3, 98-106.

4. Петров Г. Н. Сравнительные методы учета эффективности применительно к энергетическому комплексу Таджикистана. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 2000г. №1, с. 71-79.
5. Петров Г. Н., Наврузов С. Т. Применение теории игр к задачам управления водных ресурсов речного бассейна. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 2000г. №4, с. 86-101.
6. Петров Г. Н., Ботиров С. Х., Шерматов Н. К вопросу об оптимизации режима работы гидроэнергоузлов с водохранилищами. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Т. XLVI. №11-12 «ДОНИШ», 2003г, с. 52-57.
7. Петров Г. Н. Всемирная торговая организация (ВТО) и устойчивое рациональное использование энергетических ресурсов республики Таджикистан. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 2004г. №2, с. 125-142.
8. Азим Иброхим., Петров Г. Н., Леонидова Н. В. Промышленное использование малой гидроэнергетики в Таджикистане. Горный журнал. Специальный выпуск. Москва, 2004г, с. 40-43.
9. Петров Г. Н., Халиков Ш. Х. К вопросу о развитии гидроэнергетики Таджикистана. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, № 3, 2006 г, с. 97-117.
10. Мухиддинов П. М., Petrov G., Радченко В. Г. Гидроэнергетика Таджикистана и перспективы ее развития. Гидротехническое строительство, 2007г. №4, с. 48-54.
11. Петров Г. Н., Халиков Х. Математические критерии экономической эффективности развития энергосистем. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе, 2007г., Том 50, №3, с. 225-231.
12. Петров Г. Н., Курбанов А. Оперативный прогноз стока реки Вахш для оптимизации режимов работы Нурекского гидроузла. Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-мат., хим. и геологических наук. 2007г. № 4(129), с. 73-81.
13. Петров Г. Н. Долгосрочный прогноз водного стока реки Вахш. Доклады Академии Наук Республики. Таджикистан. Душанбе, 2007 г., Том 50, № 6, с. 539-545.
14. Петров Г. Н., Халиков Ш. Х. Экономические отношения в странах Центральной Азии в сфере использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек. Экономика Таджикистана: стратегия развития. Душанбе, 2007г. №4, с. 140-152.

15. Петров Г. Н. Изменчивость и прогноз водного стока крупных рек бассейна Аральского моря. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе, 2008г., Том 51, №4, с. 290-294.
16. Петров Г. Н. Исследование процессов заиления Нурекского водохранилища на р. Вахш. Гидротехническое строительство. Москва, № 10, 2008 г, с. 11-15.
17. Петров Г. Н. О безопасности земляных плотин в Таджикистане. Известия ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева. С-Петербург, 2009 г. т. 253, с. 111-115, с. 111-115.
18. Петров Г. Н. Комплексное многолетнее регулирование стока трансграничных рек в интересах гидроэнергетики и ирригации. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе, 2009г., Том 52, №1, с. 53-58.
19. Петров Г. Н., Ахмедов Х. М., Кабутов К., Каримов Х. С. Ресурсы ВИЭ в Таджикистане. Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отд. физ-мех, хим, геол. и технических наук, №3 (136), 2009 г, с. 82-91.
20. Петров Г. Н., Ахмедов Х. М., Кабутов К., Каримов Х. С. Возможности использования возобновляемых источников энергии в Таджикистане. Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отд. физ-мех, хим, геол. и технических наук, №4 (137), 2009 г, с. 53-58.
21. Петров Г. Н., Халиков Х. Х. Энергоэффективность крупных рек Таджикистана. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе, 2009г., Том 52, №8, с. 639-645.
22. Петров Г. Н., Норматов И. Ш. Конфликт интересов водопользователей в Центрально-Азиатском регионе и возможности его разрешения. Водные ресурсы, Москва, том 37, № 1, Январь-Февраль 2010, С. 113-122, с. 113-120.
23. Петров Г. Н., Ахмедов Х. М. Малая гидроэнергетика Таджикистана. Гидротехническое строительство, №12, 2010 г, с. 49-55.
24. Петров Г. Н. Прогноз гидрографа годового стока р. Вахш. Доклады Академии Наук Республики Таджикистан. Душанбе, 2010г., Том 53, №8, с. 645-651.
25. Петров Г. Н., Ахмедов Х. М. Эффективность водохранилища Даштиджумской ГЭС на р. Пяндж для защиты от паводков и наводнений. Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отд. физ-мех, хим, геол. и технических наук, №4 (141), 2010 г, с. 110-114.
26. Петров Г. Н. Ахмедов Х. М. Развитие гидроэнергетики и защита окружающей среды. Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отд. физ-мех, хим, геол. и технических наук, №2 (143), 2011 г.

27. Петров Г. Н. Водные ресурсы Центральной Азии и их использование в интересах гидроэнергетики и ирригации. Гидротехническое строительство, №6, 2012

### **Стратегия ООН для Центральной Азии**

28. Strengthening Cooperation for Rational and Efficient use of Water and Energy resources in Central Asia. Special Programme for the Economies of Central Asia. Project ECE/ESCAP. New York, 2004. (Petrov G. and others), 106 p.

### **Монографии**

29. Авазав Т. А., Петров Г. Н. Об ва Энергия Мавкеи Тоҷикистон дар таксими захираҳои оби Осӣи Маркази. Бунёди байналмилалӣ наҷоти Арал Душанбе. 2003г. 100 С.
30. Normatov I. Sh., Aliev I. S., Akhmedov Kh. M., Karimov Kh. Kh., Petrov G. Water resources of Tajikistan. SLR «Omu», Academy of Sciences of the Republic of Tajikistan. Dushanbe. 2003г. 112 p.
31. Kholmatov A., Busurukov J., Pulatov Y., Petrov G., Ratushenko G. Water for Life. Dushanbe International Fresh Water Forum. 29 August-1 September 2003. 87 p.
32. Петров Г. Н. Проблемы использования водноэнергетических ресурсов трансграничных рек в Центральной Азии и пути их решения. Оптима, Душанбе, 2009 г. 48 С.
33. Петров Г. Н. Оптимизация режимов работы гидроузлов с водохранилищами. НПИЦ РТ, Душанбе, 2009 г. 138 С.
34. Петров Г. Н. Экономика гидроэнергетики. Оптима, Душанбе, 2009 г. 132 С.
35. Петров Г. Н., Ахмедов Х. М. Комплексное использование водноэнергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии. Современное состояние, проблемы и пути их решения. ООО "Сапфир Компани" Душанбе, 2011 г. 234 С.
36. Петров Г. Н. Комплексное использование водных ресурсов трансграничных рек. Исследования, анализ, предложения. Lambert, Academic Publishing, 2011 г. 380 С.

*(публикации в других изданиях)*

### **Статьи**

37. Petrov G. Addressing the Problem of Tajikistan Economic Development Strategy. Central Asia and the Caucasus. Journal of social and Political Studies. Sweden. 3 (39) 2006

38. Petrov G., Normatov I. Sh. Conflict of Interests between Water Users in the Central Asian Region and Possible Ways to Its Elimination. ISSN 00978078, Water Resources, 2010, Vol. 37, No. 1, pp. 113–120. © Pleiades Publishing, Ltd., 2010.
39. Petrov G. Conflict of Interests between Hydropower Engineering and Irrigation in Central Asia: Causes and Solutions. Central Asia and the Caucasus. Journal of Social and Political Studies. Volume 11, Issue 3. 2010
40. Петров Г. Н. Экологические аспекты развития энергетики Таджикистана. Фонус. Душанбе, 2002г. №4
41. Матеев У. А., Петров Г. Н. Современные проблемы водноэнергетического комплекса бассейна Аральского моря и пути их решения. «Дарё», Художественно- публицистический журнал. Душанбе, №1. 2004г.
42. Норматов И. Ш., Петров Г. Н. Использование водных ресурсов Центральной Азии для ирригации и гидроэнергетики: конфликт интересов или взаимовыгодное сотрудничество. Водные ресурсы Центральной Азии. Региональный научно-практический журнал. Душанбе, т. II, №2, 2005г.
43. Петров Г. Н. Проблемы трансграничных рек выходят из берегов. Мировая энергетика, № 4(52) и 5(53), 2008г
44. Петров Г. Н. Совместное использование водноэнергетических ресурсов трансграничных рек Центральной Азии. Евразийская экономическая интеграция. Научно-аналитический журнал. ЕАБР, Алматы, №1, 2009
45. Петров Г. Н. Гидроэнергетика и ее роль в региональной интеграции стран Центральной Азии. Евразийская экономическая интеграция. Научно-аналитический журнал. ЕАБР, Алматы, №4, 2009
46. Матеев У. А., Петров Г. Н. Водные ресурсы Центральной Азии и их изменчивость. Энергия ва ресурс тежаш муаммолари. Тошкент, № 3-4, 2008
47. Петров Г. Н. Региональная интеграция и водно-энергетическая независимость. Евразийская экономическая интеграция. Научно-аналитический журнал. № 4(9), ноябрь 2010 г.

#### **Авторские свидетельства**

48. Петров Г. Н., Курбанов А. А. Оперативный прогноз водного стока реки Вахш. № 043 ТҶ 23.10.2007

49. Петров Г. Н., Халиков Ш. Х. Оптимизация схемы размещения и параметров плотин и водохранилищ при каскадном освоении речных водных ресурсов № 045 ТЖ 23.10.2007
50. Петров Г. Н., Халиков Ш. Х. Экономическая стоимость воды при регулировании стока трансграничных рек. № 047 ТЖ 23.10.2007
51. Петров Г. Н., Гулов Р. Р. Аналитический метод расчета полезного объема Нурекского водохранилища. 052ТЖ 11.12.2007
52. Петров Г. Н. Многолетняя изменчивость водного стока реки Вахш. 053ТЖ 11.12.2007
53. Петров Г. Н. Экономическая стоимость гидрологического прогноза для гидроэнергетики. 059ТЖ. 18.04.2008
54. Петров Г. Н., Мухиддинов П. М. Курбанов А. А. Гулов Р. Р. Оптимизация работы Нурекской ГЭС за счет внутригодового выравнивания стока и максимизации зимней выработки электроэнергии. 071ТЖ. 21.07.2008
55. Петров Г. Н., Курбанов А. А. Расчет боковой приточности к Нурекскому водохранилищу. № 049 ТЖ. 23.10.2007
56. Петров Г. Н., Халиков Х. Х. Энергоэффективность крупных рек Таджикистана. 089 ТЖ. 10.03.2009
57. Петров Г. Н., Сафаров М. Т. Джарнайева Г. Анализ изменчивости и прогноз водного стока реки Зеравшан с использованием метода быстрого преобразования Фурье (БПФ). 0200 ТЖ 07.01.2010
58. Петров Г. Н., Сафаров М. Т., Джарнайева Г. Мониторинг-прогноз водного стока реки Кафирниган. 0250 ТЖ 12.04.2010
59. Петров Г. Н., Сафаров М. Т. Влияние климатических факторов на изменчивость речного стока. 0260 ТЖ 17.05.2010

---

Заказ № 36-П/10/2012 Подписано в печать 10.10.2012 Тираж 150 экз. Усл. п.л.2,5

---



“Цифровичок”, тел. (495) 649-83-30  
*[www.cfr.ru](http://www.cfr.ru) ; e-mail: [info@cfr.ru](mailto:info@cfr.ru)*