

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«Сибирский государственный университет геосистем и технологий»
(СГУГиТ)

На правах рукописи

Кобелева Наталья Николаевна



Совершенствование методики построения по геодезическим данным
прогнозных математических моделей для изучения деформаций
гидротехнических сооружений

25.00.32 – Геодезия

Диссертация на соискание ученой степени кандидата
технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук, доцент
Хорошилов Валерий Степанович

Новосибирск – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ	11
1.1 Общие сведения о действии сил и перемещениях на плотинах гидроэлек- тростанций	11
1.2 Крупнейшие плотины мира	14
1.3 Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс	25
1.4 Основные показатели состояния и работы гидротехнических сооружений. Диагностические показатели на примере высоконапорной плотины Сая- но-Шушенской гидроэлектростанции	30
1.5 Разработка прогнозных математических моделей. Анализ существующих методов их построения	33
1.6 Обоснование точности измерительной информации	45
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНА- МИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ 1-ГО И 2-ГО ПОРЯДКОВ	50
2.1 Общие положения прогнозирования	50
2.2 Геодезические наблюдения за деформациями высоконапорных бетонных плотин как интегральная количественная форма объективной и точной информации о сложном взаимодействии сооружения с грунтовым осно- ванием и внешней средой	54
2.3 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных матема- тических моделей динамического типа на основе рекуррентного уравне- ния 1-го порядка	56
2.4 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных матема- тических моделей динамического типа на основе рекуррентного уравне- ния 2-го порядка	63

2.5 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе декорреляции входных воздействий	66
3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТОЧЕК СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕННЫХ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ.....	70
3.1 Прогнозные математические модели для этапов эксплуатации плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции на этапах эксплуатации 2004–2005, 2005–2007 и 2007–2009 гг.	70
3.2 Прогнозные математические модели для этапа эксплуатации плотины после аварии 2009 г.	76
3.3 Примеры построения математической модели 1-го порядка для двух входных воздействий с использованием возможностей для численных расчетов прикладной программы MS EXCEL	80
3.4 Методические решения при построении прогнозных математических моделей.....	83
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	93
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	94
ПРИЛОЖЕНИЕ А (обязательное) ИСХОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЕ Б (обязательное) ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМЕЩЕНИЯ	117
ПРИЛОЖЕНИЕ В (обязательное) ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НОРМАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ.....	119
ПРИЛОЖЕНИЕ Г (обязательное) ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ОШИБОК ε_k И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ.....	121
ПРИЛОЖЕНИЕ Д (обязательное) ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ.....	122

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. К настоящему времени в Российской Федерации возведено большое количество высоконапорных гидротехнических сооружений, к надежности которых (вследствие возможности катастрофических последствий при их разрушении) предъявляются повышенные требования. Анализ поведения подобных сооружений и их оснований в процессе эксплуатации по результатам проведенных натурных наблюдений выявил заметное отличие их реального состояния от расчетных значений, предполагаемых на стадии проектирования. Следует отметить, что заметно отличаются и сами нагрузки, существенно изменяющие эксплуатационные параметры сооружения.

Согласно принятой РАО «ЕЭС России» в 2001 г. «Методики определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [101] и положений Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» от 1997 г. [106] оценка эксплуатационного состояния гидротехнического сооружения и его безопасности должны производиться на основании сравнения измеренных количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями. Данные показатели, характеризующие критерии безопасности эксплуатации сооружения, должны быть рассчитаны на стадии проектирования и уточнены в процессе эксплуатации. Это достигается в результате разработки прогнозных математических моделей, построенных и откалиброванных по данным натурных наблюдений за поведением сооружения.

Одними из главных и незаменимых видов натурных наблюдений являются геодезические исследования гидротехнических сооружений [5, 26, 50–59, 131]. Они направлены на решение трех взаимосвязанных проблем: наблюдение за процессами перемещений точек сооружений, анализ результатов наблюдений и прогнозирование процессов перемещений наблюдаемых точек, что по существу, определяет современное толкование системы мониторинга сооружений.

Геодезические исследования в настоящее время развиваются и совершенствуются в большей степени в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и, особенно, прогнозированию уделяется в них недоста-

точное внимание. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования, можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек.

Степень разработанности темы. Значительный вклад в разработку математического аппарата для изучения по геодезическим данным протекающих в сооружениях процессов и деформаций земной коры внесли ученые: Брайт П. И., Гуляев Ю. П., Гридчин А. Н., Есиков Н. П., Михелев Д. Ш., Маркузе Ю. П., Мазуров Б. Т., Николаев С. А., Панкрушин В. К., Рязанцев Г. Е., Ardito R., Maier G., Mata J., Karimi I., Sani A. A., Jafari M., Li F., Wang Zh., Su H. и др.

В многогранном комплексе исследований по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений особое место занимают разработки ряда коллективов сотрудников: Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт имени Веденеева» (Александровская Э. К., Дурчева В. Н., Гордон Л. А., Костылев В. С., Орехов В. В. и др.); Акционерного общества «Ленгидропроект» имени Жука (Бронштейн В. И., Вульфович Н. А., Грошев М. Е., Савич А. И., Речицкий В. В.); Филиала Публичного акционерного общества «Федеральная гидрогенерирующая компания – Русгидро» – «Саяно-Шушенская ГЭС имени П. С. Непорожного» (СШГЭС) (Толошинов А. В., Александров Ю. И.).

К настоящему времени собран значительный объем данных натурных наблюдений за эксплуатируемыми гидротехническими сооружениями [18, 25–28, 31, 38]. При их обработке традиционно применяется регрессионный анализ, на основании которого могут быть выявлены закономерности и взаимозависимости в реакции контролируемых параметров сооружения на внешние воздействия. А выполненные ранее исследования в области разработки прогнозных математических моделей сводились, в основном, к описанию осадок сооружений различными функциями времени с использованием корреляционно-регрессионных моделей с

последующей экстраполяцией по ним прогнозов осадки; при этом прогнозировались, в основном, средние величины осадок и не оценивалась точность прогнозов. Отметим, что корректное применение подобных моделей применимо лишь в случаях, если при математической обработке данных натуральных наблюдений удастся выявить и учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции сооружения на воздействующие факторы.

По мере совершенствования численных методов анализа все большее внимание уделяется результатам, полученным с использованием расчетных математических моделей [10, 12–15, 29, 65]. В этом случае могут быть смоделированы различные нагрузки эксплуатационного периода, включая температурное воздействие внешней среды, учет сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды, в том числе и такие ведущие к необратимым изменениям составляющие, как пластичность, возникновение и продвижение трещин, необратимые перемещения плотины, реологические свойства основания [130, 131, 155, 171, 173] и др. С этой целью применяются различные методы математического моделирования для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований: на основе искусственных нейронных сетей в сочетании с гибридным методом конечных элементов; на основе динамического анализа состояния бетонных плотин в частотной области за счет изменения формы колебаний; путем решения дифференциальных уравнений для моделирования деформаций на основе данных единой системы объединенных датчиков; в результате использования теории нестационарных временных рядов для анализа структурных данных с использованием алгоритма максимизации ожидания для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей; использование совместного подхода технологии вейвлет-анализа для создания исходной модели данных о поведении плотины с последующим построением идентификационной модели, способной осуществлять связь между нагрузками и поведением плотины, и др.

Прогнозные модели, построенные на основе теории динамических систем, позволяют учитывать невыявленное инерционное запаздывание и более объективно выполнять прогнозирование величин деформации сооружения и оценивать

параметры математической модели. Значительный вклад в разработку методологических и теоретических положений для построения прогнозных моделей данного типа внес доктор технических наук, профессор Гуляев Ю. П. [42–46]

Цель и задачи исследований. Цель диссертационной работы заключается в совершенствовании методики построения прогнозных математических моделей динамического типа для изучения процесса деформаций гидротехнических сооружений на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков (на примере плотины СШГЭС).

Для реализации данной цели были поставлены следующие задачи:

– выполнить анализ и обосновать актуальность и новизну исследований; проанализировать существующие методы построения прогнозных математических моделей для изучения поведения гидротехнических сооружений;

– разработать обоснованную методику построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа для анализа перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– построить различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения перемещений высоконапорной плотины СШГЭС с различными входными воздействиями, дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием;

– выявить методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для анализа процесса перемещений;

– выполнить анализ построенных прогнозных моделей с целью выбора наиболее оптимальной (с точки зрения точности и простоты) прогнозной модели для описания процесса перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.

Объект и предмет исследования. Объектом настоящего исследования является деформационный процесс, протекающий в результате эксплуатации бетонной плотины СШГЭС за период наполнения и сработки водохранилища, представленный геодезическими данными о перемещении плотины.

Предметом исследования является методика построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения перемещений плотины СШГЭС в процессе наполнения и сработки водохранилища.

Научная новизна результатов исследований представлена решением при разработке методики следующих задач:

– разработана обоснованная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– выявлены методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (гидростатическое давление, температура в нижней и верхней базовых точках плотины и их комбинации), дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием;

– построены различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС;

– теоретическое обоснование и практический опыт построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков вносит существенный вклад в теорию и практику их конструирования, предложенную доктором технических наук, профессором Гуляевым Ю. П.

Теоретическая и практическая значимость работы. Теоретическая значимость заключается в разработке методики построения различных вариантов прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования поведения плотины СШГЭС.

Практическая значимость работы заключается в возможности выбора наиболее оптимального (с точки зрения точности и простоты) варианта математиче-

ской модели для прогнозирования процесса перемещений контролируемых точек высоконапорных гидротехнических сооружений на основе геодезических данных.

Методология и методы исследования. Поставленные задачи решаются на основе методов корреляционного, дисперсионного и регрессионного анализа, элементов математической статистики, теории погрешностей измерений и методов математического моделирования; для численных расчетов использовались возможности математико-статистического аппарата и прикладной программы MS EXCEL.

Положения, выносимые на защиту:

– методические решения построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков позволяют корректно конструировать прогнозные математические модели для изучения основных закономерностей процесса перемещений плотины СШГЭС;

– анализ построения различных вариантов прогнозных математических моделей с различными входными воздействиями, дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием позволяет выявить и предложить наиболее оптимальные прогнозные модели для прогнозирования перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Тематика и содержание диссертации соответствуют областям исследования: 6 – Геодезическое обеспечение изысканий, проектирования, строительства и эксплуатации крупных инженерных комплексов, в том числе гидротехнических сооружений, атомных и тепловых электростанций, промышленных предприятий, линейных сооружений. Геодезический контроль ведения технического надзора при строительстве и эксплуатации нефтедобывающих комплексов; 8 – Геодезический мониторинг напряженно-деформированного состояния земной коры и ее поверхности, зданий и сооружений, вызванного природными и техногенными факторами, с целью контроля их устойчивости, снижения риска и последствий природных и техногенных катастроф, в том числе землетрясений паспорта научной специальности

25.00.32 – Геодезия, разработанного экспертным советом ВАК Минобрнауки РФ по техническим наукам.

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов подтверждена корректной математической обработкой и моделированием большого объема натуральных геодезических данных.

Основные положения диссертации и результаты исследований докладывались и обсуждались на международных научных конгрессах «Интерэкспо ГЕО-Сибирь» в период 2014–2017 гг.

Публикации по теме диссертации. Основные теоретические положения и результаты исследований представлены в 10 статьях, в том числе семь из которых опубликованы в рецензируемых журналах, входящих в перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук.

Структура диссертации. Общий объем диссертации составляет 122 страницы печатного текста. Диссертация состоит из введения, трех разделов, заключения, списка литературы, включающего 175 наименований, содержит 7 таблиц, 32 рисунка, 5 приложений.

1 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТКИ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ НА ОСНОВЕ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ ДЛЯ АНАЛИЗА ДЕФОРМАЦИЙ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

1.1 Общие сведения о действии сил и перемещениях на плотинах гидроэлектростанций

Плотины гидроэлектростанций (ГЭС) классифицируются рядом авторов [46, 63, 126] по степени регулирования стока реки, по основному строительному материалу, по способу восприятия нагрузок и сопротивления сдвигу, по условиям пропуска воды. Рассмотрим основные силы, в результате взаимодействия которых возникают напряженно-деформированное состояние плотины и ее перемещения, наблюдаемые геодезическими методами. Ограничимся при этом рассмотрением бетонных плотин, которым уделяется большое внимание.

Силы, воздействующие на плотину [18, 126], можно разделить на статические и динамические, на постоянные, кратковременные, случайные и действующие чрезвычайно редко. На бетонную плотину постоянно воздействуют целые совокупности вертикальных и горизонтальных нагрузок, которые складываются из собственного веса бетона, гидростатического давления воды на напорную и низовую грани, фильтрационного противодействия на подошву, давления массы воды на дно водохранилища. Кроме того, от изменения температурного состояния бетона возникают напряжения в теле плотины.

Совместное воздействие вышеуказанных сил, дополненное изменением температурного состояния бетона, вызывает напряженно-деформированное состояние плотины и ее основания, а затем их деформацию, следствием которой является изменение пространственного положения плотины. Вертикальные и горизонтальные перемещения, характеризующие деформацию плотины, измеряются геодезическими методами [5, 40, 73, 129, 153]. Вертикальные перемещения [16, 73] складываются из осадки, которая возникает вследствие деформации основания и в результате изменения вертикальных размеров секций плотины вследствие

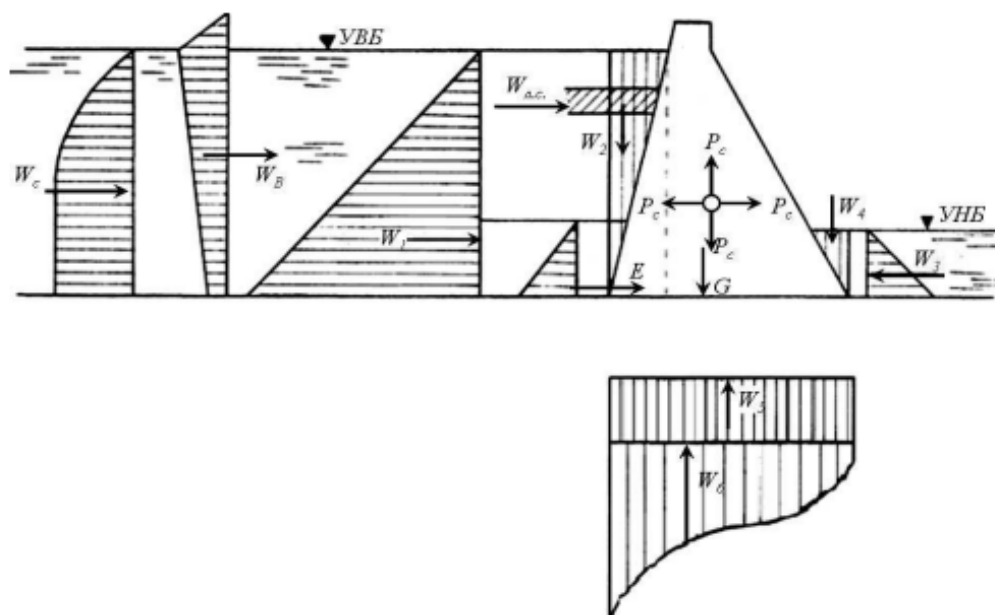
увеличения или уменьшения температуры бетона и его веса. Возникновение горизонтальных перемещений обусловлено гидростатической нагрузкой, температурными изменениями и неравномерной осадкой.

Приведенные сведения о действии основных сил, вызывающих перемещения, являются определяющими в решении вопроса о выборе входных воздействий при построении динамических моделей процессов деформации плотины. Однако не всегда удастся осуществить непосредственные натурные наблюдения за изменением этих сил, при этом нетрудно заметить, что проявление большинства из них зависит от влияния воды и температуры воздуха.

Постоянное влияние воды, проявляющееся в виде механического, физико-химического и биологического воздействия, является одной из основных общих и в то же время непосредственно действующих причин, вызывающих перемещения наблюдаемых точек сооружения ГЭС. Механическое воздействие воды проявляется в виде статического и динамического давления на сооружение, которое стремится сохранить свою устойчивость за счет гравитационных сил и конструктивных связей. На рисунке 1 показано, что горизонтальная составляющая напора воды стремится сдвинуть или опрокинуть сооружение, а вертикальное взвешивающее и фильтрационное давление – поднять сооружение. Кроме того, физико-химическое и биологическое действие воды постоянно разрушает материал сооружения, что, в конечном счете, также находит свое отражение в изменении как скорости, так и величины перемещений наблюдаемых точек.

Температура воздуха служит также общей, непосредственно действующей причиной возникновения перемещений; она, в свою очередь, может рассматриваться как результат еще более общего воздействия солнечной радиации. Температура воздуха (от нее, как правило, существенно зависят сроки и характер паводковых и меженных периодов) оказывает влияние не только на изменение температурного состояния бетона и воды, но и на гидростатическое давление. Последнее обстоятельство существенно осложняет построение динамических моделей, поскольку два основных входных воздействия очень часто коррелируют между собой вследствие схожести характера своего развития. Таким образом, температура

воздуха и гидростатическое давление, регулярно контролируемые на ГЭС, представляют собой прямо или косвенно действие большинства основных сил, вызывающих перемещение плотины. На рисунке 1 показана схема действия основных сил, действующих в поперечном сечении гравитационной плотины [126].



G – вес плотины и установленного на ней оборудования; W_1 – горизонтальная составляющая гидростатического давления со стороны верхнего бьефа;
 W_3 – горизонтальная составляющая гидростатического давления со стороны нижнего бьефа; W_2, W_4 – вертикальные составляющие гидростатического давления со стороны верхнего и нижнего бьефа, обусловленные наличием наклонных граней сооружения; W_5 – взвешивающее давление воды на подошву сооружения;
 W_6 – фильтрационное противодействие; W_b – давление от действия волн;
 $W_{л.с}$ – давление льда (статическое); E – давление наносов, отложившихся в верхнем бьефе; W_c – сейсмическое давление, возникающее при землетрясениях и вызывающее инерционные силы P , приложенные в центре тяжести сооружения; УВБ, УНБ – соответственно уровни верхнего и нижнего бьефа

Рисунок 1 – Схема сил, действующих на водоподпорное сооружение

Очевидно, для построения достаточно полной модели процесса перемещения в целях его анализа следует учитывать совместное действие целого ряда из этих факторов, а их взаимную корреляционную зависимость исключать методами,

которые будут изложены в третьем разделе диссертации. Безусловно, при решении конкретных задач необходимо обоснованно включать в прогнозные модели и частные виды входных воздействий, если измеряются их количественные характеристики, а сами воздействия оказывают заметное влияние на исследуемый процесс перемещения.

Комплексные натурные наблюдения, достаточно хорошо организованные на гидротехнических сооружениях [1, 47, 64, 89, 152], позволяют строить на основе геодезических данных достаточно полные и содержательные прогнозные модели динамического типа.

Приведенный же выше предварительный анализ действующих на плотину основных сил и комплексный анализ графиков изменения температуры, гидростатического давления и перемещений контролируемых точек является по существу этапом структурной идентификации для строящихся прогнозных моделей. Однако необходимо отметить при этом, что разработка динамических моделей для изучения процессов деформации сооружений ГЭС не должна исключать построения и соответствующих кинематических моделей, которые в ряде случаев могут дать достаточно высокую точность прогнозирования.

1.2 Крупнейшие плотины мира

Издавна человек пытался строить гидротехнические сооружения, так как во многих районах земного шара в силу временных явлений (паводков, разливов, наводнений и др.) невозможно было обойтись без трансформации стока рек. Еще в XXIII в. до н. э. в Китае инженер Юй предложил первые проекты по регулированию и углублению русла рек, а также способы очистки и прокладки водоотводных каналов. На Ближнем Востоке уже несколько тысяч лет назад начинали выстраивать небольшие плотинные «стеночки», а сегодня это дамбы – огромные и мощнейшие сооружения, которые выполняют целый ряд задач, таких как временное удержание воды, разделение акваторий на функционально различные части,

защита территорий от затопления и других целей; при этом для их строительства требуются годы и большие финансовые и трудовые резервы.

Гидротехнические сооружения (ГТС) по условиям использования подразделяются на постоянные и временные [18, 126]. Постоянные, в свою очередь, подразделяются на основные и второстепенные сооружения. С точки зрения экологов, наибольший вред окружающей среде и народному хозяйству наносят основные ГТС – плотины, дамбы, берегоукрепительные и оградительные сооружения, водоприемники и водозаборы и другие виды сооружений, повреждение или разрушение которых ведет к нарушению нормальной работы ГЭС: затоплению и подтоплению территорий, прекращению деятельности судостроительных заводов, речных портов, прекращению или уменьшению подачи воды для водоснабжения населения и орошения и другим неблагоприятным явлениям.

Одним из крупнейших гидротехнических сооружений является плотина – объект, возводимый на пути водного потока для поднятия естественного уровня воды. Данный вид сооружений позволяет извлекать максимальную пользу от действия водной стихии. Современные ГЭС – это самые крупные сооружения на планете и их влияние на природу и окружающий ландшафт наиболее существенно. Удар ГЭС по экологии нашей планеты, несомненно, является очень болезненным, однако, по мнению большинства энергетиков – это справедливая цена за полученное электричество. Как же выглядят нынешние 20 самых высоких плотин мира?

Токтогульская ГЭС, построенная в 1975 г., является наиболее крупной и значимой электростанцией, вырабатывающей до 40 % электроэнергии в Киргизии (рисунок 2).

Эта плотина одновременно и ГЭС, и источник орошения. Она расположена на реке Нарын в Джалал-Абадской области [54, 77]. Токтогульское водохранилище глубиной 215 м, объемом 19,5 км³, площадью 284 км² и длиной 65 км является крупнейшим водохранилищем не только в Кыргызстане, но и во всей Центральной Азии.

Водоохранилище состоит из узкого долинного участка непосредственно выше плотины и удлиненного озеровидного расширения (до 12 км) в Кетмень-Тюбинской котловине. Заполнение началось в 1973 г. Осуществляет многолетнее регулирование стока. Проектное колебание уровня бьефа до 63 м. Создано для нужд энергетики и ирригации; строилось водохранилище более 10 лет.

ГЭС Лунтань – компактная бетонная плотина на реке Хоншуйхэ в Китае [77]. Ее высота 216,5 м; запущена в 2009 г. (рисунок 3). ГЭС является важным строительным объектом в плане масштабного освоения западного Китая. Гидроэлектростанция Лунтань находится в Гуанси-Чжуанском автономном районе на юго-западе Китая. Общая мощность ее агрегатов составляет 6,3 млн. кВт · ч электроэнергии. В год она вырабатывает 18,7 млрд. кВт · ч электроэнергии.



Рисунок 2 – Токтогульская ГЭС



Рисунок 3 – ГЭС Лунтань

Плотина (ГЭС) Сяовань расположена на крупнейшей реке Юго-Восточной Азии – Меконге, текущей по территории Китая, Мьянмы, Таиланда, Лаоса, Камбоджи, Вьетнама (рисунок 4).

Строительство плотины завершено в марте 2010 г., а пуск последнего гидроагрегата состоялся в 2013 г. [77]. Сяовань представляет собой арочную плотину высотой 292 м с проектной мощностью ГЭС 4,2 млн. кВт · ч, среднегодовая выработка – 19 млрд. кВт · ч электроэнергии. Основное предназначение арочной плотины – это выработка электроэнергии.

Плотина Глен-Каньон расположена в штате Аризона, в ущелье Гранд-Каньон – в районе весьма живописных ущелий. По решению Конгресса США в 1956 г. была построена дамба для создания запасов воды реки Колорадо, а теперь, благодаря плотине Глен-Каньон, появилось второе по величине искусственное озеро в США, разлившееся перед запрудой и названное Lake Powell (озеро Пауэлл). Строительство плотины было организовано ради этого искусственного озера, а производство электроэнергии – всего лишь побочное следствие создания этого красивого водохранилища. Высота дамбы – 178 м над уровнем реки Колорадо. Общая мощность гидроагрегатов, установленных в машинном отделении, составляет 1,3 млн. кВт · ч электроэнергии (рисунок 5).



Рисунок 4 – ГЭС Сяовань

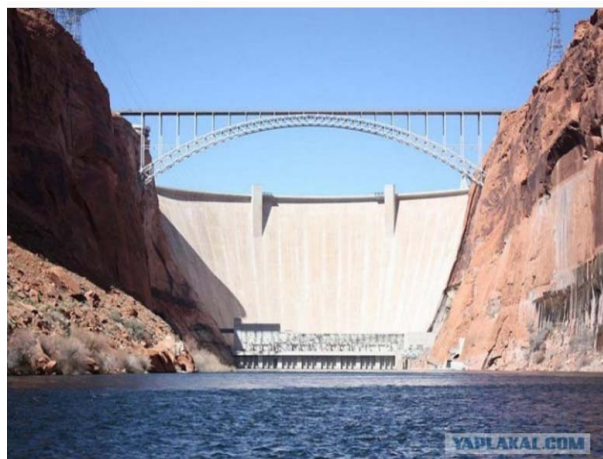


Рисунок 5 – Плотина Глен-Каньон

Плотина Дворжак высотой 219 м является третьей по высоте гравитационной плотиной в Соединенных Штатах и самой высокой строго вертикальной бетонной плотиной в Западном полушарии [77]. К созданию этой плотины приступили в 1966 г., и уже через 6 лет в 1973 г. она была пущена в эксплуатацию (рисунок 6). Плотина образует водохранилище длиной более 80 км.

Плотина Контра, расположенная в Швейцарии, является достопримечательностью государственного масштаба. Это уникальное архитектурное сооружение (фактически ГЭС) также известно под названиями дамба Верзаска или дамба Локарно. На возведение дамбы было потрачено более четырех лет, а ее строитель-

во было завершено в 1965 г. Сама же Контра – это арочная плотина над швейцарской рекой Верзаска, высота плотины составляет 220 м (рисунок 7).

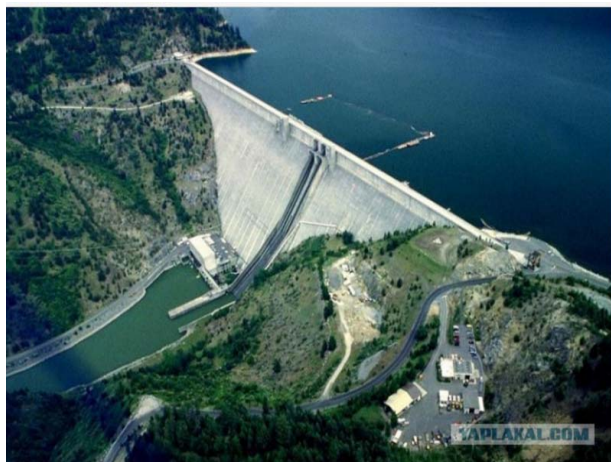


Рисунок 6 – Плотина Дворжак



Рисунок 7 – Плотина Контра

Плотина Гувера – одна из крупнейших гидроэлектростанций США, построена на границе двух штатов – Невады и Аризоны, в которых действуют разные часовые пояса. Когда-то ее называли плотиной Боулдера [77]. Нынче же плотина Гувера – это бетонное рукотворное чудо архитектуры, расположенное в Черном каньоне реки Колорадо мощностью 2,1 млн. кВт · ч электроэнергии (рисунок 8). Это самая высокая дамба в Западном полушарии; высота плотины над уровнем реки Колорадо – 221 м. 17 мощных генераторов производят 4 млрд. кВт · ч энергии в год. Содержание и обслуживание плотины Гувера полностью окупается за счет продажи энергии и денег, полученных от туристов из многих стран.



Рисунок 8 – Плотина Гувера



Рисунок 9 – плотина Луццоне

Плотина Луццоне построена в 1963 г. в Швейцарии, известна своей самой высокой в мире искусственной стеной на одной из ее сторон. Достигает 225 м в высоту (рисунок 9), объем водохранилища составляет 87 млн. м³.

Плотина Бхакра – одно из крупнейших комплексных гидроэнергетических сооружений Индии. Эта бетонная гравитационная плотина на реке Сатледж находится недалеко от границы между штатами Пенджаб и Химачал-Прадеш [77]. Построена в 1963 г., имеет очень важное значение для развития сельского хозяйства и промышленности на равнинах верхнего Ганга, Пенджаба и северной части Раджастана, где имеются плодородные, но засушливые почвы (рисунок 10). Достигает 226 м в высоту, объем водохранилища составляет 9 870 млн. м³.

Плотина Карун-4 расположена на реке Карун на юго-западной части Ирана. Это 230 м арочная бетонная плотина является самой высокой плотиной в Иране (рисунок 11). Ширина плотины по гребню – 440 м, объем водохранилища – 2,2 км³. Мощность ГЭС 1 млн. кВт · ч электроэнергии (четыре гидроагрегата по 250 000 кВт · ч). Это очень мощная арочная плотина, задачей которой является электроснабжение и борьба с наводнениями в республике.

Плотина Шибуйя построена в 2008 г. в Китае [77]. Она работает не только как ГЭС, но и как сооружение для предотвращения наводнений; также её используют для навигации, туризма и рыболовства (рисунок 12). Достигает в высоту 233 м, объем водохранилища составляет 4 580 м³.

Чиркейская ГЭС расположена на р. Сулак в Республике Дагестан [56, 93, 98]. Она построена в сейсмически активном районе, в сложных геологических условиях. Строительство было начато в 1964 г., а последний четвертый агрегат ввели в работу в 1976 г. (рисунок 13). Это самая крупная ГЭС на Северном Кавказе и самая высокая российская – 232,5 м. Она построена в узком Чиркейском ущелье. Установленная мощность ГЭС – 1 млн. кВт · ч электроэнергии, среднегодовая выработка 2,47 млрд. кВт. Чиркейская ГЭС, с учетом ее маневренных возможностей, стала основной регулирующей станцией в Объединенной энергосистеме юга России (см. рисунок 13).



Рисунок 10 – Плотина Бхакра



Рисунок 11 – Плотина Карун-4



Рисунок 12 – Плотина Шибуйя



Рисунок 13 – Чиркейская ГЭС

Плотина Эртан – арочная плотина высотой 240 м, расположена на реке Ялонг, притоке Янцзы в провинции Сычуань, юго-запад Китая (рисунок 14). Объем водохранилища составляет 5 800 млн. м³.

Саяно-Шушенская ГЭС – уникальная арочно-гравитационная плотина – крупнейшая ГЭС в России и шестая по величине в мире [57, 77, 139,]. Плотина выстроена на реке Енисей возле города Саяногорска (рисунок 15). Конструкция плотины не имеет аналогов в мировой и отечественной практике [18, 125, 150]. Высота сооружения составляет 242 м, длина по гребню плотины – 1 074,4 м, ширина по основанию – 105,7 м и по гребню – 25 м. Плотина очерчена по напорной грани радиусом 600 м. Эксплуатационный водосброс предназначен для сброса избыточного притока воды в половодье и паводки, который не может быть пропущен через гидроагрегаты ГЭС, либо аккумулирован в водохранилище.



Рисунок 14 – Плотина Эртан



Рисунок 15 – Саяно-Шушенская ГЭС

Плотина Мика, расположенная в Канаде на реке Колумбия, тоже входит в число величайших архитектурных сооружений мира. Она имеет высоту 243 м. В результате строительства плотины образовалось невероятно красивое озеро Кинбэскет, которое выглядит настолько безупречно, что его совершенно не хочется считать искусственным. Цель строительства была единственной – дамбу строили для генерации электроэнергии, но со временем постройка внушительных размеров начала привлекать любопытных туристов со всех стран (рисунок 16).

Плотина Эль Кахон – это гигантский строительный проект [77]. Официальное название данного сооружения звучит как Центральная гидроэлектростанция им. Франциско Моразана. Расположена в Западном Гондурасе на реке Сантьяго в Мексике (рисунок 17). Ее высота составляет 226 м, а длина – 282 м. Суммарная мощность электростанции составляет 0,7 киловатт-часов электроэнергии. Уникальность ГЭС состоит в том, что она имеет самую высокую каменно-набросную с железобетонным противофильтрационным экраном плотину в мире.



Рисунок 16 – Плотина Мика



Рисунок 17 – Плотина Эль Кахон

Плотина Оровилл расположена на реке Фитер (приток реки Сакраменто) в штате Калифорния (США). Построена плотина в 1961–1968 гг. Земляная насыпная дамба высотой 235 м является самой высокой в США; объем водохранилища составляет 4 299 млн. м³. Основная задача – это обеспечение водоснабжения населения и борьба с наводнениями, а также попутная выработка электроэнергии (рисунок 18).

Плотина Деринер находится на р. Чорох в 5 км восточнее от турецкого города Артвин. ГЭС Деринер – бетонная арочная плотина, высотой 249 м и длиной по гребню 720 м. Это самая высокая плотина в Турции (рисунок 19); выше, чем самая высокая плотина в России (Саяно-Шушенская), но в мировом рейтинге она не входит даже в первую десятку.



Рисунок 18 – Плотина Оровилл



Рисунок 19 – Плотина Деринер

Плотина Лаксива – арочная плотина высотой 250 м, расположена на реке Хуанхэ в провинции Цинхай (рисунок 20) на северо-западе Китая.

Плотина Мовуазен высотой 250 м, живописно смотрится на фоне горы Мон Блан де Шейлон [77]. По высоте эта вторая плотина в Швейцарии и 8-я в мире (рисунок 21). Первоначальная высота плотины была 237 м. Однако в 1991 г. ее надстроили еще на 13 м, причиной тому стала потребность в увеличении объема водохранилища в зимний период. Благодаря этой плотине в швейцарских Альпах появилось озеро Мовуазен. Оно является одним из крупнейших водохранилищ в Швейцарии. Помимо выработки электроэнергии, плотина служит для контроля паводков, предотвращая наводнения.

Каменно-насыпная плотина Тери (Индия) многофункционального использования высотой 261 м построена на реке Бхагирати неподалеку от города Тери, в индийском штате Уттараканде (рисунок 22).

ГЭС Ингури находится на р. Ингури в Грузии. Она является второй по высоте бетонной арочной плотиной в мире (рисунок 23).



Рисунок 20 – Плотина Лаксива



Рисунок 21 – Плотина Мовуазен



Рисунок 22 – Плотина Тери



Рисунок 23 – ГЭС Ингури

В диссертационной работе рассмотрено 22 самых высоких плотин мира, спроектированные человеком. При этом выделим особо, что плотина является важнейшим гидротехническим сооружением, состояние и эксплуатацию которого необходимо постоянно контролировать.

Обобщая вышесказанное, отметим, что на сегодняшний день гидроэлектростанции – это комплекс сложных гидротехнических сооружений и оборудования, которые играют важнейшую роль в выработке электроэнергии, а также в предотвращении наводнений, стихийных катастроф и т. п. [7–9, 25, 37, 38, 86].

В настоящее время геодезические исследования развиваются и совершенствуются в большей степени в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и особенно прогнозированию уделяется в них недостаточное внимание.

1.3 Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс

Саяно-Шушенский гидротехнический комплекс расположен в верхнем течении р. Енисей и включает [18, 19, 107]: высоконапорную Саяно-Шушенскую гидроэлектростанцию, мощность которой составляет 6 400 МВт и контррегулирующий Майнский гидроузел, мощность которого составляет 321 МВт.

Саяно-Шушенская ГЭС – самая мощная электростанция России, является крупнейшим источником покрытия пиковых перепадов мощности в Единой энергосистеме России, а также снабжает электрической энергией крупнейшие алюминиевые заводы Сибири – Саянский, Хакасский, Новокузнецкий, Красноярский.

Майнский гидроузел предназначен для сглаживания колебаний расходов и уровней в нижнем бьефе Саяно-Шушенской ГЭС. Он обеспечивает проведение глубокого суточного и недельного регулирования водного режима водохранилища Саяно-Шушенской ГЭС, а также позволяет снизить отрицательное воздействие энергокомплекса на окружающую среду, вызванное изменением водного режима р. Енисей на участке пос. Майна – г. Минусинск, создав удовлетворительные условия для неэнергетических водопользователей.

Саяно-Шушенская ГЭС осенью 1990 г. была впервые наполнена до проектной отметки нормального подпорного уровня (НПУ) (НПУ = 540 м). С 1991 г. Саянский гидроэнергетический комплекс вышел на проектный эксплуатационный режим [18, 20, 74, 139, 150]. В таком режиме для плотины характерно циклическое изменение основной нагрузки – гидростатического давления уровня верхнего бьефа (УВБ) на верховую грань плотины и дно водохранилища. Каждый цикл имеет две ветви – ветвь нагружения (наполнение водохранилища: май – октябрь); ветвь разгрузки (сработка водохранилища: ноябрь – апрель) (таблица 1).

Таблица 1 – Характерные уровни в водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС

Уровни	Проектные значения, м	Принятые с 1977 г., * м
НПУ	540	538 (август), 539 (сентябрь)
Уровень мертвого объема (УМО)	500	500
Форсированный подпорный уровень (ФПУ)	544,5	540
Минимальный уровень нижнего бьефа (УНБ)	319,8	319,8
Примечание – Снижение НПУ и ФПУ было предпринято после ремонта бетона плотины с целью сохранения монолитности тела плотины и скалы основания после ремонта – инъецирования эпоксидных растворов в трещинах.		

Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс расположен в Южной Сибири, в верхнем течении р. Енисей на 100 км выше впадения в Енисей р. Абакан. Климат района расположения Саяно-Шушенского гидроэнергокомплекса резко-континентальный. Максимальная температура воздуха в июле +40 °С, минимальная в январе минус 44 °С, среднегодовая +0,8 °С. Гидроузел располагается в так называемом Саянском коридоре у выхода р. Енисей в Минусинскую котловину.

Площадь водосбора бассейна реки, обеспечивающей приток к створу ГЭС, составляет 179 900 км². Среднеголетний сток в створе составляет 46,7 км³.

Площадь водохранилища составляет 621 км², полная емкость водохранилища – 31,3 км³, в том числе полезная – 15,3 км³.

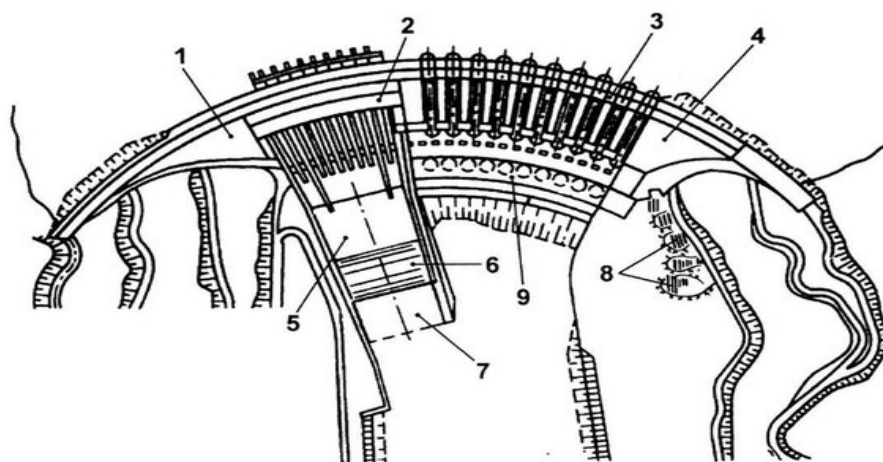
Площадь затопления сельхозугодий – 18,3 тыс. га. Количество перенесенных строений – 2 717.

Расчетный максимальный сбросной расход через гидроузел при обеспеченности притока 0,01 % составляет 13 300 м³/с.

Напорный фронт Саяно-Шушенской ГЭС образует уникальная бетонная арочно-гравитационная плотина высотой 245 м, длиной по гребню 1 066 м, с шириной по основанию 105,7 м, а по гребню – 25 м, которая в значительной мере воспринимает напор как гравитационная, а также как арочная. Наглядное представление о том, в какой мере проявляются арочный и гравитационный эффекты

при восприятии плотинной нагрузки, дал статический ее расчет неполным методом пробных нагрузок (арок-консолей). Разделение гидростатического давления верхнего бьефа в рамках этого метода на консольное и арочное направление показывает, что арочный эффект (кривизна плотины в плане) уменьшает равнодействующую гидростатического давления на плотину приблизительно на 25 %. Такого типа плотина с указанными геометрическими соотношениями, построенная в широком створе, является единственной в мире [18, 139].

В плане плотина в верхней 80 м части запроектирована в виде круговой арки, имеющей по верховой грани радиус 600 м и центральный угол 120, а в нижней части плотина представляет собой трехцентровые арки, причем центральный участок с углом охвата 37 образуется арками, аналогичными верхним (рисунок 24).



1 – правобережная глухая плотина; 2 – водосбросная плотина; 3 – станционная плотина; 4 – левобережная глухая плотина; 5 – водобойный колодец; 6 – водобойная стенка; 7 – рисберма; 8 – крепление потенциально неустойчивых массивов; 9 – здание ГЭС

Рисунок 24 – План гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС

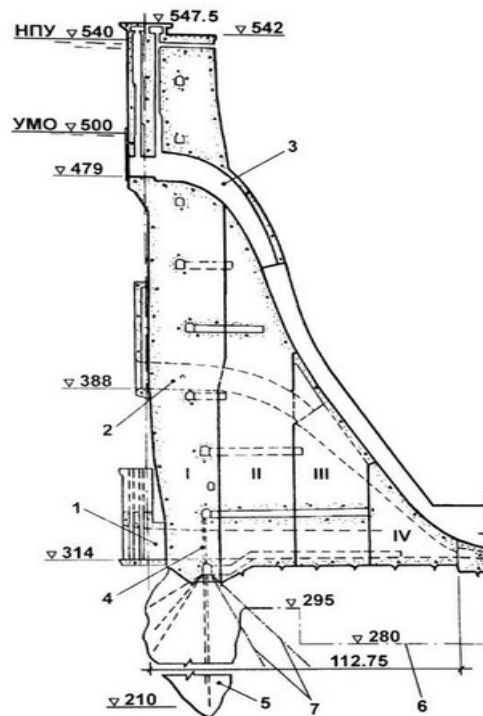
Береговые арки имеют меньшие радиусы. Напорная вертикальная грань плотины имеет в нижней 50 м части плавную подрезку, достигающую у основа-

ния 10 м. Низовая грань имеет уклон: в верхней части 1 : 0,05, в средней – 1 : 0,25, в нижней – 1 : 0,7 [18].

Водосбросная плотина имеет 11 водосбросных отверстий, пороги водоприемников которых заглублены на 61 м от НПУ (рисунок 25).

По длине плотина разделена температурно-усадочными швами на секции шириной около 15 м. Секции состоят из столбов длиной в плане 27 м. В теле плотины на расстоянии 10–18 м от верховой грани выполнен дренаж.

Основание плотины сложено крепкими глубоко метаморфизическими кристаллическими сланцами протерозоя. Модуль деформации пород в сплошном массиве изменяется в зависимости от глубины от $10 \cdot 10^3$ до $(28-30) \cdot 10^3$ Мпа.



I–IV – столбы бетонной кладки; 1 – строительные водосбросы 1-го яруса; 2 – строительные водосбросы 2-го яруса; 3 – эксплуатационные водосбросы; 4 – дренаж тела плотины; 5 – глубокая цементационная завеса; 6 – граница площадной цементации; 7 – скважины глубокого дренажа

Рисунок 25 – Разрез водосбросной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

В основании плотины выполнена глубокая цементационная завеса до 100 м в русловой части, сопрягающая цементация под верховой гранью плотины на глубину до 60 м, укрепительная цементация под низовым клином плотины на глубину до 30 м в русловой и до 20 м в береговых частях. Выполнен дренаж из одного ряда скважин глубиной около 50 м в русле и до 80 м в берегах с наклоном в сторону нижнего бьефа.

Коэффициент запаса на устойчивость русловых секций плотины против сдвига составляет 1,62 при коэффициенте трения 1,0 и величине сцепления – 0,5 Мпа. Обычно в относительно тонких арочных плотинах устойчивость отдельных секций на сдвиг не обеспечивается. Саяно-Шушенская же плотина настолько массивна, что устойчивость ее секций на сдвиг по контракту со скалой обеспечивается даже при исчезновении арочного эффекта (полном раскрытии межсекционных швов).

По проектным предположениям сжимающие напряжения в верхнем арочном поясе должны достигать 10 МПа, в низовом клине на контакте плотины с основанием должны составлять 11,5 Мпа, а растягивающие напряжения в нижней части верховой грани – несколько превосходить 1,5 Мпа.

Гидроагрегаты Саяно-Шушенской ГЭС имеют номинальную мощность 640 МВт при расчетном напоре 194 м, а при напоре 212 м и выше развивают мощность до 720 МВт. В качестве средств автоматического управления гидроагрегатами Саяно-Шушенской ГЭС и сигнализации был разработан и реализован ряд систем управления и сигнализации как единое целое с обеспечением оптимальной взаимосвязи с использованием современных технических средств и полупроводниковой элементной базы. Объединяющим комплексом для решения различных задач управления технологическими процессами при эксплуатации ГЭС является автоматизированная система управления (АСУ ТП) Саяно-Шушенской ГЭС.

В совокупности Саяно-Шушенская и расположенная в 21,5 км ниже Майнская ГЭС образуют единый гидроэнергетический комплекс, обеспечивая на первой ГЭС необходимое суточное и недельное регулирование нагрузки в энергосистеме, благодаря контррегулированию ее нижнего бьефа.

Природно-климатические, геологические и гидрологические условия Майнской ГЭС те же, что и на Саяно-Шушенской [24, 71, 137, 156]. В состав Майнского гидроузла входят правобережная, русловая и левобережная грунтовые плотины, здание ГЭС с тремя агрегатами с поворотолопатными турбинами и бетонная водосбросная плотина с пятью пролетами по 25 м каждый. Установленная мощность Майнской ГЭС – 321 тыс. кВт, годовая выработка электроэнергии – 1,7 млрд. кВт·ч.

1.4 Основные показатели состояния и работы гидротехнических сооружений.

Диагностические показатели на примере высоконапорной плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции

Необходимая оперативность и объективность эксплуатационного контроля бетонной плотины, какой является плотина Саяно-Шушенской ГЭС, достигается путем решения ряда методологических и организационно-технических задач, первоочередной из которых является определение критериев безопасности. При этом контроль за сооружением ГЭС в период эксплуатации [17, 49, 68, 70] позволяет выявить факторы, влияющие на безопасность сооружения, которые не были учтены в проекте и при возведении сооружения.

В то же время обеспечение эксплуатационной надежности высоконапорных бетонных плотин является важной научно-технической и социальной задачей. При этом геодезические измерения являются необходимой и в то же время одной из основных составных частей натуральных наблюдений, так как именно они непосредственно дают информацию о пространственных перемещениях системы «плотина – основание» под действием нагрузок, о деформации береговых массивов, вмещающих гидротехническое сооружение, а также информацию о влиянии техногенных факторов в случае проведения ремонтных работ [30–36, 73, 151]. Именно результаты геодезических наблюдений за состоянием высоконапорных бетонных плотин представляют собой в интегральной количественной форме

наиболее объективную и точную информацию о сложном взаимодействии сооружения с грунтовым основанием и внешней средой.

Высотные и плановые смещения бетонной плотины относятся к основным диагностическим параметрам, связанным с критериями безопасности гидротехнических сооружений [30–36, 101, 103]. Поэтому исследование методов геодезических измерений бетонных плотин, их модернизация и использование для решения такой сложной и важной задачи, как прогнозирование, позволяет получить корректную информацию о состоянии объекта контроля и в целом обеспечить эксплуатационную надежность сооружения.

Вследствие данного обстоятельства методика контроля безопасности эксплуатируемых сооружений, основанная на сопоставлении отдельных показателей их состояния (диагностических показателей), определяемых по результатам натурных наблюдений с критериальными значениями контролируемых показателей (критериями безопасности), получила наибольшее распространение [30–36, 50–59, 101, 106].

Основные показатели работы гидротехнических сооружений характеризуют напряженно-деформированное состояние [88, 94, 124, 128], фильтрационный и гидравлический режимы в сооружениях, их основаниях и береговых примыканиях. Значение основных показателей определяется расчетами при проектировании, а состояние сооружения контролируется инструментальными и визуальными наблюдениями непосредственно на сооружении. К основным показателям состояния и работы гидротехнических сооружений относятся [30–36, 101, 121, 122]:

- осадки и горизонтальные смещения сооружений и их оснований;
- деформации температурно-осадочных и межблочных швов бетонных сооружений;
- поровое давление и интенсивность его рассеивания в водоупорных элементах грунтовых плотин и оснований;
- напряжения в материалах сооружений и оснований (бетон, арматура, скала, грунт и др.);

- контактные напряжения в подошвах, на вертикальных и наклонных поверхностях бетонных сооружений;
- фильтрационные деформации грунтовых плотин и их оснований;
- фильтрационное давление на подошвы бетонных сооружений;
- пьезометрические градиенты фильтрации;
- отметки депрессионной поверхности фильтрационного потока;
- фильтрационный расход воды, поступающий в дренажные устройства или выходящий на дневную поверхность;
- размыв русла в нижнем бьефе;
- отложения наносов в водохранилище.

При оценке состояния гидротехнических сооружений на основе значений основных показателей [41, 48, 82, 83, 169] учитываются также повреждения, непредвиденные процессы в сооружениях и их основаниях, связанные с недостаточным объемом инженерно-геологических изысканий, качеством проекта и строительных работ, старением материалов и износом сооружений. К ним относятся: местные оползания и размыв откосов плотин и береговых примыканий, подмыв основания, контактная фильтрация в сопряжениях сооружений, нарушение шпонок, эрозия бетона, снижение прочностных характеристик материалов и т. п.

Наиболее опасные зоны гидротехнического сооружения, состав количественных и качественных показателей, контролируемых в периоды строительства и эксплуатации, а также состав количественных диагностических показателей и их критериальные значения должны быть определены при разработке проекта в соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию ГЭС и должны быть уточнены перед вводом в эксплуатацию в процессе эксплуатации сооружений [18, 30–36, 101, 106, 120]. При этом назначаемые в составе проекта критериальные значения диагностических показателей должны быть увязаны со сценариями возможных аварий, опасными зонами и основными возможными формами разрушения сооружений.

Определение критериальных значений диагностических показателей для эксплуатируемых сооружений следует осуществлять на основе многофакторного анализа следующей информации [18, 30-36, 101, 106]:

- результатов сопоставления критериальных значений, разработанных в составе проекта, с контролируемыми на эксплуатируемом сооружении показателями при максимальных фактических силовых воздействиях основного и особого сочетания нагрузок;

- результатов поверочных расчетов наиболее ответственных элементов сооружения с использованием данных о фактических физико-механических характеристиках материалов сооружения и пород основания;

- результатов анализа статистических моделей (и расчетов по ним), построенных с использованием данных натурных наблюдений и фактических нагрузок.

В период эксплуатации для корректировки состава и критериальных значений диагностических показателей используют, кроме результатов расчетов, данные натурных наблюдений за весь период строительства и эксплуатации, а также результаты анализа опыта эксплуатации данного гидротехнического сооружения и аналогичных по конструкции и условиям эксплуатации сооружений. В целях прогноза изменения показателей и возможной более точной их корректировки на основе статистических и детерминистических методов должны быть разработаны различные диагностические математические модели сооружения [62, 66, 72, 100].

1.5 Разработка прогнозных математических моделей.

Анализ существующих методов их построения

Одной из важнейших задач в процессе эксплуатации высоконапорных гидротехнических сооружений является обеспечение их надежной и безопасной работы. В то же время, большинство этих сооружений эксплуатируется уже длительное время, что повышает вероятность возникновения и развития различных, часто негативных процессов, не рассматривавшихся при проектировании. Однако сложность процессов, определяющих характер работы гидросооружений совме-

стно с природными основаниями и при этом еще недостаточно изученных, естественное старение гидросооружений в течение длительного периода их эксплуатации и возможное развитие неблагоприятных процессов во времени требует постоянного контроля за работой сооружений и оценки их безопасности. Как показывает опыт натурных наблюдений за их поведением в процессе эксплуатации, состояние сооружений и их оснований в той или иной мере отличается от предполагаемого на стадии проектирования [18, 19, 69, 90–92, 101].

Разработка прогнозных математических моделей является обязательным условием диагностического контроля плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШГЭС) в соответствии с принятой «Методикой определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [101] и рекомендациями Федерального закона [106].

В соответствии со ст. 9 Федерального закона «О безопасности гидротехнических сооружений» собственник гидротехнического сооружения и эксплуатирующие организации обязаны: «систематически анализировать причины снижения безопасности гидротехнического сооружения и своевременно осуществлять разработку и реализацию мер по обеспечению технически исправного состояния гидротехнического сооружения и его безопасности, а также по предотвращению аварии гидротехнического сооружения» [106]. При этом согласно методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, оценку эксплуатационного состояния сооружения и его безопасности следует осуществлять путем сравнения измеренных количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями, установленными на стадии проектирования сооружения и откорректированными на стадии эксплуатации сооружения [101].

Вопросы уточнения диагностических показателей рассмотрены в работах [18, 21, 30–36]; при этом состав и критериальные значения диагностических показателей следует определять на основе анализа ряда параметров, в том числе и результатов расчетов напряженно-деформированного состояния единой системы «сооружение – основание», а для более точной их корректировки для всех «стадий жизни» гидротехнического сооружения (проектирование, строительство и экс-

плуатация) должны быть разработаны и откалиброваны по данным натурных наблюдений прогнозные математические модели поведения сооружений.

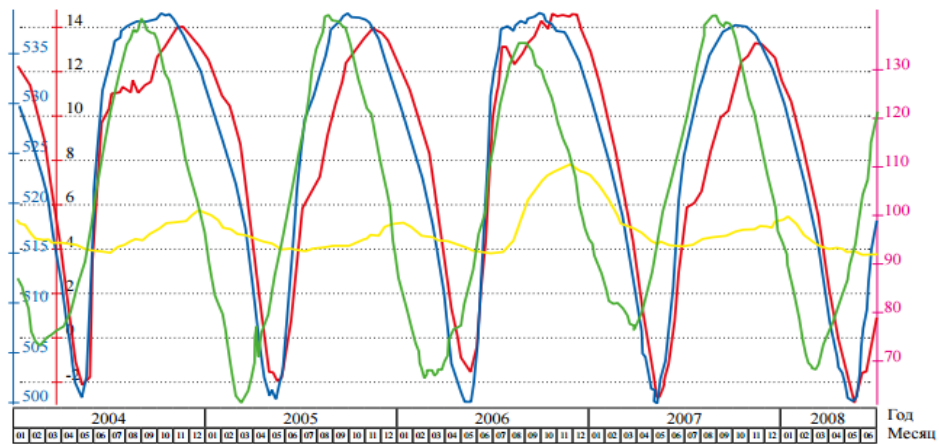
Прогнозные модели, основанные на данных натурных геодезических наблюдений, позволяют оценить состояние сооружения как потенциально опасное состояние, когда в течение длительного периода наблюдений интенсивность осадок не уменьшается, и как предаварийное, когда наблюдается увеличение интенсивности осадок во времени (высокая приточность). Существенный вклад в разработку прогнозных математических моделей отражен в работах [2–4, 18, 19, 36], а методологический подход – в [44, 46, 58, 122].

Построение прогнозных моделей необходимо начинать с тщательного изучения природы и структуры объекта исследования, чтобы правильно сориентироваться в характере проявления причинно-следственных связей, присущих процессу исследования.

Характер изменения температуры воды, температуры тела плотины в базовых точках, гидростатического давления и, в конечном счете, характер перемещений наблюдаемых точек тела плотины соответствуют сезонному изменению температуры воздуха, от которого зависят время и характер паводковых и меженных периодов, распределение и изменение температуры в самом сооружении и т. д. На рисунках 26, 27 представлены графики изменений основных воздействующих факторов на состояние тела плотины: температуры бетона в базовых точках плотины, гидростатического давления и величины перемещений точек плотины ключевой секции 33 Саяно-Шушенской ГЭС [18, 122]. На основании анализа графиков можно сделать следующие выводы:

– характер проявления изменений величин, зависящих от температуры воздуха, происходит с запаздыванием от 0,5 до нескольких месяцев; при этом отметим, что период запаздывания меняется на протяжении года и не одинаков для различных воздействующих факторов, перечисленных выше;

– горизонтальные перемещения точек плотины подвержены сезонным колебаниям, степень проявления которых зависит от местоположения точек и температурного или гидростатического влияния каждого года;



--- радиальные перемещения; --- верхний бьеф;
 --- температура бетона $T_{\text{низ}}$ (секция 33); --- температура бетона $T_{\text{верх}}$

Рисунок 26 – Хронограммы перемещений гребня плотины, УВБ и температура бетона в базовой точке $T_{\text{низ}}$ и $T_{\text{верх}}$ во времени (2004–2008 гг.)

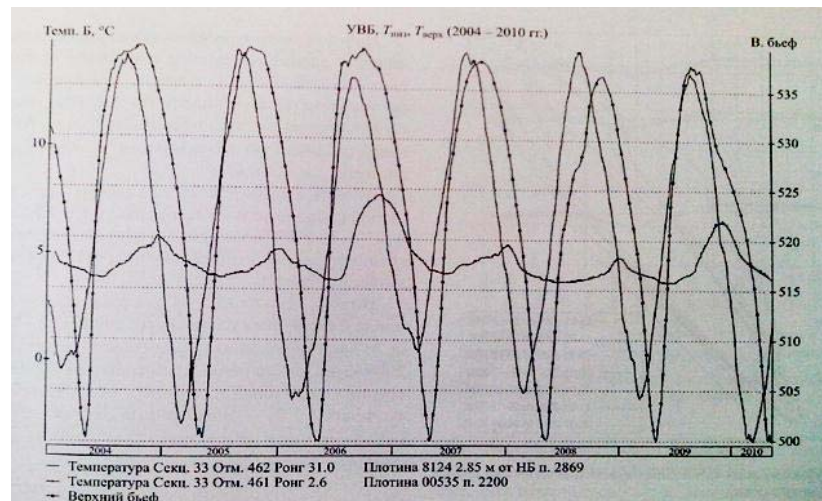


Рисунок 27 – Хронограммы перемещений гребня плотины, УВБ и температура бетона в базовых точках $T_{\text{низ}}$ и $T_{\text{верх}}$ во времени (2004–2010 гг.)

– основное влияние на перемещение наблюдаемых точек сооружения оказывают температура воздуха и гидростатическое давление. Эти воздействующие факторы коррелируют между собой и обобщают действие ряда зависящих от них непосредственных влияний, таких, как взвешивающее и фильтрационное давле-

ние, количество срабатываемой воды и др. Очевидно, что необходимо выделять постоянную составляющую среднегодового влияния температуры, гидростатического давления и других факторов.

Геодезические исследования в настоящее время развиваются и совершенствуются в большей степени в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и, особенно, прогнозированию уделяется в них недостаточное внимание. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования, можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек.

Прогнозные математические модели корреляционно-регрессионного типа. Достоинства и недостатки.

Натурным наблюдениям за поведением сооружений, особенно геодезическим, отечественные и зарубежные ученые всегда придавали самое большое значение, правильно считая их единственным и достаточно точным и надежным методом, позволяющим выявить реальные условия работы, а также оценить достоверность расчетов и модельных исследований. Для вынесения обоснованного заключения о степени надежности и безопасности состояния плотины, как правило, необходимо иметь в распоряжении многочисленные данные натурных наблюдений и владеть эффективными методами их анализа. К настоящему времени накоплен большой объем данных натурных наблюдений эксплуатируемых гидротехнических сооружений. При обработке последних традиционно применяется регрессионный анализ, позволяющий выявлять закономерности и взаимозависимости как реакцию исследуемых контролируемых параметров сооружения на приложенные внешние воздействия [42–46].

Следует отметить, что многие исследования раннего периода имели постановочный характер или относились к решению частных задач [95, 96, 99, 160]. В

большинстве случаев находимые решения сводились к различным видам аппроксимации с последующей экстраполяцией перемещений наблюдаемых контролируемых точек сооружений. Чаще всего аппроксимировались изменения средней осадки во времени. При этом оценивались корреляционно-регрессионные зависимости возникающих перемещений от воздействия различных факторов, выполнялся эвристический анализ пространственно-временного развития деформационных процессов, их геометрическая и физическая интерпретация и т. п. Так, например, построение прогнозной математической модели осадки сооружения и ее последующая корректировка осуществлялись с использованием известных принципов механики грунтов – методов эквивалентного слоя и метода послойного суммирования [46].

В работах [20–23, 150, 163, 167] представлен принцип динамического прогнозирования, когда прогнозная модель постоянно уточняется после проведения каждого нового цикла наблюдений на основании построенных графиков развития осадки. При этом графические погрешности уже на начальных этапах вносят существенный вклад в величину ошибки прогноза.

Вопросы моделирования и прогнозирования осадки сооружений в период их эксплуатации при геодезических наблюдениях через равные промежутки времени представлены в работах [39, 105], в которых использовался для прогнозирования степенной полином. При этом для получения 10-процентной погрешности необходимо проводить наблюдения с неравномерностью во времени не более 2 %, а для повышения точности прогнозирования необходимо увеличение степени полинома, вследствие чего методика становится слишком громоздкой. Полиномиальная аппроксимация [158], являющаяся по известной теореме Вейерштрасса базовым способом построения модели осадки, не всегда дает наилучшие результаты; в идеале экспериментатору всегда необходимо иметь под рукой графики 10–15 законов (полиномы 3–7-й степени, экспоненты и т. д.) и лишь после подбора модели по виду графика, используя метод наименьших квадратов (МНК), определяют элементы модели.

Прогнозирование процесса деформации с использованием многочленов, коэффициенты которого определяются МНК, а степень аппроксимирующего много-

члена выбирается на основании минимума дисперсии отклонений фактически измеренных значений от значений соответствующего многочлена, представлена в работе [63]. При этом рассмотрены возможности отбраковки грубых ошибок результатов измерений и проведен анализ однородности исследуемого процесса с возможным исключением временного запаздывания.

Наиболее эффективно применялись корреляционно-регрессионные методы для исследования высоких плотин по результатам геодезических и комплексных натурных наблюдений [26–28, 73], позволяющих выполнять анализ технического состояния плотины по данным натурных наблюдений радиальных смещений и углов наклона. Существенный вклад в разработку прогнозных математических моделей для изучения деформаций сооружений отражен в работах [5, 6, 26–28, 30–36, 119].

Поскольку результаты геодезических наблюдений за деформациями любого наземного сооружения представляют в интегральной количественной форме наиболее объективную и точную информацию о сложном взаимодействии его конструкций с грунтовым основанием и внешней средой, то эффективность применения корреляционно-регрессионных методов [2–6, 131, 157, 167, 168] обеспечивалась как грамотно продуманным выполнением натурных наблюдений, так и глубоким пониманием особенностей развития деформаций плотин ГЭС. Существенный вклад в разработку математических моделей данного типа привнес коллективом сотрудников Акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт имени Б. Е. Веденеева», что нашло отражение в работах [84, 85, 102, 122, 130, 164].

Однако корректное применение корреляционно-регрессионных методов исследований возможно лишь в случаях, когда удастся выявить и при математической обработке учесть по остаточным ошибкам аппроксимации влияние фактора времени и продолжительность инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие факторы. Вследствие данного обстоятельства несовершенство применения корреляционно-регрессионных моделей для моделирования поведе-

ния деформаций сооружений вызвало необходимость разработки новых подходов к решению данной проблемы.

Математические модели на основе численных методов исследований. Достоинства и недостатки.

В многогранном комплексе работ по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений особое место занимает оценка текущего напряженно-деформированного состояния сооружения и его прогнозирование на последующий период времени [36, 76–81, 122, 130, 170]. Существенный вклад в разработку математических моделей данного типа представлен в работах [42–46, 93, 110–116, 131, 173].

При этом по мере развития численных методов анализа, все большее место уделялось результатам, полученным с использованием расчетных математических моделей. Были смоделированы различные, в том числе и ведущие к необратимым изменениям составляющие процесса, такие как пластичность, возможность возникновения и продвижения трещин, необратимые перемещения плотины, реологические свойства основания [10, 21, 54, 102, 168] и др.

Вопросы численного моделирования напряженно-деформированного состояния высоких плотин под воздействием статических и динамических нагрузок, включая сейсмостойкость, рассмотрены в работах [12, 13, 132–134, 159, 173]. Математические модели для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований представлены в работах [20–23, 85, 107, 111, 123]. Для работы системы «бетонная плотина – скальное основание» исследовано влияние температуры воздуха и противодействия на использование способа приближенного решения с применением вспомогательных имитационных моделей [26–28, 117]. Разработке математических моделей сезонного изменения состояния бетонных плотин под действием нагрузок эксплуатационного периода, включая температурное и сейсмологическое воздействия, посвящены работы [85, 86, 150, 163, 164, 167]. В результате была построена и впоследствии дополнена с использованием программных комплексов «CosmosM» и «Ansys» подробная конечно-элементная модель плотины совместно с основанием, разбитая на элементы

1-го и 2-го порядка точности с достаточно корректным введением температурной нагрузки для выделенных 14 зон плотины. Это позволило в дальнейшем в результате численных исследований и натурных наблюдений ответить на принципиальные вопросы: насколько плотина адаптировалась к окружающему скальному основанию, завершились ли необратимые процессы в комплексе «бетон – скала» и каковы величины остаточных смещений, насколько монолитно сооружение?

В ходе работ по анализу напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений СШГЭС с использованием программных комплексов «CosmosM» и «Ansys» была построена и впоследствии дополнена подробная конечно-элементная модель плотины [107, 163].

За период после окончания строительства плотины произошло значительное накопление остаточных смещений, что постоянно привлекает внимание различных исследователей [18, 19, 30–36]. Среди работ, посвященных данной теме, следует выделить работы [50–59]. Авторы применяют метод квадратичного программирования для решения линейных уравнений с ограничениями в виде равенств и неравенств. Рассматривались варианты с заданием убывающей и невозрастающей необратимой составляющей, когда искомая компонента аппроксимировалась линейной комбинацией, составленных из ступенчатых либо кусочно-линейных локальных базисных функций времени.

В работе [85] рассмотрен способ определения остаточных смещений, базирующийся на исследовании временного тренда в расхождениях между результатами численных исследований на модели и полученных в ходе натурных наблюдений. Особое внимание уделялось корректному заданию температурной нагрузки, действующей на плотину.

В работе [31] по данным измерения диагностических показателей геодезическими методами ставилась цель – установить наличие остаточных (необратимых) смещений до и после аварии. С целью вычисления необратимых смещений с использованием регрессионного анализа на основании эмпирических зависимостей были рассчитаны радиальные перемещения; сделан вывод, что за период 2004–2009 гг. необратимых смещений не зафиксировано.

Анализу оценки несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС в послеаварийный период посвящена работа [19]. Влияние температурного фактора на напряженно-деформированное состояние плотины свидетельствует о необратимом характере изменений работы плотины после работы в нештатном режиме зимой 2009/10 г.; приводятся возможные причины снижения конструктивного модуля деформации плотины.

Службой мониторинга ГЭС с применением конечно-элементной модели [154] проведены расчеты с целью определить, имеет ли место рост необратимых перемещений плотины в сторону нижнего бьефа. Выполненные расчеты показали, что если в течение 2006–2009 гг. накопление перемещений происходило более интенсивно в правой части плотины, то в последующие 2010–2012 гг. накопление происходило по всему фронту плотины. В численном выражении данный процесс характеризуется суммарным перемещением за семь лет около 4–6 мм, что составляет примерно 1 мм в год. Названы ряд возможных причин нарастания роста необратимых перемещений; сделаны выводы о необходимости продолжения исследований в данном направлении с привлечением широкого круга научно-исследовательских организаций.

Разработке математических моделей сезонного изменения состояния бетонных плотин под действием нагрузок эксплуатационного периода, включая температурное воздействие внешней среды [58, 60, 145, 161], учет сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды, посвящены работы [33, 100, 146, 164, 165]. Результаты исследований характера взаимодействия плотины с вмещающим массивом скальных пород и водохранилищем, выполненные в ЦСГНЭО [84, 122, 167] и отражающие поведение плотины при статистических и сейсмических воздействиях, а также анализ оценки несущей способности системы «плотина – скальное основание – водохранилище», представлен в работах [20, 85, 107, 159].

Применяются и другие методы математического моделирования для оценки и прогнозирования [104, 118, 136, 140–144] прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований: на основе искусственных нейронных сетей

в сочетании с гибридным методом конечных элементов [60]; на основе динамического анализа состояния бетонных плотин в частотной области за счет изменения формы колебаний [175]; путем решения дифференциальных уравнений для моделирования деформаций на основе данных единой системы объединенных датчиков [172]; в результате использования теории нестационарных временных рядов для анализа структурных данных с использованием алгоритма максимизации ожидания с целью нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей [162]; использование совместного подхода технологии вейвлет-анализа для создания исходной модели данных о поведении плотины с последующим построением идентификационной модели, способной осуществлять связь между нагрузками и поведением плотины [161]; разработка алгоритма прогнозирования УВБ с целью оптимального режима «наполнения-сработки» водохранилища [10] и др.

Прогнозные математические модели на основе моделей динамического типа.

Несовершенство применения вышеперечисленных методов для моделирования деформаций сооружений вызвало необходимость новых подходов к решению этой проблемы. Ряд разработок на современном научном уровне, посвященных в основном системному анализу и рекуррентному оцениванию параметров движений и деформаций по многомерным рядам геодезических наблюдений с использованием пространственно-временных моделей состояния и фильтра Калмана – Бьюси был выполнен Панкрушиным В. К. [119]. В этих разработках рассматривались задачи прогнозирования движений и деформаций по результатам геодезических наблюдений. Были предложены новые подходы к изучению геодинамических систем (ГДС) и намечены пути их реализации на основе пространственно-временных рядов комплексных и геофизических наблюдений. При этом допускалась возможность переноса предлагаемых подходов с глобального и регионального уровней ГДС на локальный в виде объектов инженерной геодинамики, инженерных сооружений и технологического оборудования.

Среди работ высокого научного уровня в данной области исследований необходимо отметить работу Есикова Н. П. [61], в которой были решены задачи исследования современных движений земной коры (СДЗК) по геодезическим данным о горизонтальных перемещениях земной поверхности с учетом тектонофизических процессов, и предложена с позиций теории деформаций единая система обработки и анализа результатов повторных геодезических наблюдений за СДЗК.

Существенный вклад в методологический подход при разработке прогнозных математических моделей на основе динамического типа при изучении деформаций сооружений и земной коры внесен в работах Мазурова Б. Т. [67, 97].

В монографии Гуляева Ю. П. [46] обобщен авторский опыт теоретической и практической разработки проблемы прогнозирования деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений и др. Отмечено, что динамические модели более совершенны, обладают свойствами ряда методов для описания деформаций сооружения. Эти модели имеют подвижную структуру, соответствующую физической сущности развития процесса: учитывают инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой и реагируют на изменения во времени воздействующих факторов.

Одно из важных свойств динамических моделей заключается в том, что процессы деформации сооружений описываются моделями типа «вход – выход» или виде дифференциальных уравнений, т. е. в форме, которая аналогична принятой в строительной механике; при этом оценивание параметров динамических моделей производится на основе геодезических данных с учетом результатов других натурных наблюдений [42, 46]. При этом геодезические данные являются единственной информацией, позволяющей максимально освободиться от существующей неопределенности в знании закономерностей развития процессов деформации сооружений. Лишь по геодезическим данным можно выявить преобладающую детерминированную основу случайного процесса деформации, а это в свою очередь значительно повышает процент оправданных прогнозов.

1.6 Обоснование точности измерительной информации

Установление оптимальных норм точности геодезического контроля является важнейшей задачей, определяющей надежность оценки состояния и поведения сооружения. Одним из вариантов решения данной задачи является использование аппарата частотных характеристик. Полученное Гуляевым Ю. П. в работе [46] выражение между средними квадратическими ошибками m_y, m_T, m_u измерения амплитуд входа и выхода при прохождении гармонических воздействий через динамическую систему, учитывающее, на наш взгляд все особенности развития напряженно-деформированного состояния конструкций сооружения, имеет вид:

$$m_y = \sqrt{\frac{\beta_1^2 m_T^2 + \beta_2^2 m_u^2}{1 + 2\varphi \cos \omega_0 \Delta t + \varphi^2}}. \quad (1)$$

Здесь параметры $\varphi, \beta_1, \beta_2$ берутся по результатам моделирования аналогичных процессов: φ – коэффициент динамики, β_1, β_2 – коэффициенты, характеризующие степень влияния на T_k и u_k (соответственно – температура воздуха и гидростатическое давление).

Формула (1) справедлива и для негармонических процессов при условии, что круговая частота $\omega_0 = 0$, а также пригодна и для расчета согласованной точности измерений входа и выхода динамической системы «сооружение – среда» как при короткопериодическом, так и при длиннопериодическом характере развития изучаемых процессов при условии соответствующего учета круговой частоты. Однако вопрос о точности измерений входа и выхода в виде гармонических процессов, содержащих высокочастотные колебания и основную гармонику низкочастотных колебаний, имеет неоднозначное толкование. В этом случае необходимо различать точность непосредственных измерений воздействующих факторов в определенные моменты времени и дисперсию этих факторов относительно изменения основной гармоники на определенном интервале времени. Очевидно, что ошибки непосредственных измерений обусловлены лишь точностью измеритель-

ных средств и условиями наблюдений, а дисперсия – физической природой высокочастотных колебаний и ошибками измерений. При этом время наблюдений входа должно определяться в зависимости от того, какой из процессов выбран для моделирования – длиннопериодический или короткопериодический, и от моментов геодезических наблюдений за выходом, которые, в свою очередь, должны улавливать характерные особенности развития выбранного процесса.

Таким образом, на моделирование короткопериодических процессов основное влияние будут оказывать ошибки непосредственных измерений и неправильного выбора моментов наблюдений. В случаях моделирования длиннопериодических процессов преобладающее влияние на точность измерений будет оказывать дисперсия высокочастотных колебаний, которые значительно превышают ошибки непосредственных измерений. В рассматриваемом процессе горизонтального перемещения плотины ГЭС основной наиболее выраженный источник высокочастотных колебаний представляют суточные изменения температура воздуха и гидростатического давления.

Можно предположить, что под влиянием суточных изменений температуры воздуха возникает реакция в виде короткопериодических перемещений плотины. В этом случае напрашивается вывод о необходимости организовать геодезические наблюдения в целях повышения их точности так, чтобы высокочастотные перемещения улавливались по середине их амплитуды или в одной из кульминаций. Однако можно ограничиться существующей методикой произвольного выбора моментов наблюдений относительно высокочастотных колебаний процесса. Для этого нужно предвычислить по (1) ошибку m_y при условии, что ошибка m_T будет определена по дисперсии высокочастотных колебаний температуры на интервалах времени между циклами геодезических наблюдений.

В ряде выполненных работ по прогнозированию осадок сооружений применяется методика верификации прогнозов [11], среди которых возможно применить в определенных условиях прямую, косвенную и инверсную верификацию. Широкое применение прямой и косвенной верификации применимо лишь при условии разработки достаточного количества равноценных по точности методов

прогнозирования одновременно в области прикладной геодезии и в области строительных наук. Однако в силу очень ограниченного или даже полного отсутствия в строительных науках точных методов прогнозирования деформаций, применение прямой и косвенной верификации сильно затруднено. Поэтому на данном этапе исследований основное внимание следует уделять инверсной верификации прогнозов, которая сводится к оценке адекватности модели по остаточным ошибкам аппроксимации конструируемой модели. При этом используется возможность того, что модель строится с периодом основания прогноза, не охватывающим всей прогнозной информации, оставляя при этом часть данной информации для выполнения контрольного прогнозирования.

Реализация контрольного прогнозирования позволяет исследовать адекватность модели на различных периодах упреждения путем сравнения фактических ошибок прогноза с полученными по модели, например, с использованием оценок автокорреляции на основании формулы Бартлетта, позволяющей выявить степень адекватности строящейся математической модели. В случае неадекватности возможно уточнение математической модели с использованием остаточных ошибок. Далее, используя уже весь период прогнозной информации, контроль прогнозирования возможно выполнять по результатам вновь выполненных натурных наблюдений с использованием уточненной прогнозной модели.

Из работы [11] известно, что одной из наиболее удовлетворительных оценок автокорреляции при задержке k может служить выражение:

$$r_k = \frac{c_k}{c_0},$$

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}),$$
(2)

где $k = 1, 2, 3 \dots 44$;

K – выборочная оценка автоковариации;

\bar{z} – выборочное значение временного ряда.

Для практических целей достаточно округлять автокорреляцию до двух знаков после запятой; при этом выборочная авторреляционная функция характеризуется знакопеременной корреляцией с тенденцией к затуханию по мере роста задержки. В предположении, что ряд полностью случайный, для всех задержек используется формула Бартлетта, имеющая вид [11]

$$D \approx \frac{1}{N} \left\{ 1 + 2 \sum_{v=1}^q p_v^2 \right\}, k > q. \quad (3)$$

Для практического использования при изучении любого случайного временного ряда теоретические автокорреляции p_v заменяются вычисленными автокорреляциями r_k . Вычисляя соответствующую стандартную ошибку для $q = 0$ и сравнивая ее с выборочными автокорреляциями, вычисленными для задержек, больших единицы, можно сделать вывод об адекватности математической модели (в случае, если выборочные автокорреляции меньше стандартной ошибки, модель считается адекватной).

Выводы по первому разделу

– геодезические исследования в настоящее время развиваются и совершенствуются в большей степени в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и, особенно, прогнозированию уделяется в них недостаточное внимание;

– прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования, можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек;

– динамические модели имеют подвижную структуру, соответствующую физической сущности развития процесса: учитывают инерционный характер

взаимодействия сооружения с окружающей средой и реагируют на изменения во времени воздействующих факторов;

– разработка прогнозных математических моделей является обязательным условием диагностического контроля плотины Саяно-Шушенской ГЭС в соответствии с принятой «Методикой определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [101] и рекомендациями Федерального закона [106];

– прогнозные модели, основанные на данных натуральных геодезических наблюдений, позволяют оценить состояние сооружения как потенциально опасное состояние, когда в течение длительного периода наблюдений интенсивность осадок не уменьшается, и как предаварийное, когда наблюдается увеличение интенсивности осадок во времени (высокая приточность).

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И МЕТОДИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ПОСТРОЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДИНАМИЧЕСКОГО ТИПА НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ 1-ГО И 2-ГО ПОРЯДКОВ

2.1 Общие положения прогнозирования

Объектом прогнозирования является процесс деформации основания и несущих конструкций гидротехнического сооружения. Все исследуемые деформационные процессы выражаются через линейные вертикальные и горизонтальные перемещения наблюдаемых контролируемых точек, заложенных в теле плотины таким образом, чтобы по измеренным значениям перемещений можно было выявить необходимый вид деформаций.

Прогнозирование осуществляется на основе результатов геодезических наблюдений за деформациями статистическим методом прогнозной экстраполяции; может также выполняться с помощью кинематических или динамических моделей в зависимости от полноты и количества имеющихся исходных данных. Кинематические модели в большей степени отражают зависимость величин деформаций от промежутка времени, в то время как динамические модели (различных типов) описывают исследуемые процессы деформаций с учетом совместного влияния как времени, так и основных возмущающих факторов; следовательно, кинематические модели строятся только по результатам геодезическим наблюдений, а динамические модели – по результатам комплексных натурных наблюдений.

Эндогенной переменной предмета прогнозирования является количественная величина перемещения, которая может быть получена в процессе геодезических наблюдений в форме динамического ряда. Результаты геодезических наблюдений рассматриваются как дискретное представление непрерывного случайного исследуемого процесса, при этом за отдельные реализации принимаются изменяющиеся во времени значения перемещения каждой контролируемой точки, а за сечение – случайная величина перемещения в конкретном цикле наблюдений.

В результате, значения перемещений всех наблюдаемых контролируемых точек представляют собой семейство реализаций случайного процесса, по которому возможно в каждом исследуемом цикле наблюдений установить эмпирический закон распределения случайной величины перемещения, а по распределению случайной величины перемещения в нескольких циклах наблюдений – выявить закон случайного процесса перемещения точек. В результате может быть получена наиболее полная математическая модель наблюдаемого процесса перемещения, которая может быть выражена через количественные характеристики (оценки) случайного процесса [104, 108, 109, 135, 147].

В модели динамического типа эндогенная переменная является выходной переменной. В то же время, в качестве выходной переменной в прогнозной модели динамического типа, построенной на основе геодезических данных, может быть использован не только сам процесс перемещения, но и связанный с ним функционально любой другой наблюдаемый стационарный стохастический процесс, характеризующий напряженно-деформированное состояние сооружения [42, 43].

За экзогенную переменную в моделях кинематического типа принимается в основном фактор времени, а к прогнозному фону (периоду, на котором строится прогнозная модель) относятся другие воздействующие факторы, в качестве которых могут быть использованы: инженерно-геологические, конструктивные, строительно-эксплуатационные и другие условия работы сооружений. Влияние прогнозного фона учитывается главным образом для корректного выбора периодов основания прогноза и упреждения таким образом, чтобы оба периода охватывали одинаковую природу развития исследуемого процесса деформации сооружения. Экзогенной переменной в моделях динамического типа принимаются наблюдаемые основные воздействующие факторы прогнозного фона, которые используются апостериорно в виде основных входных воздействий.

При использовании прогнозных кинематических моделей их гибкое изменение на входное воздействие, для изучения исследуемого процесса прогнозирования, выполняется при условии принципа непрерывности прогнозирования. Для этих целей в прогнозных динамических моделях следует также соблюдать прин-

цип непрерывности, но возможность моделей данного типа гибкого реагирования на изменение основного входного воздействия заложена в самих динамических моделях в силу способности реагировать на инерционное запаздывание, и необходимость их корректирования появляется в случае недопустимого возрастания реальных ошибок прогнозирования на контрольных периодах упреждения.

Прогнозирование деформаций гидротехнических сооружений, выполняемое по результатам геодезических наблюдений, обеспечивает получение практически всех видов прогнозов: поискового, нормативного, точечного, интервального, краткосрочного, среднесрочного, долгосрочного, дальнесрочного и оперативного.

Нормативное и поисковое прогнозирование осуществляется при решении задачи своевременного повышения надежности и долговечности гидротехнических сооружений, обеспечивающих безопасность в процессе их эксплуатации, а также для оптимизации циклов геодезических наблюдений за исследуемым процессом деформации сооружения. Сроки стабилизации осадки и других типов деформации возможно получить при нормативном прогнозировании, когда в процессе моделирования имеется возможность устанавливать критерии допустимых значений наблюдаемых перемещений контролируемых точек на данном сооружении в естественных условиях.

Комбинирование точечного и интервального прогнозов осуществляется при использовании для описания прогнозной математической модели двух первых условных моментных функций исследуемого случайного процесса наблюдаемого перемещения контролируемых точек. Условное математическое ожидание, определяемое по плотности распределения случайного процесса, позволяет наилучшим образом определять искомые прогнозные значения перемещения каждой контролируемой точки, а по условной корреляционной функции, отражающей рассеивание плотности условного распределения, возможно предвычислить точность прогнозов.

Ошибки фактических прогнозов и правильность предвычисленной их точности определяются главным образом продолжительностью периодов упреждения и согласования этих периодов с назначенными периодами основания прогно-

за. Существенное влияние на предвычисление точности прогнозирования оказывают вспомогательные сопутствующие факторы: условия функционирования сооружения, полнота и точность информации о будущем развитии прогнозного фона, вид используемой прогнозной математической модели.

Принцип верификации прогнозирования заключается в определении точности и проверке вычисляемых прогнозов с их фактическими значениями. В силу того, что точность предвычисляемых прогнозов исследуемых процессов перемещений контролируемых точек представляется в виде средних квадратических отклонений, то достоверность прогнозов представляется, как правило, численными значениями вероятности 0,68 или 0,95 соответственно для одинарного или удвоенного коридора погрешности прогноза [42, 43].

Одним из методов проверки обоснованности прогнозов на существующем этапе развития прогнозирования исследуемых процессов деформации гидротехнических сооружений является инверсная верификация, осуществляемая в процессе проверки адекватности строящейся прогнозной модели на периоде основания прогноза с использованием остаточных ошибок. С одной стороны, по остаточным ошибкам возможно оценить качество модели с точки зрения структурной идентификации модели, с другой, это качество прогнозирования на периоде контрольного упреждения по фактическим ошибкам прогнозов по их согласованности с предвычисленной точностью прогнозов. Кроме того, имеется возможность проверять обоснованность прогнозов, полученных по построенным моделям для различных периодов основания прогноза. В некоторых случаях возможно выполнять дополнительную верификацию путем сравнения результатов прогнозирования одного и того же процесса в различные временные интервалы.

Организация получения прогнозных значений перемещений контролируемых точек зависит от уровня обеспечения гидроцехов ГЭС современными ПЭВМ и подготовленными квалифицированными работниками. Как правило, на данном этапе необходимо осуществлять прогнозирование в научно-исследовательских организациях, и уже после этого передавать окончательные результаты для использования в гидроцехах ГЭС. Результаты прогнозирования могут быть предъ-

явлены в виде распечаток с персональных электронно-вычислительных машин (ПЭВМ), в которых представлены прогнозные значения контролируемых точек и характеристики их точности в удобной табличной форме, что дает возможность достаточно оперативно находить прогнозы для конкретных условий без применения ПЭВМ; в виде представленных графически критериев допустимых значений наблюдаемых перемещений точек, если имеется возможность их применения при данном состоянии сооружения. В последующем своем развитии выполняющая прогнозирование организация обязана ориентироваться на применение в гидроце-хах микро-ЭВМ, а в последующем – на включение прогнозирующей подсистемы в информационно-измерительную автоматизированную систему геодезического контроля за состоянием сооружений ГЭС.

Критерии допустимых значений наблюдаемых точек сооружения возможно вычислять по построенным прогнозным моделям в процессе прогнозирования на ПЭВМ или с помощью табличной формы представления прогнозов для возможного в условиях нормальной эксплуатации сооружения совместного влияния основных воздействующих факторов. Выход наблюдаемых по факту величин значений перемещений за границы установленных критериев свидетельствует об изменении состояния гидротехнического сооружения и требует детально специального обследования условий функционирования гидротехнического сооружения. Дополнительным критерием могут оказаться фактические ошибки выполненного прогнозирования, а величину их возрастания целесообразно связать с изменением состояния сооружения и поводом или указанием для обновления модели [42,43].

2.2 Геодезические наблюдения за деформациями высоконапорных бетонных плотин как интегральная количественная форма объективной и точной информации о сложном взаимодействии сооружения с грунтовым основанием и внешней средой

Геодезические наблюдения – это исходная информация для прогнозирования деформаций гидротехнических сооружений являются. Они являются одними

из главных и незаменимых видов натуральных наблюдений для исследования гидротехнических сооружений. Эти наблюдения направлены на решение трех взаимосвязанных проблем: наблюдение за процессами перемещений точек сооружений, анализ результатов наблюдений и прогнозирование процессов перемещений наблюдаемых точек, что, по существу, определяет современное толкование системы мониторинга сооружений.

В настоящее время геодезические исследования развиваются и совершенствуются, в большей степени, в части повышения оперативности и точности наблюдений, тогда как анализу и, особенно, прогнозированию уделяется в них недостаточное внимание. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, которые допустимо рассматривать как опережающие время результаты наблюдений, а математические модели, построенные для прогнозирования, можно использовать для анализа механизма протекающих в сооружениях процессов на основе обобщенных закономерностей развития перемещений наблюдаемых точек.

В работах Гуляева Ю. П. [42–46] представлен авторский опыт теоретической и практической разработки проблемы прогнозирования деформаций сооружений на основе результатов геодезических наблюдений. Наиболее важными, с нашей точки зрения, являются следующие методологические и теоретические положения, которые явились основой для наших дальнейших исследований, отраженных в работах [76–80, 127, 148, 149]:

– предложена базовая прогнозная модель в динамической форме в виде двух первых условных моментных функций исследуемого процесса деформации сооружения; данная модель синтезирует закономерности ее развития и позволяет на основе общих закономерностей находить прогнозы перемещений каждой наблюдаемой точки сооружения; предвычисляет коридор погрешностей прогнозирования, возникающих от совместного влияния ошибок геодезических измерений и неучтенных при моделировании факторов;

– анализ амплитудно-частотных и фазочастотных характеристик процесса перемещений сооружения, описываемого дифференциальными или рекуррентными уравнениями 1-го и 2-го порядка, показал, что эти уравнения обладают хорошими сглаживающими свойствами и позволяют учитывать инерционное запаздывание продолжительностью, равной соответственно одной четверти и половине периода основной гармоники.

2.3 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентного уравнения 1-го порядка

Динамические модели для описания процесса перемещений наблюдаемых точек могут быть представлены типами «вход – выход» или, в пространстве состояний с операторами связи, в виде дифференциальных или рекуррентных уравнений [46], которые по своей сути являются непрерывной и дискретной формами описания процессов. При этом связь между дискретной и непрерывной формами описания реализуется путем совпадения переходных характеристик в узлах дискретизации процесса.

Первая компонента представляет динамические свойства исследуемой системы «сооружение – среда», т. е. характеризует собой долю перемещения контролируемых точек сооружения, которая осуществляется по инерции в результате ранее возникшего движения гидротехнического сооружения.

Вторая компонента динамической модели представляет собой долю перемещения, которое возникло под влиянием основных воздействующих факторов; преимущественно, это гидростатическое давление и температура бетона в верхней или нижней точках плотины.

Третья компонента представляет собой долю перемещения, возникшего в процессе суммарного действия всех оставшихся воздействующих факторов, которые не были учтены двумя первыми компонентами модели. При этом суммарный процесс влияния неучтенных воздействующих факторов принято называть шумо-

вой компонентой, и этот процесс рассматривается как еще одно дополнительное входное воздействие, для которого выявленные процессы поведения сооружения можно представить в виде модели авторегрессии, которая дополняет динамическую модель.

Наблюдаемые процессы деформации сооружений, в их силу непрерывности и монотонности развития, описываются с достаточной точностью дифференциальными или рекуррентными уравнениями 1-го и 2-го порядков. Звено 1-го порядка учитывает инерционное запаздывание реакции сооружения на гармоническое входное воздействие продолжительностью до одной четверти гармоники, а звено 2-го порядка – до половины гармоники. Таким образом, для сезонных гармонических изменений температуры воздуха и гидростатического давления, являющихся основными входными воздействиями при описании годовых изменений перемещений, звено 1-го порядка учитывает инерционное запаздывание продолжительностью до трех месяцев, звено 2-го порядка – продолжительностью до шести месяцев.

Динамические модели стохастического вида позволяют объединить в себе основные свойства методов математического описания процессов деформации гидротехнических сооружений и включают в себя три основные компоненты, которые характеризуют в целом развитие во времени исследуемого процесса перемещения контролируемых точек сооружения [42–46].

Дискретное выражение рекуррентного уравнения стационарной динамической модели 1-го порядка для изучения процесса перемещения точек сооружения для одного входного воздействия имеет вид:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta u_k + \gamma \omega_k. \quad (4)$$

Коэффициенты φ , β , γ характеризуют соответственно динамические свойства изучаемой системы, степень влияния входного воздействия и шумовой компоненты.

В модели (4) целесообразно выделить постоянную составляющую, обусловленную среднегодовым влиянием на гидротехническое сооружение температуры воздуха, гидростатического давления и др. Обозначим эту составляющую через величину x_0 .

Очевидно, что $x_0 = \beta_0 u_0$, где u_0 – постоянное входное воздействие, а β_0 – степень влияния последнего. Поскольку u_0 и x_0 , как правило, не наблюдаются, то необходимо оценивать в целом значение x_0 . Данная процедура позволяет не только определить x_0 , но и упрощает вычисления, тем самым увеличивая степень обусловленности системы нормальных уравнений, решаемых при оценивании параметров, и повышает устойчивость модели.

На первом этапе построения динамических моделей методом наименьших квадратов (МНК) осуществляется оценка параметров φ, β, x_0 по результатам наблюдений за входом $\{u_k\}$ и выходной переменной $\{x_k\}$ на периоде основания прогноза $k = 1, 2, \dots, N$. Для оценивания необходимо представить условное математическое ожидание дискретного уравнения (4), которое определяется выражением:

$$M\{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi x_{k-1} + \beta u_k. \quad (5)$$

Формула (5) записана из условия, что ω_k – случайный процесс с нулевым математическим ожиданием, а оценка $\hat{x}_{k/k-1}$ включает в себя тренд, т. е. детерминированную основу наблюдаемого процесса. Оценивание в этом случае осуществляется путем минимизации функционала вида:

$$F(\varphi, \beta, x_0) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2. \quad (6)$$

Оценки параметров φ, β, x_0 находятся из решения следующей системы нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N x_{k-1} u_k &= \sum_{k=2}^N x_k x_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} u_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N u_k^2 &= \sum_{k=2}^N x_k u_k, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N u_k + x_0 N &= \sum_{k=2}^N x_k. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Отметим при этом, что количество циклов наблюдений N , выполненных на периоде основания прогноза, можно свести при необходимости к минимуму, достаточному для решения системы (7), но эти циклы должны охватывать основные закономерности развития наблюдаемого процесса, соответствующие выбранным периодам основания прогноза и упреждения. Правомерность подобной рекомендации основывается на конструктивном применении вероятностно-статистических методов для выявления детерминированной составляющей процесса [46].

Система нормальных уравнений (7) может оказаться слабо обусловленной из-за недостаточной вариации значений x_k и u_k . Поэтому, чтобы снизить возможность появления слабо обусловленных систем уравнений и упростить процесс вычисления, целесообразно решать задачу оценивания параметров φ, β, x_0 с использованием такого методического приема, как центрирование процесса, выполняемого в два этапа.

На первом этапе первоначально оцениваются параметры φ, β , для чего выполняется центрирование процесса, т. е. осуществляется переход от x_k и u_k к их центрированным по времени значениям ($\dot{x} = x_k - \bar{x}$ и $\dot{u} = u_k - \bar{u}$, где \bar{x} и \bar{u} – это средние величины перемещения и входного параметра – гидростатического давления на выбранном временном интервале, взятом за период основания прогноза). И уже по центрированному процессу минимизируется функционал вида:

$F_1(\varphi, \beta) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2$, в этом случае система нормальных уравнений (7) принимает более простой вид:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{u}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{u}_k. \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

После вычисления прогнозных значений оценок параметров $\hat{\phi}$, $\hat{\beta}$ вычисляется \hat{x}_0 по формуле: $\hat{x}_0 = \bar{x}(1 - \hat{\phi}) - \hat{\beta}\bar{u}$.

Вычислив оценки ϕ , β , x_0 , приступают ко второму этапу оценивания, который начинается с вычисления остаточных ошибок ε_k . Вычисление остаточных ошибок осуществляется на периоде основания прогноза с использованием выражения:

$$\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma\omega_{k-1} \quad (9)$$

где x_k – фактические значения перемещений,

$\hat{x}_{k/k-1}$ – величины перемещений, вычисленные в результате одношагового прогноза, который осуществляется на каждом шаге от фактического значения перемещения в предыдущем цикле наблюдений.

Остаточные ошибки характеризуют, с одной стороны: – корректность построения модели с точки зрения структурной идентификации, а с другой, – это характеристика свойств шумовой компоненты ω_k , т. е. используя остаточные ошибки, можно произвести математическое описание процесса шума ω_k известными моделями авторегрессии 1-го или 2-го порядков [11]. По существу построение модели шумовой компоненты представляет собой расширение вектора состояний.

Для определения порядка модели авторегрессии и выполнения второго этапа оценивания вычисляются асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции остаточных ошибок по формуле [11]:

$$\hat{K}_\varepsilon[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (10)$$

где временной сдвиг $m = 0, 1, 2 \dots M \langle N$.

По оценкам $\hat{K}_\varepsilon[m]$ строится график корреляционной функции, который будет иметь вид, близкий к одному из тех, которые представлены на рисунке 28.

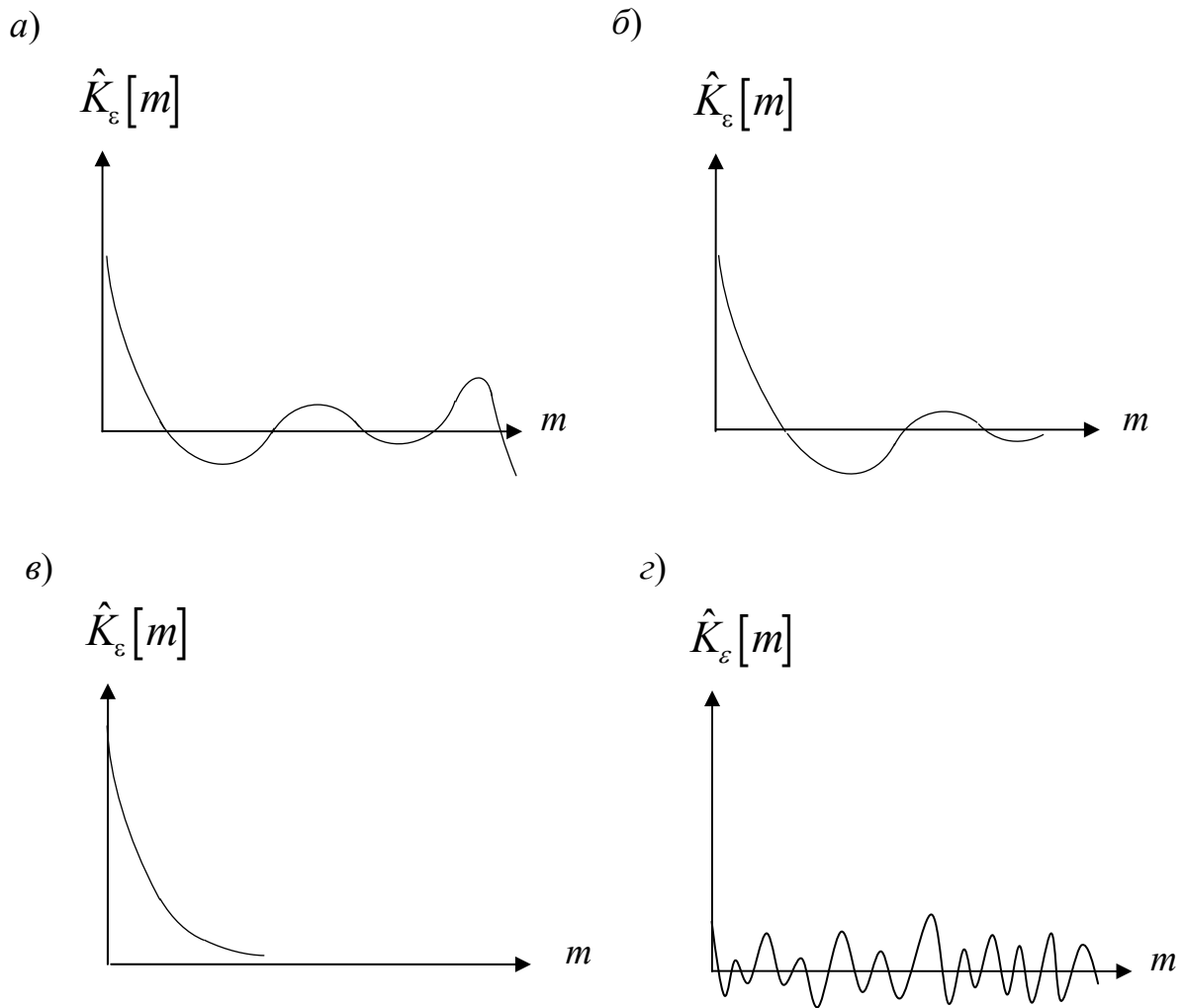


Рисунок 28 – График корреляционной функции: а) модель 1; б) модель 2; в) модель 3; г) модель 4

Автокорреляционная функция вида (рисунок 28, а) свидетельствует о том, что отсутствие затухания у корреляционной функции логично истолковать в том смысле, что изучаемый процесс ведет себя нестационарно. Это свидетельство некорректности строящейся математической модели, ее необходимо подправлять.

В случае, когда график корреляционной функции имеет вид (рисунок 28, б), т. е. затухание происходит экспоненциально, то описание шумовой компоненты следует выполнять моделью авторегрессии 1-го порядка (*AP1*). Если получена корреляционная функция вида (рисунок 28, в), то описание шумовой компоненты осуществляется моделью авторегрессии 2-го порядка (*AP2*). Если корреляционная

функция незначительно и случайно колеблется около оси времени, то она представляет собой белый шум, вид (рисунок 28, z), т. е. некоррелированный процесс и ее дальнейшее исследование не имеет смысла.

Шумовая компонента модели авторегрессии 2-го порядка [43, 46, 122] имеет вид:

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (11)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

Оценка этих параметров производится путем минимизации функционала

вида: $F_2(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu\hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta\hat{K}_\varepsilon[m-2])^2$. Следовательно, μ, η находят-

ся из решения соответствующей системы нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m-1])^2 + \hat{\eta} \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m-1]\hat{K}_\varepsilon[m-2] - \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m]\hat{K}_\varepsilon[m-1] &= 0, \\ \hat{\mu} \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m-1])\hat{K}_\varepsilon[m-2] + \hat{\eta} \sum_{m=1}^M (\hat{K}_\varepsilon[m-2])^2 - \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m]\hat{K}_\varepsilon[m-2] &= 0. \end{aligned} \quad (12)$$

Оценка коэффициента γ осуществляется по формуле [43, 46]

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\frac{\hat{K}_\varepsilon[0]}{\hat{K}_\omega[0]}}, \quad (13)$$

где $\hat{K}_\omega[0] = \frac{1 - \hat{\eta}}{(1 + \hat{\eta})[(1 - \hat{\eta})^2 - \hat{\mu}^2]}$.

Модель шумовой компоненты, дополняющая представленную выше динамическую модель (4), по аналогии с моделями 1-го порядка, представляется в виде авторегрессионных зависимостей первого порядка (AR1) или второго порядка (AR2) и имеет то же решение.

Вследствие приведенного выше обоснования процедуры центрирования процесса, рекуррентное уравнение динамической системы 1-го порядка для двух входных воздействий принимает уже следующий вид:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (14)$$

В этом случае минимизируется функционал вида:

$F(\varphi, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2$, а условное математическое ожидание имеет вид:

$$M\{x_k / x_{k-1}, u_k, T_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi x_{k-1} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k.$$

Оценки параметров $\varphi, \beta_1, \beta_2$ получаются в результате решения системы нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \beta_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} T_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k^2 + \beta_2 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k T_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{u}_k, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{T}_k + \beta_2 \sum_{k=2}^N T_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_k. \end{aligned} \quad (15)$$

2.4 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентного уравнения 2-го порядка

Прогнозирование процессов деформаций при эксплуатации гидротехнических сооружений в большинстве случаев с необходимой точностью может быть реализовано в результате применения линейных стационарных динамических моделей, являющихся вариантами комплексной динамической модели [42–46]. Так, например, модель типа «вход – выход» со структурой в виде инерционного звена 2-го порядка, описывающая процесс перемещения для одной наблюдаемой точки

под воздействием двух основных факторов, в общем виде имеет следующее рекуррентное выражение:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (16)$$

где x_k – выходная переменная, т. е. значение перемещения на k -м шаге дискретизации;

u_k, T_k – вход, выраженный значениями двух основных воздействующих факторов (гидростатическое давление и температура);

ω_k – шумовая компонента;

φ_1, φ_2 – коэффициенты динамики, отражающие соответственно степень влияния на x_k значений x_{k-1}, x_{k-2} ;

β_1, β_2, γ – коэффициенты, характеризующие соответственно степень влияния на x_k значений u_k, T_k и ω_k .

Такая структура модели позволяет учитывать инерционное запаздывание продолжительностью до половины основной гармоники, сохраняя при этом хорошие сглаживающие свойства математического описания, присущие звену 1-го порядка, и высокую точность описания, присущую звену 2-го порядка.

В силу того, что мы имеем возможность варьирования входными воздействиями, то можно строить математические модели как для одного, так и для двух воздействующих факторов. Главным условием в этом случае является условие простоты модели и обеспечение необходимой точности прогнозирования.

Решение уравнения (16) для одного входного воздействия u_k вида

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \gamma \omega_k \quad (17)$$

осуществляется в результате минимизации функционала:

$$F(\varphi_1, \varphi_2, \beta) = \sum_{k=2}^N (x_k - \hat{x}_{k/k-1})^2, \text{ при этом условное математическое ожидание имеет}$$

вид: $M\{x_k / x_{k-1}, u_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta u_k$. Оценки параметров

$\varphi_1, \varphi_2, \beta$ находят из решения систем нормальных уравнений, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \varphi_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{x}_{k-2} &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-2}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{x}_{k-1} + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{u}_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{u}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{u}_k. \end{aligned} \quad (18)$$

Рекуррентное уравнение динамической модели 2-го порядка для двух входных воздействий u_k и T_k имеет вид:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (19)$$

Решение уравнения (19) осуществляется в результате минимизации функционала вида: $F(\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$, условное математическое

ожидание имеет вид: $M\left\{x_k / x_{k-1}, u_k\right\} = \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 u_k + \beta_2 T_k$.

Оценки параметров $\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2$ находят из решения следующих систем нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-2}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{u}_k + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{u}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{u}_k, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{T}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{T}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{T}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_k. \end{aligned} \quad (20)$$

2.5 Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе декорреляции входных воздействий

Кроме описанных выше рекуррентных уравнений динамических моделей 1-го порядка и 2-го порядка для прогнозирования процесса перемещения могут использоваться и другие виды динамических моделей. Например, возможно конструировать прогнозную модель, состоящую из нескольких рекуррентных уравнений, которые в комплексе предназначены для решения общей сложной прогнозной задачи. Такой прогнозной задачей представляется декорреляция основных воздействующих факторов. В связи с тем, что основные воздействующие факторы могут иметь взаимную корреляционную зависимость, то возникает задача декорреляции этих воздействий, поскольку данная ситуация приводит, причем достаточно часто, к неустойчивости модели, если в ней учитываются совместно эти воздействия.

Во многих случаях сезонные изменения температуры воздуха почти функционально определяют характер развития гидростатического давления, поэтому при построении прогнозной модели решение задачи декорреляции основных воздействующих факторов осуществляется путем их последовательного ввода в строящуюся модель. При этом последовательность ввода определяется первичностью и вторичностью действия факторов, т. е. сначала вводится влияние температуры, а затем – гидростатического давления. В качестве такой декоррелированной модели 1-го порядка служит модель:

$$\begin{aligned}
 u_k &= \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k + u_0, \\
 x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k + x_0, \\
 \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k, \\
 \omega_k &= AP1 \text{ или } \omega_k = AP2.
 \end{aligned}
 \tag{21}$$

где u_k , T_k – входные воздействия в первых двух уравнениях модели, вызывающие перемещение x_k , которые являются соответственно гидростатическим давлением и температурой воздуха; эти входные факторы выражают зависимость гидростатического давления и перемещения от температуры воздуха. Третье уравнение

отражает зависимость Δx_k от Δu_k , где Δx_k – разности фактических и найденных по второму уравнению значений перемещения x_k , вычисленные на периоде основания прогноза, а Δu_k – соответствующие разности между фактическими и найденными по первому уравнению значениями входного фактора u_k .

Решение уравнения (21) осуществляется в три этапа: на первом этапе минимизируется функционал вида: $F_1(\varphi_1, \beta_1) = \sum_{k=2}^N \left(u_k - \hat{u}_{k/k-1} \right)^2$, на втором – функционал вида: $F_2(\varphi_2, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$, на третьем – $F_3(\varphi_3, \beta_3) = \sum_{k=2}^N \left(\Delta x_k - \Delta \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$.

Условные математические ожидания соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned} M \{ u_k / u_{k-1}, T_k \} &= \hat{u}_{k/k-1} = \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k, \\ M \{ x_k / x_{k-1}, T_k \} &= \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k, \\ M \{ \Delta x_k / \Delta x_{k-1}, \Delta u_k \} &= \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k. \end{aligned} \quad (22)$$

Оценки параметров $\varphi_1, \beta_1, \varphi_2, \beta_2, \varphi_3, \beta_3$ находят из решения систем нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_{k-1} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{u}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{u}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{T}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{u}_k \dot{T}_k, \end{aligned} \quad (23)$$

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{T}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_k, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1} \Delta \dot{u}_k &= \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_k \Delta \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1} \Delta \dot{u}_k + \hat{\beta}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{u}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_k \Delta \dot{u}_k. \end{aligned} \quad (25)$$

Модель (21), построенная с введением транспортного запаздывания, позволяет эффективно выполнять краткосрочные прогнозы. Так, например, на ее основе возможна разработка табличной формы прогнозирования, которая хорошо зарекомендовала себя на Красноярской ГЭС [42–46].

Декоррелированная модель 2-го порядка может быть представлена в виде:

$$\begin{aligned} u_k &= \varphi_1 u_{k-1} + \beta_1 T_k + u_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \varphi_3 x_{k-2} + \beta_2 T_k + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta u_k + \Delta x_0. \end{aligned} \quad (26)$$

Решение уравнения (26) осуществляется подобно решению уравнения (21).

Дополнительно отметим, что данные модели (21) и (26) во многих случаях декоррелируют входные воздействия и обладают хорошей устойчивостью.

Выводы по второму разделу

– значения перемещений всех наблюдаемых контролируемых точек представляют собой семейство реализаций случайного процесса, по которому возможно в каждом исследуемом цикле наблюдений установить эмпирический закон распределения случайной величины перемещения, а по распределению случайной величины перемещения в нескольких циклах наблюдений – выявить закон случайного процесса перемещения точек. В результате может быть получена наиболее полная математическая модель наблюдаемого процесса перемещения, которая может быть выражена через количественные характеристики (оценки) случайного процесса;

– в модели динамического типа эндогенная переменная является выходной переменной. В то же время, в качестве выходной переменной в прогнозной модели динамического типа, построенной на основе геодезических данных, может быть использован не только сам процесс перемещения, но и связанный с ним

функционально любой другой наблюдаемый стационарный стохастический процесс, характеризующий напряженно-деформированное состояние сооружения;

– динамические модели для описания процесса перемещений наблюдаемых точек могут быть представлены типами «вход – выход» или в пространстве состояний с операторами связи в виде дифференциальных или рекуррентных уравнений [46], которые по своей сути являются непрерывной и дискретной формами описания процессов;

– наблюдаемые процессы деформации сооружений, в силу их непрерывности и монотонности развития, описываются с достаточной точностью дифференциальными или рекуррентными уравнениями 1-го и 2-го порядков.

3 РЕЗУЛЬТАТЫ ПРАКТИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ КОНТРОЛИРУЕМЫХ ТОЧЕК СООРУЖЕНИЯ НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕННЫХ ПРОГНОЗНЫХ МОДЕЛЕЙ

3.1 Прогнозные математические модели для этапов эксплуатации плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции на этапах эксплуатации 2004–2005, 2005–2007 и 2007–2009 гг.

В данном разделе диссертации представлены результаты практических исследований при построении прогнозных моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения процесса перемещения, происходящего под воздействием различных входных воздействий по разрабатываемой методике для изучения поведения плотины Саяно-Шушенской гидроэлектростанции (СШГЭС).

Выбор рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для прогнозирования был обусловлен тем, что данный тип уравнений позволяет последовательно и наглядно, шаг за шагом, начиная с последних значений перемещений и остаточных ошибок на периоде основания прогноза, вычислять прогнозные значения контролируемых точек. В тоже время данный тип уравнений корректно учитывает инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой, реагируя на основные воздействующие факторы.

Для отработки методических решений при построении математических моделей в работах автора [45, 76–81, 127, 148, 149] представлены различные варианты построенных математических моделей для различных входных воздействий, периодов основания прогноза для этапов работы плотины 2004–2005, 2005–2007 и 2007–2009 гг.

Результаты исследований послужили основой для совершенствования методики построения прогнозных моделей и отработки последующих методических решений.

Динамические модели 1-го типа (1-го порядка). Построены две математиче-

ские модели, в которых в качестве основного входного фактора использовался уровень верхнего бьефа (гидростатическое давление), на различные периоды основания прогноза:

- ветвь нагружения и ветвь разгрузки (май 2004 г. – май 2005 г.);
- календарный год (с января 2004 г. по январь 2005 г.).

Построенные динамические модели 1-го типа (1-го порядка) с одним входным воздействием и дискретностью 30 дней $x(U_k)$ имеют вид [173]:

модель 1-го типа:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2268x_{k-1} + 1,4352u_k - 667,132 + 4,1713\omega_k, \\ \omega_k &= -0,7540\omega_{k-1} - 0,4171\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (27)$$

модель 2-го типа:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2196x_{k-1} + 1,5018u_k - 701,141 + 5,5321\omega_k, \\ \omega_k &= 0,2551\omega_{k-1} - 0,0625\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (28)$$

Результаты инверсной верификации по построенным моделям (27), (28) приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты инверсной верификации по построенным моделям

Модель 1-го типа				Модель 2-го типа			
Дата прогноза, месяц	$X_{\text{перемещение}},$ мм	$X_{\text{прогноз}},$ мм	ошибка $\Delta_1,$ мм	дата прогноза, месяц	$X_{\text{перемещение}},$ мм	$X_{\text{прогноз}},$ мм	Ошибка $\Delta_2,$ мм
Январь, 2005 г.	127,04	129,14	-2,10	Июнь, 2007 г.	101,45	96,31	+5,14
Февраль	120,26	113,16	+7,10	Июль	108,12	119,91	-11,79
Март	100,51	93,14	+7,37	Август	120,00	134,39	-14,39
Апрель	75,64	63,21	+12,43	Сентябрь	127,97	139,87	-11,90
Май	66,15	80,57	-14,42	Октябрь	134,35	140,11	-5,76
Июнь	91,80	101,77	-9,97	Ноябрь	133,48	135,51	-2,03
Июль	104,62	113,40	-8,78	Декабрь	126,09	125,86	+0,23
Август	116,67	121,52	-4,85	Январь, 2008 г.	116,67	114,72	+1,95
Сентябрь	130,00	134,03	-4,03	Февраль	102,86	101,28	+1,58
Октябрь	135,64	140,98	-5,34	Март	81,55	86,82	-5,27
Ноябрь	138,21	140,91	-2,70	Апрель	66,67	70,23	-4,27
Декабрь, 2005 г.	134,36	129,03	+5,33	Май	67,87	66,24	+1,62

Анализируя полученные результаты, можно сделать следующие выводы:

- построенные прогнозные модели позволяют отслеживать основные закономерности развития процесса деформации плотины и характеризуют близкие друг к другу прогнозные значения перемещений по обоим моделям;
- для модели 2004–2005 гг. большинство ошибок прогноза перемещений Δ_1 в сравнении с самими перемещениями лежат в пределах графической точности полученных исходных данных (неточность исходных графических данных вносит неточность в результаты прогнозирования), за исключением отдельных месяцев. Большие по величине ошибки прогнозирования приходятся на время конца срабатывания и начала нагружения плотины (апрель–июнь); очевидно, что инъецирование трещин [122] изменило характер работы плотины, что препятствует возврату плотины в исходное состояние. Представляется, что для данного периода работы плотины необходимо было бы строить отдельные прогнозные модели.

Построенная динамическая модель 2-го типа (1-го порядка) с двумя входными воздействиями, дискретностью 30 дней $x(U_k)$ и периодом основания прогноза с января 2004 по май 2007 г. имеет вид:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2127x_{k-1} + 1,8757u_k - 1,1782T_{k.\text{низ}} - 888,616 + 2,1216\omega_k, \\ \omega_k &= 0,7435\omega_{k-1} - 0,2989\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (29)$$

Результаты прогнозирования по математической модели (29) представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты прогнозирования по математической модели

Дата прогноза, Месяц	Перемещение, $x_{\text{вых}}$, мм	$X_{\text{прогноз}}$, мм	Ошибка Δ_k , мм
Июнь, 2007 г.	101,45	114,48	-13,03
Июль	108,12	124,45	-16,33
Август	120,00	131,39	-11,39
Сентябрь	127,97	135,73	-7,76
Октябрь	134,35	137,94	-3,59
Ноябрь	133,48	131,95	+1,53
Декабрь	126,09	123,25	+2,84
Январь, 2008 г.	116,67	113,57	+3,10
Февраль	102,86	98,95	+3,91
Март	81,55	74,61	+6,94
Апрель	66,67	63,43	+3,24

Проведенное исследование позволяет сделать следующие выводы:

– построенная прогнозная математическая модель отслеживает основные закономерности развития процесса деформации гребня плотины;

– для периода ветви нагружения (июнь–сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями в сравнении с самими перемещениями. Эта разница может быть объяснена тем, что высокая приточность в 2006 г. (особенно высокая – в июне) внесла свои коррективы в прогнозные модели, а данный год входит в период основания прогноза построения модели. Анализ данных [18] показал, что причиной роста максимальных радиальных перемещений явилось существенное изменение температуры бетона вблизи верховой грани, что хорошо видно на графике (рисунки 26, 27); это внесло свои изменения в работу плотины. Представляется, что для корректного прогнозирования построенную модель необходимо дополнить моделью, отражающей колебания температуры $T_{\text{верх}}$ при нештатных ситуациях работы плотины;

– при построении прогнозной модели для периода эксплуатации 2007–2009 гг. оказалось возможным увеличение периода основания прогноза (включение нескольких лет натурных наблюдений в период основания прогноза). Большинство полученных ошибок прогноза перемещений Δ_2 в сравнении с самими перемещениями для ветви срабатывания (октябрь – май) лежит в пределах точности исходных графических данных, что позволяет оценить точность прогнозной модели достаточно высокой. Однако для периода ветви нагружения (июнь – сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями, в сравнении с самими перемещениями. Эта разница может быть объяснена с использованием графика (рисунки 26, 27): видно, что произошел существенный отскок в изменении самих перемещений плотины, начиная с июня 2007 г., в сравнении общим прогнозным фоном. Очевидно, что инъецирование трещин (которое продолжалось по 2009 г.) вносит свои изменения в работу плотины. В связи с этим, представляется, что для данного периода работы (2007–2009 гг.) признать режим работы плотины «устоявшимся» не представляется возможным.

Динамические модели 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий за влияние температуры $T_{\text{низ}}$. В качестве основных входных факторов использовались уровень верхнего бьефа (гидростатическое давление) и температура для одного и того же периода основания прогноза: с января 2004 по май 2007 г. Различие в том, что при построении 2-го типа модели применялось транспортное запаздывание по температуре в один месяц:

модель 1-го типа:

$$\begin{aligned} u_k &= 0,6107u_{k-1} + 1,2680T_{k.\text{низ}} + 196,795, \\ x_k &= 0,7843x_{k-1} + 2,0927T_{k.\text{низ}} + 11,945, \\ \Delta x_k &= -0,0002\Delta x_{k-1} + 1,7600\Delta u_k + 0,203 + 4,0301\omega_k, \\ \omega_k &= -0,2588\omega_{k-1} + 0,0737\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (30)$$

модель 2-го типа:

$$\begin{aligned} u_k &= 0,2902u_{k-1} + 1,700T_{k.\text{низ}} + 362,603, \\ x_k &= 0,5441x_{k-1} + 2,4511T_{k.\text{низ}} + 37,132, \\ \Delta x_k &= -0,1050\Delta x_{k-1} + 1,8859\Delta u_k - 0,651 + 2,6624\omega_k, \\ \omega_k &= -0,3123\omega_{k-1} - 0,0239\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (31)$$

Результаты инверсной верификации представлены в таблице 4.

Таблица 4 – Результаты инверсной верификации

Дата прогноза, месяц	Перемещение, $x_{\text{вых}}$, мм	Модель 1-го типа		Модель 2-го типа	
		$X_{\text{прогноз}}$, мм	ошибка Δ_1 , мм	$X_{\text{прогноз}}$, Мм	ошибка Δ_2 , мм
Июнь, 2007 г.	101,45	97,71	+3,74	104,83	-3,38
Июль	108,12	119,95	-11,83	120,42	-12,30
Август	120,00	133,79	-13,79	131,47	-11,47
Сентябрь	127,97	139,74	-11,77	138,22	-10,25
Октябрь	134,35	140,54	-6,19	139,99	-5,64
Ноябрь	133,48	136,42	-2,94	136,91	-3,43
Декабрь	126,09	126,54	-0,45	127,66	-1,57
Январь, 2008 г.	116,67	114,85	+1,82	115,69	+0,98
Февраль	102,86	100,87	+1,99	100,41	+2,45
Март	81,55	85,65	-4,10	82,16	-0,61
Апрель	66,67	69,21	-2,54	62,85	+2,12
Май	67,87	66,85	+1,02	64,95	+2,42

Построенные прогнозные модели для периода эксплуатации 2007–2009 гг. позволяют отслеживать основные закономерности развития процесса деформации гребня плотины и характеризуют близкие друг к другу прогнозные значения перемещений по обеим моделям. При этом вторая прогнозная модель оказалась более корректной, с точки зрения точности прогнозирования.

Для периода ветви нагружения (июнь – сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями, в сравнении с самими перемещениями. Эта разница может быть объяснена тем, что высокая приточность в 2006 г. (особенно высокая – в июне) внесла свои коррективы в прогнозные модели, а данный год входит в период основания прогноза построенных моделей. Анализ данных [18] показал, что причиной роста максимальных радиальных перемещений явилось существенное изменение температуры бетона вблизи верховой грани, что хорошо видно на графиках (рисунки 26,27); это внесло свои изменения в работу плотины. Представляется, что для корректного прогнозирования построенные модели необходимо дополнить моделью, отражающей колебания температуры $T_{\text{верх}}$ при нестандартных ситуациях работы плотины.

Вопрос об увеличении периода основания прогноза для повышения точности прогнозирования при построении модели (включение нескольких лет натуральных наблюдений в период основания прогноза) остается на данный момент еще открытым. В последующем, при построении прогнозной модели для этапа эксплуатации плотины 2007–2009 гг. планируется достигнуть конкретный результат.

Отметим, что количество циклов наблюдений N , выполненных на период основания прогноза, можно свести при необходимости к минимуму, достаточному для решения системы (4); при этом эти циклы должны охватывать основные закономерности развития наблюдаемого процесса, соответствующие выбранным периодам основания прогноза и упреждения. Правомерность подобной рекомендации основывается на конструктивном применении вероятностно-статистических методов для выявления детерминированной составляющей процесса [42–46].

3.2 Прогнозные математические модели для этапа эксплуатации плотины после аварии 2009 г.

С целью выбора наиболее корректной математической модели для изучения поведения плотины СШ ГЭС после аварии 2009 г. были построены различные варианты математических прогнозных моделей на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (U_k – гидростатическое давление уровень верхнего бьефа (УВБ); $T_{k.низ}$; $T_{k.верх}$ – температура бетона в нижней и в верхней базовых точках), дискретностью ($D15$ и $D30$ – дискретность исходных данных 15 и 30 дней соответственно), декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием ($Z0$; $Z0,5$; $Z1,0$; $Z1,5$ и $Z2,0$ – соответственно 0; 0,5; 1,0; 1,5 и 2,0 месяца). Они представлены в работах [45, 76–81, 127, 148, 149].

Период основания прогноза для всех строящихся моделей составил: с 30 апреля 2007 г. по 15 мая 2008 г. Этот выбор обоснован тем, что данный временной интервал входит в период, когда плотина СШ ГЭС сохраняла монолитность после ремонта (1995–2003 гг.), воспринимая при этом расчетный напор [18, 19, 30–36], а также тем, что данный временной период является предшествующим аварии 19 сентября 2009 г.

В качестве исходных данных использовались данные из работ [18, 122], которые впоследствии корректировались, уточнялись по мере дополнительных публикаций как в сети интернет, так и в статьях в научных журналах [42, 101, 131, 159, 174].

Для построения прогнозных моделей были использованы следующие типы рекуррентных уравнений.

Динамическая модель 1-го типа (1-го порядка) с одним входным воздействием, дискретностью $D30$ дней и транспортным запаздыванием $Z0$ $x(U_k; x_0; D30; Z0)$ вида:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,323 \ 2x_{k-1} + 1,333 \ 0U_k - 626,500 + 1,318 \ 0\omega_k, \\ \omega_k &= 1,078 \ 4\omega_{k-1} - 0,562 \ 0\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (32)$$

Динамические модели 2-го типа (1-го порядка) с двумя входными воздействиями и транспортным запаздыванием Z имеют следующий вид:

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D30; Z0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,128\ 5x_{k-1} + 1,984\ 6U_k - 1,577\ 0T_k - 936,269 + 0,987\ 5\omega_k, \\ \omega_k &= 0,985\ 1\omega_{k-1} - 0,697\ 1\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (33)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D30; Z0,5):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,197\ 9x_{k-1} + 1,977\ 4U_k - 1,486\ 7T_k - 940,565 + 1,291\ 7\omega_k, \\ \omega_k &= 0,938\ 0\omega_{k-1} - 0,618\ 2\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (34)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D30; Z1,0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,278\ 4x_{k-1} + 1,792\ 7U_k - 1,075\ 4T_k - 855,137 + 1,340\ 3\omega_k, \\ \omega_k &= 1,026\ 9\omega_{k-1} - 0,593\ 1\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (35)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D30; Z1,5):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,321\ 9x_{k-1} + 1,266\ 3U_k - 0,171\ 7T_k - 590,373 + 1,341\ 4\omega_k, \\ \omega_k &= 1,062\ 4\omega_{k-1} - 0,549\ 2\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (36)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D30; Z2,0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,222\ 6x_{k-1} + 0,736\ 1U_k + 1,812\ 9T_k - 315,663 + 1,559\ 3\omega_k, \\ \omega_k &= 0,843\ 3\omega_{k-1} - 0,439\ 8\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (37)$$

Динамическая модель 1-го типа (1-го порядка) с одним входным воздействием, дискретностью $D15$ дней и транспортным запаздыванием $Z0$ имеет вид:

$$x(U_k; x_0; D15; Z0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,431\ 2x_{k-1} + 1,093\ 1U_k - 512,209 + 1,765\ 4\omega_k, \\ \omega_k &= 0,933\ 8\omega_{k-1} - 0,176\ 8\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (38)$$

Динамические модели 2-го типа (1-го порядка) с двумя входными воздействиями, дискретностью $D15$ дней и транспортным запаздыванием Z имеют следующий вид:

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1843x_{k-1} + 1,7858U_k - 1,3775T_k - 839,408 + 0,8279\omega_k, \\ \omega_k &= 1,4969\omega_{k-1} - 0,7452\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (39)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0,5):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2833x_{k-1} + 1,6593U_k - 1,1743T_k - 785,056 + 1,0372\omega_k, \\ \omega_k &= 1,4406\omega_{k-1} - 0,6880\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned}$$

(40)

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z1,0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,4889x_{k-1} + 0,8490U_k + 0,2160T_k - 392,013 + 1,1402\omega_k, \\ \omega_k &= 1,2679\omega_{k-1} - 0,4914\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (41)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z1,5):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,4348x_{k-1} + 0,9128U_k + 0,3519T_k - 420,603 + 1,0739\omega_k, \\ \omega_k &= 1,3439\omega_{k-1} - 0,5341\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (42)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z2,0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,3218x_{k-1} + 0,5927U_k + 1,6304T_k - 249,804 + 1,7192\omega_k, \\ \omega_k &= 0,8682\omega_{k-1} - 0,1992\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (43)$$

Динамические модели 2-го порядка с двумя входными воздействиями, дискретностью $D15$ дней и транспортным запаздыванием Z имеют вид:

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1117x_{k-1} + 0,0652x_{k-2} + 1,8371U_k - 1,3854T_{k.\text{низ}} - 852, + 0,7576\omega_k, \\ \omega_k &= 1,5204\omega_{k-1} - 0,7637\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (44)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z0,5):$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1805x_{k-1} + 0,0935x_{k-2} + 1,7327U_k - 1,1970T_k - 800,804 + 0,9904\omega_k, \\ \omega_k &= 1,4412\omega_{k-1} - 0,6889\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (45)$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z1, 0):$$

$$x_k = 0,258\ 0x_{k-1} + 0,112\ 1x_{k-2} + 1,451\ 8U_k - 0,700\ 1T_k - 688,802 + 1,077\ 6\omega_k, \quad (46)$$

$$\omega_k = 1,425\ 9\omega_{k-1} - 0,647\ 5\omega_{k-2} + \xi_k.$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z1, 5):$$

$$x_k = 0,226\ 2x_{k-1} + 0,110\ 1x_{k-2} + 1,456\ 6U_k - 0,719\ 6T_k - 808,602 + 1,050\ 3\omega_k, \quad (47)$$

$$\omega_k = 1,405\ 9\omega_{k-1} - 0,627\ 1\omega_{k-2} + \xi_k.$$

$$x(U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; D15; Z2, 0):$$

$$x_k = 0,201\ 8x_{k-1} + 0,110\ 1x_{k-2} + 1,445\ 2U_k - 0,705\ 8T_k - 800,704 + 1,014\ 1\omega_k, \quad (48)$$

$$\omega_k = 1,412\ 1\omega_{k-1} - 0,631\ 9\omega_{k-2} + \xi_k.$$

Модели 3-го типа (1-го порядка) с двумя входными воздействиями, дискретностью $D15$ дней и транспортным запаздыванием $Z0$ имеют следующий вид:

$$\Delta x(\Delta U_k; T_{k.\text{низ}}; x_0; U_0; D15; Z0):$$

$$U_k = 0,718\ 0U_{k-1} + 0,775\ 4T_{k.\text{низ}} + 142,243,$$

$$x_k = 0,817\ 4x_{k-1} + 1,121\ 4T_{k.\text{низ}} + 11,523,$$

$$\Delta x_k = 0,006\ 2\Delta x_{k-1} + 1,622\ 4\Delta U_k + 0,133\ 8 + 1,229\ 0\omega_k,$$

$$\omega_k = 0,379\ 0\omega_{k-1} + 0,153\ 0\omega_{k-2} + \xi_k. \quad (49)$$

$$\Delta x(\Delta U_k; T_{k.\text{верх}}; x_0; U_0; D15; Z0):$$

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,7764U_{k-1} + 3,0060T_{k.\text{верх}} + 100,260, \\
x_k &= 0,5322x_{k-1} + 20,7204T_{k.\text{верх}} - 45,273, \\
\Delta x_k &= 0,3808\Delta x_{k-1} + 1,0372\Delta U_k - 2,957 + 1,9418\omega_k, \\
\omega_k &= 0,5736\omega_{k-1} - 0,2255\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned}
\tag{50}$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) с тремя входными воздействиями, дискретностью $D15$ дней и транспортным запаздыванием $Z0$ имеет следующий вид:

$$\Delta x(\Delta U_k; T_{k.\text{низ}} T_{k.\text{верх}}; x_0; U_0; D15; Z0):$$

$$\begin{aligned}
U_{k/k-1} &= 0,8612U_{k-1} + 0,6062T_{k.\text{низ}} - 0,0748T_{k.\text{верх}} + 68,848, \\
x_{k/k-1} &= 0,6555x_{k-1} + 1,0275T_{k.\text{низ}} + 13,2756T_{k.\text{верх}} - 31,219, \\
\Delta x_k &= 0,3803\Delta x_{k-1} + 1,0213\Delta U_k + 4,205 + 1,8630\omega_k, \\
\omega_k &= 0,4404\omega_{k-1} - 0,1255\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned}
\tag{51}$$

3.3 Примеры построения математической модели 1-го порядка для двух входных воздействий с использованием возможностей для численных расчетов прикладной программы MS EXCEL

Возможности прикладной программы MS EXCEL использовались для следующих численных расчетов: вычисления коэффициентов системы нормальных уравнений, вычисления автокорреляционной функции, вычисления остаточных ошибок и прогнозных значений радиальных перемещений контрольных базовых точек тела плотины (секция 33).

На рисунке 29 представлен фрагмент вычисления коэффициентов для решения системы нормальных уравнений с использованием исходных данных (приложение А): изменение диагностического показателя (X – радиальное перемещение гребня плотины секции 33) и параметров-аргументов (U – уровень верхнего бьефа (УВБ) и температура бетона в базовой точке $T_{\text{низ}}$ во времени).

Вычисленные средние величины перемещения гребня плотины и коэффициентов нормальных уравнений для построения прогнозной модели на примере рекуррентного уравнения 1-го порядка приведены в приложениях Б, В.

The screenshot shows a Microsoft Excel spreadsheet with the following data in the visible range (rows 3-26, columns A-R):

Row	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
3		75,35	-28,8785	7,35	0,6542	833,9655	0,4280	358,0485	-59,3230	-18,8932	510,82	-11,9988	-7,8500	21,0480	143,9723	-29,356	346,5082	
4		91,83	-12,3985	8,75	2,0542	153,7218	4,2199	29,7372	-42,2072	-25,4693	522,09	-0,7288	-1,4972	-55,4354	0,5312	-9,454	9,036571	
5		101,83	-2,3985	10,1	3,4042	5,7526	11,5888	3,7139	-12,6261	-8,1649	527,29	4,4712	15,2208	-17,4636	19,9912	1,010	-10,7239	
6		102,68	-1,5485	11,96	5,2642	2,3977	27,7121	-4,7871	-11,0626	-8,1515	530,1	7,2812	38,3297	-15,3006	53,0152	5,309	-11,2746	
7		107,32	3,0915	13,84	7,1442	9,5576	51,0400	31,0438	24,4053	22,0867	532,7	9,8812	70,5932	38,7405	97,6372	7,519	30,54797	
8		114,27	10,0415	14,59	7,8942	100,8325	62,3189	158,3705	74,4503	79,2702	535,35	12,5312	98,9238	143,0031	157,0298	12,074	125,8321	
9		120	15,7715	14,11	7,4142	248,7414	54,9708	279,4959	117,7224	116,9338	537,06	14,2412	105,5872	233,9101	202,8105	17,069	224,6049	
10		121,95	17,7215	14,16	7,4642	314,0529	55,7147	417,7239	118,8093	132,2777	537,65	14,8312	110,7032	267,6157	219,9631	19,110	262,8309	
11		127,8	23,5715	13,4	6,7042	555,6174	44,9467	653,4393	121,7289	158,0290	537,92	15,1012	101,2416	353,1288	228,0448	20,999	355,9574	
12		131,95	27,7215	11,86	5,1642	768,4837	26,6693	836,1242	97,4199	143,1604	537,8	14,9812	77,3661	402,8259	224,4350	23,984	415,3006	
13		134,39	30,1615	10,21	3,5142	909,7184	12,3498	942,5945	57,1329	105,9946	537,35	14,5312	51,0658	404,5010	211,1544	26,218	438,282	
14		135,48	31,2515	8,59	1,8942	976,6587	3,5881	919,4683	6,6950	59,1976	536,23	13,4112	25,4038	358,4912	179,8590	26,899	419,1192	
15		138,65	29,4215	6,91	0,2142	865,6269	0,0459	808,2549	-38,4177	6,3030	534,29	11,4712	2,4575	285,4229	131,5874	25,950	337,499	
16		131,7	27,4715	5,39	-1,3058	754,6854	1,7050	604,1414	-72,9581	-35,8715	532,52	9,7012	-12,6675	184,3657	94,1124	24,545	266,5056	
17		126,22	21,9915	4,04	-2,8558	483,6278	7,0531	389,7239	-99,7485	-58,4045	529,53	6,7112	-17,8233	87,9915	45,0396	20,706	147,5886	
18		121,95	17,7215	2,16	-4,5358	314,0529	20,5732	200,9895	-114,9378	-80,3808	526,82	4,0012	-18,1483	9,4129	16,0092	17,446	70,9066	
19		115,57	11,3415	0,21	-6,4858	128,6305	42,0652	69,6545	-88,7563	-73,5586	523,35	0,5312	-3,4449	-26,1859	0,2821	13,149	6,024102	
20		110,37	6,1415	-1,13	-7,8258	37,7185	61,2427	-14,5460	-50,2118	-48,0623	520,51	-2,3088	18,0685	-34,9997	5,3308	8,747	-14,1799	
21		101,86	-2,3685	-1,48	-8,1758	5,6096	66,8432	30,1942	16,9245	19,3640	517,12	-5,6988	46,5925	25,9082	32,4768	2,217	13,4975	
22		91,48	-12,7485	-0,45	-7,1458	162,5233	51,0620	296,7646	76,8198	91,0976	511,88	-10,9388	78,1665	204,9806	119,6584	-10,128	139,4535	
23		80,95	-23,2785	0,67	-6,0258	541,8868	36,3099	720,4326	120,4839	140,2706	506,74	-16,0788	96,8874	447,6180	258,5293	-22,763	374,2908	
24		73,28	-30,9485	1,52	-5,1758	957,8073	26,7886	1157,4248	122,1155	160,1821	503,59	-19,2288	99,5241	698,1616	369,7485	-31,499	595,1032	
25		66,83	-37,3985	2,75	-3,9458	1398,6449	15,5691	1562,4502	75,7607	147,5657	500,26	-22,5588	89,0120	824,9669	508,9015	-40,554	843,6661	
26		62,45	-41,7785	4,67	-2,0258	1745,4398	4,1037	0,0000	0,0000	84,6335	500,76	-22,0588	44,6861	0,0000	486,5927	-43,495	921,5847	
27																		
28		104,2285	0,0000	6,6958	0,0000	15455,8083	689,5263	13135,7279	447,9214	1139,3703	522,8188	0,0000	1123,6416	6106,1973	4183,0278		7047,609	
29																		
30		X		T														
31						x_{k-1}^2	T_k^2	$x_{k-1} \cdot x_k$	$x_{k-1} \cdot T_k$	$x_k \cdot T_k$			$T_k \cdot u_k$	$x_{k-1} \cdot u_k$	u_k^2	$\hat{x}_k/k-1$	$x_k \cdot u_k$	
32																		

Рисунок 29 – Фрагмент вычисления коэффициентов для решения системы нормальных уравнений

На рисунке 30 представлен фрагмент вычисления автокорреляционной функции для последующего составления модели шумовой компоненты авторегрессии 2-го порядка.

На рисунке 31 представлен фрагмент вычисления прогнозных значений радиальных перемещений, полученных с помощью модели 1-го порядка для различных значений транспортного запаздывания (0; 0,5; 1,0; 1,5; 2,0 месяцев). Для определения порядка модели авторегрессии вычислялись асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции (приложение Г) с использованием выражения (10). Значения коэффициентов корреляционной функции приведены в приложении Д.

Рисунок 31 – Фрагмент вычисления прогнозных значений
радиальных перемещений для модели 1-го порядка

На рисунках 29–31 показаны фрагменты построения математической модели 1-го порядка для двух входных воздействий с использованием возможностей для численных расчетов прикладной программы MS EXCEL. Подобным образом выполнялись расчеты для всех построенных прогнозных математических моделей динамического типа для изучения процесса деформаций гидротехнических сооружений.

3.4 Методические решения при построении прогнозных математических моделей

Одной из важнейших задач в процессе эксплуатации высоконапорных гидротехнических сооружений является обеспечение их надежной и безопасной работы. Отметим при этом, что большинство этих сооружений эксплуатируется уже длительное время, что повышает вероятность возникновения и развития различных, часто – негативных процессов, не рассматривавшихся при проектировании. Как показывает опыт натурных наблюдений за их поведением в процессе эксплуатации, состояние сооружений и их оснований в той или иной мере отличается от предполагаемого на стадии проектирования. Поэтому в целях оценки изменения диагностических показателей и более точной их корректировки должны быть разработаны и откалиброваны по данным натурных наблюдений прогнозные математические модели поведения сооружений [18, 30, 33, 46, 58, 101].

Процесс построения прогнозных моделей для изучения процесса перемещений высоких плотин, таких, как Саяно-Шушенская ГЭС, необходимо начинать с тщательного изучения природы и структуры объекта исследования, чтобы правильно сориентироваться в характере проявления причинно-следственных связей, которые присущи изучаемому процессу исследования. И только в результате анализа этих связей появляется возможность грамотно выбрать качественную форму и метод математического описания исследуемого процесса, определить необходимые объемы и точность наблюдений, выработать тщательную методику прогнозирования и пути эффективного использования конечных результатов.

Как показал опыт построения математических моделей для плотины Саяно-Шушенской ГЭС [2–4, 18, 86, 102, 146, 165–168], эксплуатация которых проходит как в нормальных, так и в нештатных условиях (высокая приточность, аномально холодные зимы, перенесение сроков наполнения водохранилища и т. п.) [20, 107, 160, 170], для обеспечения достаточно высокой точности прогнозов изучаемого процесса перемещений гребня плотины оказались пригодными динамические модели на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка. Выполненные автором исследования, отраженные в работах [45, 76–81, 127, 148, 149], позволяют сделать следующие выводы:

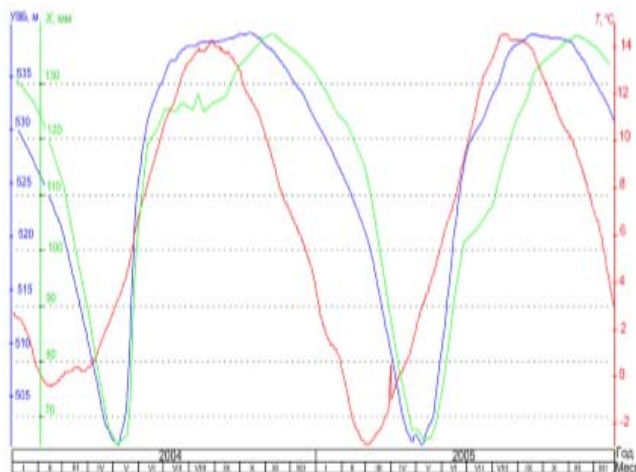
– подготовка исходных данных для построения прогнозных математических моделей всегда начинается с тщательного изучения результатов натурных наблюдений за поведением гидротехнических сооружений и построенных на их основе графиков изменений наблюдаемых перемещений и воздействующих факторов (рисунок 32) с целью изучения цикличности процесса, величин изменения воздействующих факторов и выходных параметров, монотонности и однородности исследуемого процесса и транспортного запаздывания;

– анализ графиков, которые характеризуют прогнозный фон [42–46, 60, 100, 159, 165], позволяющий выбрать тип математической модели, количество воздействующих факторов, величину транспортного запаздывания. А их совместное использование с результатами выполненных ранее инженерно-геологических, конструктивных, строительно-эксплуатационных и других работ позволяет рекомендовать последующие шаги для построения прогнозных моделей;

– выбор периода основания прогноза, на котором предполагается строить модель, также намечается на основе анализа графиков; продолжительность периода выбирается исходя из условия, чтобы он охватывал одинаковую природу развития процесса или учитывал ее изменения адаптивными свойствами модели и возможность последующей инверсной верификации прогноза. При этом дискретность модели, т. е. цикличность натурных наблюдений, может быть выбрана при обязательном выполнении условия, что проводимые геодезические наблюдения должны охватывать основные закономерности развития исследуемого процесса деформации и изменений основных воздействующих факторов. Так в результате

проведенных исследований выяснилось, что для более корректного построения прогнозных моделей оказалась предпочтительнее дискретность натуральных наблюдений (до 15 дней), в отличие от месячной цикличности. В таблице 5 представлены результаты анализа значений остаточных ошибок для построенных моделей для одних и тех же основных воздействующих факторов и перемещений, одинакового периода основания прогноза и периода упреждения, но для различной дискретности натуральных наблюдений;

– следующим является этап параметрической идентификации моделей, на котором осуществляется корректный выбор непротиворечивых форм математического описания исследуемых процессов деформации сооружения, соответствующих природе их возникновения и развития. Именно здесь определяется структура строящихся моделей (выбор основных входных воздействий и выходных переменных, выбор порядка инерционного звена), выбор применяемых оценок параметров строящихся моделей и их адекватности. Решение вопроса о выборе основных входных воздействий существенно влияет в дальнейшем не только на этапы разработки структуры прогнозной модели в части определения порядка инерционного звена, но и декорреляции входных воздействий.



УВБ и температура бетона в базовой точке $T_{\text{низ}}$ во времени: --- верхний бьеф; --- температура бетона (секция 33); --- радиальные перемещения

Рисунок 32 – Изменение диагностического показателя (радиального перемещения гребня плотины) и параметров-аргументов

Анализ результатов построения прогнозных моделей по значениям остаточных ошибок для различных воздействующих факторов (гидростатического давления, температуры бетона в нижней и верхней базовых точках) и их комбинаций, величины транспортного запаздывания (от одного до двух месяцев) позволил отдать предпочтение математическим моделям, построенным на основе рекуррентных уравнений 2-го порядка с двумя воздействующими факторами.

Сравнительный анализ величин значений остаточных ошибок с использованием стандарта σ_k (как показателя рассеяния) дает возможность утверждать следующее (см. таблицу 5):

- из моделей с одним и двумя входными воздействиями следует отдавать предпочтение моделям с двумя входными воздействиями, которые более корректно описывают процесс перемещений (столбцы 2 и 3);

- для моделей одного и того же типа дискретность исходных данных в 15 дней оказалась более предпочтительной, в сравнении с 30 днями (столбцы 3 и 4);

- для моделей одного и того же типа введение транспортного запаздывания предпочтительнее при его включении для прогнозирования процесса перемещений, а не при конструировании самой модели (столбцы 4 и 5);

- модели 1-го и 2-го порядка одного типа практически «равнозначно» описывают процесс перемещений, но при этом модели 2-го порядка более сложные в их конструировании (столбцы 4 и 6);

- модели 3-го типа более корректно описывают процесс перемещений, в сравнении со всеми другими моделями (столбцы 7 и 8);

Таблица 5 – Значения остаточных ошибок для различных типов моделей

Дата (год, месяц, число)	Модель 1-го типа (D30)	Модель 2-го типа (D30)	Модель 2-го типа (D15;Z0)	Модель 2-го типа (D15;Z2.0)	Модель 2-го типа (D15;Z0), 2-го порядка	Модель 3-го типа (D15;Z0)	Модель 3-го типа (D15;Z0)
1	2	3	4	5	6	7	8
2007 г., май 15	–	–	3,089	–3,361	1,039	–	–
Май 30			0,477	–0,250	–2,502	–0,865	–1,935

Июнь 15	1,029	-2,736	-2,945	4,161	-2,628	-1,449	1,221
Июнь 30			-3,409	3,037	-6,555	-0,091	0,134

Продолжение таблицы 5

1	2	3	4	5	6	7	8
Июль 15	-7,122	-6,026	-6,858	-4,111	-4,834	-5,631	-5,010
Июль 30			-4,428	-3,633	-2,287	-2,316	-2,031
Август 15	-6,037	-2,102	-2,032	-2,029	-1,442	-0,338	1,562
Август 30			-1,298	-1,751	-1,600	-0,056	1,706
Сентябрь 15	-5,169	-1,154	-1,389	-5,027	2,109	-1,751	-1,069
Сентябрь 30			2,573	-3,029	3,566	2,666	4,517
Октябрь 15	+2,149	+3,934	3,738	-1,914	3,702	2,302	2,219
Октябрь 30			3,944	0,240	4,062	1,708	3,352
Ноябрь 15	+4,540	+4,138	4,352	1,127	3,187	1,870	2,094
Ноябрь 30			3,472	1,336	2,517	0,756	0,680
Декабрь 15	+4,564	+2,221	2,926	3,534	0,996	0,712	-1,855
Декабрь 30			1,285	3,144	-0,160	-0,578	-6,227
2008 г., январь 15	+3,634	-0,825	0,275	4,885	-2,033	0,303	-0,564
Январь 30			-1,807	4,675	-2,881	-0,393	0,530
Февраль 15	+3,616	-3,817	-2,606	5,689	-4,651	0,007	4,716
Февраль 30			-4,585	3,063	-2,688	-2,117	2,102
Март 15	+0,773	-1,829	-2,621	1,593	-0,510	-0,825	0,308
Март 30			-0,516	0,629	0,638	-0,454	0,210
Апрель 15	-1,071	+0,766	0,551	0,399	3,553	-0,256	0,026
Апрель 30			3,156	-1,039	2,135	1,464	0,738
Май 15	-2,247	+2,859	1,716	-5,319	1,039	-2,061	-3,140
σ_k	4,020	3,064	3,052	3,208	2,926	1,746	2,595

– практически все построенные модели оказались адекватно описывающими процесс; оценивание по остаточным ошибкам с использованием автокорреляции по формуле Бартлетта практически во всех случаях дало положительные результаты; нет причин сомневаться в адекватности построенных моделей;

- 1) порядок инерционного звена модели в основном определяется в результате исследования продолжительности инерционного запаздывания и возможности включения в прогнозную модель транспортного запаздывания. При этом продолжительность инерционного запаздывания может быть определена путем сопоставления построенных графиков изменения включаемых в модель основных воздействующих факторов и выходной

переменной, имеющих гармонический характер изменений. Так, в нашем случае, с использованием графика исходных данных определяется величина фазового сдвига выходной переменной относительно основного входного воздействия (гидростатического давления, температуры или их совместного влияния). В тех случаях, когда гармонический характер входных воздействий и выходной переменной на графике выражен слабо, можно оценить продолжительность инерционного запаздывания по отдельным соответствующим выбросам, имеющим место в развитии исследуемых входного и выходного процессов. Анализ графиков (см. рисунок 32) изменений основных воздействующих факторов и перемещений гребня плотины свидетельствуют о том, что величина инерционного запаздывания не превышает двух месяцев. В то же время, анализ технической литературы [46, 159, 165] позволил выявить, что прогнозную модель на основе звена 2-го порядка рекомендуется строить в тех случаях, когда инерционное запаздывание сезонных процессов превышает три месяца, вводя при необходимости транспортное запаздывание;

- 2) корреляционная зависимость основных входных воздействий возникает в результате того, что на многих эксплуатируемых ГЭС сезонные изменения температуры воздуха почти функционально связаны с изменениями гидростатического давления и температурой бетона тела плотины, как в период наполнения водохранилища, так и в период его «разгрузки» [3, 18, 60]. Имеются также и другие подобные связи между основными воздействующими факторами [100, 111, 159], поэтому одновременный ввод основных коррелирующих воздействующих факторов в строящуюся прогнозную модель приводит, как правило, к ее неустойчивости. Вследствие данного обстоятельства декорреляция основных входных воздействий может быть осуществлена путем их последовательного ввода в модель как это показано в работе для декоррелирующей модели 1-го порядка [78, 79]. Такой прием дает возможность корректно учитывать остаточную часть инерционного запаздывания и выполнять прогнозирование по фактическим

значениям входных воздействующих факторов, наблюдавшимся заранее на интервале транспортного запаздывания;

- 3) окончательный этап разработки прогнозной модели заключается в анализе и сопоставлении полученных результатов с контрольным прогнозированием на основе принципа верификации. В случаях неудовлетворительного качества построенной прогнозной модели необходимо либо повторить все предыдущие этапы ее разработки для того, чтобы найти другой вид и структуру модели, либо более тщательно отнестись к выбору основных воздействующих факторов и возможному транспортному запаздыванию и выбору периода основания прогноза, которые наиболее адекватно описывают исследуемый деформационный процесс. В таблице 6 по результатам исследований, выполненных автором, представлены данные прогнозирования по построенной математической модели на основе рекуррентного уравнения 2-го порядка следующего вида:

$$x(U_k; T_{k.низ}; x_0; D15; Z0):$$

$$x_k = 0,1117x_{k-1} + 0,0652x_{k-2} + 1,8371U_k - 1,3854T_{k.низ} - 852 + 0,7576\omega_k, \quad (52)$$

$$\omega_k = 1,5204\omega_{k-1} - 0,7637\omega_{k-2} + \xi_k.$$

Таблица 6 – Результаты прогнозирования по модели 2-го типа (2-го порядка) и транспортным запаздыванием

Дискретность модели	Этап 2008–2009 гг.				Этап 2009–2010 гг.				Этап 2010–2011 гг.			
	результаты прогноза, мм				результаты прогноза, мм				результаты прогноза, мм			
	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка	дата прогноза, результат	прогнозное значение	ошибка прогноза	конечная ошибка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15.05.08					5.05.09 64,13	63,28	+0,8		13.05.10 70,36	63,16 63,68	+7,2	+6,7
30.05.08	30.05.08 67,72	71,58 66,17	-3,9	+1,7	30.05.09 80,10	80,24	-0,1		23.05.10 67,22	65,31	+1,9	
15.06.08					03.06.09 82,53	82,93 83,66	-0,4		10.06.10 90,70	87,26 87,87	+3,4	+2,8
30.06.08	30.06.08 81,84	91,23 84,12	-9,4	-2,3					30.06.10 113,42	107,38 110,08	+6,1	+3,3

Продолжение таблицы 6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
15.07.08					1.07.09 105,13	106,57	-1,4		09.07.10 117,28	108,10 115,72	+9,2	+1,6
30.07.08					27.07.09 119,54	115,77	+3,8					
15.08.08					17.08.09 – авария							
30.08.08					27.08.09 126,94	123,46	+3,5		30.08.10 121,12	119,86	+1,3	
15.09.08	11.09.08 99,93	109,03 101,41	-9,1	+1,5					9.09.10 123,20	120,09	+3,1	
30.09.08					25.09.09 130,66	128,77	+1,9					
15.10.08	07.10.08 124,46	128,62 121,22	-4,2	+3,2					14.10.10 129,92	129,14	+0,8	
30.10.08					29.10.09 123,14	124,34	-1,2		28.10.10 134,14	129,57 131,00	+4,6	+3,1
15.11.08	13.11.08 132,21	133,85	-1,6		13.11.09 122,13	123,84	-1,7					
30.11.08	26.11.08 132,60	133,08	-0,5									
15.12.08					11.12.09 120,93	121,50	-0,7		14.12.10 136,23	128,55 135,34	+7,7	+1,9
30.12.08	27.12.08 127,33	125,47	+1,9									
15.01.09	11.01.09 124,07	122,86	+1,2		12.01.10 120,40	119,49	+0,9		11.01.11 132,95	134,76	-1,8	
30.01.09												
15.02.09	13.02.09 109,60	109,56	+0,1		11.02.10 118,22	113,96 116,08	+4,3	+2,1	11.02.11 126,47	126,62	-0,2	
28.02.09					25.02.10 114,30	108,05 113,01	+6,3	+1,3				
15.03.09	13.03.09 92,00	92,43	-0,4		11.03.10 108,26	103,76 106,91	+4,5	+1,3	11.03.11 114,00	111,17	+2,8	
30.03.09					30.03.10 97,00	93,71 100,07	+3,3	-3,1				
15.04.09									11.04.11 87,81	85,38	+2,4	
30.04.09	28.04.09 64,84	66,54	-1,7		28.04.10 72,83	71,31 70,81	+1,5	+2,0				
15.05.09	5.05.09 64,13	63,28	+0,8		13.05.10 70,36	63,16 63,68	+7,2	+6,7	12.05.11 69,11	60,72	+8,4	

В таблице 7 представлены «возможные» результаты прогнозирования на период эксплуатации 2019–2020 гг. по усредненным значениям УВБ и температуре в нижней и верхней базовых точках исходя из предположения, что данный период эксплуатации может быть умеренным или холодным по температуре, или характеризоваться высокой приточностью. Для прогноза использовались модели (39) и (51).

Таблица 7 – Результаты прогнозирования по моделям (39) и (51) и транспортным запаздыванием

Период основания прогноза	Исходное значение радиального перемещения, $X_{\text{вых}}$, мм	Дата прогноза: 2019–2020 гг.			
		прогнозное значение (конец месяца), мм			
		дата прогноза	умеренный	холодный	высокая приточность
Май, 2007 г.	66,10	Май, 2019 г.	67,7	65,1	66,3
Июнь	91,83	Июнь	91,8	97,3	112,5
Июль	102,68	Июль	105,9	115,5	117,4
Август	114,27	Август	117,3	120,1	124,7
Сентябрь	121,95	Сентябрь	123,8	127,5	131,4
Октябрь	131,95	Октябрь	131,5	132,3	135,7
Ноябрь	135,48	Ноябрь	132,6	134,1	137,3
Декабрь	131,70	Декабрь	128,1	136,1	132,0
Январь, 2008 г.	121,95	Январь, 2020 г.	120,4	129,4	124,2
Февраль	110,37	Февраль	109,8	119,1	113,6
Март	91,48	Март	94,5	97,0	99,0
Апрель	73,28	Апрель	77,6	72,8	74,6

Выводы по третьему разделу

– для отработки методических решений при построении математических моделей в работах представлены различные варианты построенных математических моделей для различных входных воздействий, периодов основания прогноза для этапов работы плотины 2004–2005, 2005–2007 и 2007–2009 гг.;

– вопрос об увеличении периода основания прогноза для повышения точности прогнозирования при построении модели (включение нескольких лет натуральных наблюдений в период основания прогноза) остается на данный момент открытым. В последующем, при построении прогнозной модели для этапа эксплуатации плотины 2007–2009 гг. планируется достижение конкретного результата.

– анализ результатов построения прогнозных моделей по значениям остаточных ошибок для различных воздействующих факторов (гидростатического давления, температуры бетона в нижней и верхней базовых точках) и их числа, величины транспортного запаздывания (от 1-го до 2-х месяцев) позволил отдать предпочтение математическим моделям, построенным на основе рекуррентных уравнений 2-го порядка с двумя воздействующими факторами;

– как показал опыт построения математических моделей для плотины Саяно-Шушенской ГЭС, эксплуатация которых проходит как в нормальных, так и в

нештатных условиях (высокая приточность, аномально холодные зимы, перенесение сроков наполнения водохранилища и т. п.), для обеспечения достаточно высокой точности прогнозов изучаемого процесса перемещений гребня плотины оказались пригодными динамические модели на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итоги диссертационного исследования заключаются в следующем:

– выполнен анализ, обоснована актуальность и новизна исследований; проанализированы существующие методы построения прогнозных математических моделей для изучения состояния гидротехнических сооружений;

– разработана обоснованная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей динамического типа, представленных рекуррентными уравнениями 1-го и 2-го порядков для анализа перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– построены различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (гидростатическое давление, температура в нижней и верхней базовых точках), дискретностью исходных данных, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием для прогнозирования перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС;

– выявлены методические особенности построения прогнозных математических моделей с точки зрения исходных данных (дискретности данных), порядка математической модели, числа основных воздействующих факторов и транспортного запаздывания для выбора наиболее оптимальных (с точки зрения точности и простоты) математических моделей с целью описания процесса перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 г.;

– теоретическое обоснование и практический опыт построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков вносит существенный вклад в теорию и практику их конструирования.

– в качестве перспективы разработанная методика построения по геодезическим данным прогнозных математических моделей может быть рекомендована к использованию при изучении деформаций высоконапорных плотин.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Автоматизированная система дистанционного контроля за состоянием тела плотины гидротехнических сооружений и прогнозирования чрезвычайных ситуаций [Текст] / А. И. Перепелицын, Г. П. Зуев, С. П. Суцев, В. И. Ларионов, А. Б. Юрьев // Безопасность труда в промышленности. – 2004. – № 6. – С. 21–23.

2 Александров, Ю. Н. Использование расчетной модели плотины Саяно-Шушенской ГЭС для оценки и прогнозирования ее состояния [Текст] / Ю. Н. Александров // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 64–69.

3 Александров, Ю. Н. Разработка математической модели для оценки напряженно-деформированного состояния гидротехнических сооружений СШГЭС [Текст] / Ю. Н. Александров // Вестник Красноярского госуд. архит.-строит. акад. – Красноярск : Изд-во КрасГАСА, 2003. – Вып. 6. – С. 16–27.

4 Александров, Ю. Н. Расчетные исследования поведения плотины Саяно-Шушенской ГЭС в годовом цикле изменения нагрузок [Текст] / Ю. Н. Александров // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 6. – С. 9–13.

5 Александровская, Э. К. Анализ горизонтальных перемещений гребня Красноярской плотины по данным натурных наблюдений [Текст] / Э. К. Александровская, В. П. Урахчин // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 1972. – Т. 99. – С. 270–279.

6 Александровская, Э. К. Прогнозирование перемещений гравитационных плотин на скальных основаниях [Текст] / Э. К. Александровская, В. П. Урахчин // Гидротехническое строительство. – 1974. – № 5. – С. 19–24.

7 Анискин, Н. А. Температурно-фильтрационный режим основания и плотины Курейской ГЭС во втором правобережном понижении [Текст] / Н. А. Анискин // Вестник МГСУ. – 2006. – № 2. – С. 43–52.

8 Баклыков, И. В. Анализ поведения сопряжения бетонной и каменно-набросной плотин Богучанской ГЭС в период наполнения [Текст] / И. В. Баклыков // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – Т. 273. – С. 84–95.

9 Барышников, В. Д. Контроль напряженно-деформированного состояния бетонных плотин в эксплуатационный период [Текст] / В. Д. Барышников, Л. Н. Гахова // ГЕО-Сибирь-2009. V Междунар. науч. конгр. : сб. материалов в 6 т., Новосибирск, 20–24 апр. 2009 г. – Новосибирск : СГГА, 2009. Т. 2, ч. 1. – С. 242–247.

10 Беллендир, Е. Н. Математическое моделирование деформаций плотины Колымской ГЭС в период строительства и эксплуатации [Текст] / Е. Н. Беллендир, Т. Ю. Векшина, В. С. Прокопович // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 1999. – Т. 235. – С. 73–82.

11 Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – Вып. 1. – 405 с.; вып. 2. – 197 с.

12 Броншейн, В. И. Обоснование сейсмостойкости арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС с использованием аппарата нелинейной волновой трехмерной теории сейсмостойкости [Текст] / В. И. Броншейн, М. Е. Грошев // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 4. – С. 30–35.

13 Броншейн, В. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния высоких плотин [Текст] / В. И. Броншейн, М. Е. Грошев // Гидротехническое строительство. – 2002. – № 6. – С. 2–11

14 Васильев, А. А. Оценка прочности бетона и ее прогнозирование для бетонных и железобетонных конструкций [Текст] / А. А. Васильев // Вестник Гомельского государственного технического университета им. П. О. Сухого. – 2005. – № 4 (23). – С. 16–22.

15 Вероятностный статистический подход к оценке эксплуатационной надежности низконапорных грунтовых плотин [Текст] / В. Я. Жарницкий, Е. В. Андреев, Ю. В. Зайцев, О. А. Баяк, В. В. Шлапак // Природообустройство. – 2014. – № 5. – С. 49–54.

16 Волынчиков, А. Н. Анализ вертикальных смещений бетонной плотины Богучанской ГЭС в период первого заполнения водохранилища [Текст] / А. Н. Волынчиков, Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 8. – С. 13–17.

17 Волынчиков, А. Н. Поведение бетонной и каменнонабросной плотин Богучанской ГЭС в период наполнения водохранилища (2012–2015 гг.) [Текст] / А. Н. Волынчиков, Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 12. – С. 13–23.

18 Вульфович, Н. А. Арочно-гравитационная плотина Саяно-Шушенской ГЭС (Оценка технического состояния по данным натурных наблюдений) [Текст] / Н. А. Вульфович, Л. А. Гордон, Н. И. Стефаненко. – СПб. : Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 2012. – 204 с.

19 Вульфович, Н. А. Оценка несущей способности плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных наблюдений в послеаварийный период эксплуатации (2009–2012 гг.) [Текст] / Н. А. Вульфович // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 10–18.

20 Газиев, Э. Г. Анализ современного напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 9. – С. 48–57.

21 Газиев, Э. Г. Изменение углов наклона вертикальной оси Саяно-Шушенской арочной гравитационной плотины – важный диагностический параметр [Текст] / Э. Г. Газиев, А. И. Савич // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 4. – С. 10–16.

22 Газиев, Э. Г. Наклоны горизонтальных сечений Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины [Текст] / Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 3. – С. 25–28.

23 Газиев, Э. Г. О проблеме нестационарного состояния плотины и скального основания Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Э. Г. Газиев, А. М. Замахаев, А. И. Савич // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 45–47.

24 Гахова, Л. Н. К вопросу об альтернативных расчетах напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Л. Н. Гахова // Изв. вузов. Строительство. – 2004. – № 1. – С. 56–59.

25 Геофизический мониторинг основания арочной плотины Ингури ГЭС [Текст] / А. И. Савич, М. М. Ильин, В. И. Бронштейн, А. Б. Басова, С. Б. Кересе-

лидзе, М. Г. Мосишвили, М. Г. Гигиберня // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 11. – С. 38–45.

26 Гинзбург, М. Б. Натурные исследования бетонных плотин в Италии [Текст] / М. Б. Гинзбург. – Л. : Энергия; Ленинградское отд., 1969. – 265 с.

27 Гинзбург, С. М. Вероятностный подход к оценке работы бетонной плотины по данным контроля за перемещениями [Текст] / С. М. Гинзбург, Н. Я. Шейнкер, А. М. Юделевич // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 237. – С. 102–106.

28 Гинзбург, С. М. Оценка состояния бетонной гравитационной плотины с учетом данных натурных наблюдений [Текст] / С. М. Гинзбург, А. М. Юделевич, Н. Я. Шейнкер // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 237. – С. 76–83.

29 Глаговский, В. Б. О методических особенностях численного моделирования фильтрационного состояния в системах плотина-основание [Текст] / В. Б. Глаговский, И. Н. Белкова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2008. – Т. 252. – С. 14–26.

30 Гордон, Л. А. Актуализация критериев безопасности для основных диагностических показателей плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Л. А. Гордон, А. Е. Скворцова // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 11. – С. 22–31.

31 Гордон, Л. А. Анализ технического состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных измерений радиальных смещений и углов наклона горизонтальных сечений [Текст] / Л. А. Гордон, А. Е. Скворцова, Н. И. Стефаненко // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 1. – С. 7–15.

32 Гордон, Л. А. Определение предельно допустимых значений диагностических показателей, обеспечивающих нормальное техническое состояние плотины СШГЭС [Текст] / Л. А. Гордон, А. Е. Скворцова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2012. – Т. 267. – С. 43–53.

33 Гордон, Л. А. Оценка безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС (по данным натурных перемещений) [Текст] / Л. А. Гордон, В. Б. Затеев, Н. И. Стефа-

ненко // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 55–64.

34 Гордон, Л. А. Оценка состояния контакта бетонной плотины со скальным основанием по данным измерений осадок поперечными гидростатическими нивелирами (применительно к плотине Саяно-Шушенской ГЭС) [Текст] / Л. А. Гордон, В. Б. Затеев, Н. И. Стефаненко // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2004. – Т. 243. – С. 157–169.

35 Гордон, Л. А. Оценка технического состояния скального основания русловой части плотины Саяно-Шушенской ГЭС (по данным измерений длиннобазными деформометрами) [Текст] / Л. А. Гордон // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 259. – С. 49–56.

36 Гордон, Л. А. Прогноз перемещений арочной плотины на основе идентифицированной прогнозной модели [Текст] / Л. А. Гордон, И. К. Соколовский, Л. Х. Цовикян // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 1989. – Т. 214. – С. 124–132.

37 Горохов, Е. Н. Особенности формирования температурного режима левобережной плотины Вилуйской ГЭС [Текст] / Е. Н. Горохов // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2004. – Т. 243. – С. 174–180.

38 Гребенщиков, В. П. Современное состояние основания бетонной плотины Богучанской ГЭС [Текст] / В. П. Гребенщиков, Э. С. Калустян // Гидротехническое строительство. – 2005. – № 8. – С. 31–38.

39 Гридчин, А. Н. Прогнозирование затухающих осадок инженерных сооружений по результатам геодезических наблюдений [Текст] / А. Н. Гридчин // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 1970. – № 1. – С. 3–10.

40 Гробов, П. Б. Наблюдения за осадками бетонной плотины Богучанской ГЭС геодезическими методами [Текст] / П. Б. Гробов // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 3. – С. 48–49.

41 Гульков, А. Н. К разработке матричной математической модели оценки состояния природно-технической системы [Текст] / А. Н. Гульков, А. В. Никитина, О. О. Щека // Изв. Самарского науч. центра Рос. акад. наук. – 2011. – Т. 13. – № 1-6. – С. 1326–1329.

42 Гуляев, Ю. П. Математическое моделирование. Анализ и прогнозирование деформаций сооружений по геодезическим данным на основе кинематической модели [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов. – Новосибирск : СГГА, 2012. – 93 с.

43 Гуляев, Ю. П. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 78 с.

44 Гуляев, Ю. П. О корректном подходе к математическому моделированию деформационных процессов инженерных сооружений по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Д. В. Лисицкий // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2014. – № 4/С. – С. 22–30.

45 Гуляев, Ю. П. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС (2004–2007 гг.) [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 4. – С. 16–20.

46 Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений [Текст] / Ю. П. Гуляев. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.

47 Дергачева, А. А. Сейсмические наблюдения на геодинамическом полигоне Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. А. Дергачева, А. Ф. Еманов, А. В. Толочинов // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 7. – С. 42–52.

48 Добрецова, И. В. Методика оценки параметров эксплуатационного состояния гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях с помощью идентифицированных расчетных моделей [Текст] / И. В. Добрецова, А. М. Юделевич // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 95–100.

49 Добрынин, И. А. Исследование опытных взрывов для прогноза воздействия взрыва по образованию плотины Камбаратинская ГЭС-2 [Текст] / И. А. Добрынин, С. Д. Викторов, А. В. Шляпин // Взрывное дело. – 2009. – № 102-59. – С. 192–198.

50 Дурчева, В. Н. Анализ перемещений пускового профиля плотины Бурейской ГЭС по данным геодезических наблюдений [Текст] / В. Н. Дурчева, Е. А. Люцко // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 12–17.

51 Дурчева, В. Н. Анализ факторов, определяющих напряженное состояние напорной грани Бурейской ГЭС [Текст] / В. Н. Дурчева, Е. И. Варламова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2009. – Т. 254. – С. 3–10.

52 Дурчева, В. Н. Назначение критериев безопасности бетонных плотин в период их строительства [Текст] / В. Н. Дурчева // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2007. – Т. 249. – С. 25–31.

53 Дурчева, В. Н. Напряженное состояние бетонной Усть-Илимской плотины в период ее эксплуатации по данным натурных наблюдений [Текст] / В. Н. Дурчева, С. М. Пучкова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 1980. – Т. 142. – С. 8–14.

54 Дурчева, В. Н. Оценка состояния плотины Токтогульской ГЭС по результатам натурных наблюдений (1997-2008) [Текст] / В. Н. Дурчева, А. Г. Зырянов, С. М. Пучкова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 260. – С. 29–38.

55 Дурчева, В. Н. Результаты натурных наблюдений за работой бетонной плотины Братской ГЭС [Текст] / В. Н. Дурчева // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 11. – С. 46–49.

56 Дурчева, В. Н. Состояние арочной плотины Чиркейской ГЭС по данным натурных наблюдений за 2000-2011 гг. [Текст] / В. Н. Дурчева, Е. И. Варламова, С. М. Пучкова // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 6. – С. 30–35.

57 Дурчева, В. Н. Состояние плотины Саяно-Шушенской ГЭС по данным натуральных наблюдений [Текст] / В. Н. Дурчева, Л. С. Пермякова // Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии : VII науч. техн. конф., 2013 г.

58 Дурчева, В. Н. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натуральных измерений [Текст] / В. Н. Дурчева, С. М. Пучкова, И. И. Загрядский // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – № 237. – С. 45–53.

59 Дурчева, В. Н. Работа плотины Бурейской ГЭС при наполнении водохранилища [Текст] / В. Н. Дурчева, С. М. Пучкова // Гидротехническое строительство. – 2006. – № 1. – С. 8–15.

60 Евстифеев, А. Д. Определение прогнозных значений температур для точек наблюдения, расположенных в теле бетонной арочно-гравитационной плотины [Текст] / А. Д. Евстифеев, В. С. Костылев, А. А. Храпков // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2012. – Т. 267. – С. 54–62.

61 Есиков, Н. П. Современные движения земной поверхности с позиции теории деформации [Текст] / Н. П. Есиков. – Новосибирск : Наука. Сибирское отделение, 1991. – 226 с.

62 Жарницкий, В. Я. Принципы формализации в построении математической модели оценки надежности низконапорных грунтовых плотин [Текст] / В. Я. Жарницкий, Е. В. Андреев // Природообустройство. – 2012. – № 4. – С. 39–44.

63 Зайцев, А. К. Геодезические методы исследований деформаций сооружений [Текст] / А. К. Зайцев, С. В. Марфенко, Д. Ш. Михелев. – М. : Недра, 1991. – 272 с.

64 Затеев, В. Б. Сейсмометрический контроль плотины Саяно-Шушенской ГЭС при взрывах [Текст] / В. Б. Затеев // Гидротехническое строительство. – 2008. – № 11. – С. 52–57.

65 Землянский, А. А. Двумерная динамическая модель плотины Токтогульского гидроузла [Текст] / А. А. Землянский // Вестник Кыргызско-Российского славянского университета. – 2007. – Т. 7. – № 6. – С. 123–126.

66 Землянский, А. А. Прогнозирование приращений перемещений фрагментов плотины Токтогульской ГЭС [Текст] / А. А. Землянский, У. Т. Бегалиев // Сейсмостойкое строительство. Безопасность сооружений. – 2008. – № 3. – С. 38–39.

67 Идентификация движений и напряженно - деформированного состояния самоорганизующихся геодинамических систем по комплексным геодезическим и геофизическим наблюдениям [Текст] : монография / В. А. Середович, В. К. Панкрушин, Ю. И. Кузнецов, Б.Т. Мазуров, В. Ф. Ловягин ; под общ. ред. В. К. Панкрушина ; СГГА. – Новосибирск, 2004. – 356 с.

68 Идентификация параметров расчетных моделей напряженно-деформированного состояния бетонной плотины Красноярской ГЭС на основе данных натурных наблюдений [Текст] / Е. А. Андрианова, Н. В. Вознесенская, Н. Г. Кузьмин, А. М. Юделевич // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 278. – С. 86–94.

69 Инженерно-геологическая и геомеханические модели массива пород в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. И. Савич, М. М. Ильин, В. П. Елкин, В. И. Речицкий, А. Б. Басова // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 1. – С. 16–29.

70 Исмаилова, К. Д. Деформированное состояние плотины и ее изменение при создании водохранилища [Текст] / К. Д. Исмаилова, Б. Жумабаев // Вестник КГУСТА. – 2012. – № 4. – С. 118–122.

71 Исследование влияния различных факторов на напряженно-деформированное состояние и сейсмостойкость плотины Саяно-Шушенской ГЭС методом численного моделирования [Текст] / В. И. Броншейн, М. Е. Groшев, А. И. Савич, В. В. Речицкий // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 12. – С. 35–43.

72 Исследование фильтрационного режима оснований высоких плотин на математических моделях [Текст] / Н. А. Анискин, А. С. Антонов, Ю. Б. Мгалобелов, А. В. Дейнеко // Вестник МГСУ. – 2014. – № 10. – С. 114–131.

73 Карлсон, А. А. Руководство по натурным наблюдениям за деформациями гидротехнических сооружений и их оснований геодезическими методами [Текст] / А. А. Карлсон. – М. : Энергия, 1980. – 200 с.

74 Карпик, А. П. Оценка состояния Саяно-Шушенской плотины в период нормальной эксплуатации по данным геодезических измерений [Текст] / А. П. Карпик, Н. И. Стефаненко // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2009. – № 5. – С. 3–10.

75 Кёнке, К. Оценка конструкционной безопасности четырех Алжирских плотин [Текст] / К. Кёнке, Ф. Рёслер // Гидросооружения. – 2009. – № 2. – С. 52–54.

76 Кобелева, Н. Н. Методические особенности построения прогнозных математических моделей для изучения деформаций высоких плотин [Текст] / Н. Н. Кобелева // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 2. – С. 55–63.

77 Кобелева, Н. Н. Оценка состояния крупнейших плотин мира [Текст] / Н. Н. Кобелева // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2017. XIII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 17–21 апреля 2017 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2017. – Т. 1. – С. 143–149.

78 Кобелева, Н. Н. Построение математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуатации 2007-2009 гг. [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 2 (34). – С. 73–86.

79 Кобелева, Н. Н. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007-2009 годов) [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 5–12.

80 Кобелева, Н. Н. Построение прогнозной математической модели процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2015. XI Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» :

сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 13–25 апреля 2015 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2015. – Т. 1. – С. 214–220.

81 Кобелева, Н. Н. Построение прогнозной модели для изучения процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС по геодезическим данным [Текст] / Н. Н. Кобелева, В. С. Хорошилов // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т., Новосибирск, 18–22 апр. 2016 г.. – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – Т. 2. – С. 19–26.

82 Козинец, Г. Л. Определение динамических характеристик сооружений, контактирующих с водой, на примере арочной бетонной плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / Г. Л. Козинец // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 5. – С. 43–48.

83 Косиченко, Ю. М. Расчетная оценка надежности работы грунтовой плотины малого водохранилища с использованием диагностических показателей по данным наблюдений [Текст] / Ю. М. Косиченко, Е. А. Савенкова // Природообустройство. – 2012. – № 5. – С. 41–45.

84 Костылев, В. С. Определение коэффициента запаса устойчивости на сдвиг для арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / В. С. Костылев, Б. В. Цейтлин, Д. В. Щерба // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2013. – Т. 268. – С. 13–18.

85 Костылев, В. С. Применение математической модели «сооружение-основание» к анализу изменений в кинематических показателях бетонной арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС за 2004-2012 гг. [Текст] / В. С. Костылев // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 37–46.

86 Кроненброк, Дж. Современное состояние решения задач геодезического мониторинга сооружений для плотин ГЭС [Текст] // СИББЕЗОПАСНОСТЬ-СПАССИБ-2012. Междунар. науч. конгр. : сб. материалов, Новосибирск, 25–27 сент. 2012 г. – Новосибирск : СГГА, 2012. – С. 169–185.

87 Круглов, Г. Г. Моделирование водосбросной плотины Гродненской ГЭС [Текст] / Г. Г. Круглов, Н. Н. Линкевич // Мелиорация. – 2009. – № 2 (62). – С. 42–50.

88 Крутов, Д. А. Исследования напряженно-деформированного состояния бетонной плотины с учетом изменчивости коэффициента линейного расширения бетона [Текст] / Д. А. Крутов, Л. А. Шилов // Вестник МГСУ. – 2014. – № 11. – С. 154–160.

89 Кузнецов, Д. Б. Корректировка фильтрационной модели земляной плотины Нижегородской ГЭС по результатам комплексных натурных исследований [Текст] / Д. Б. Кузнецов, О. Г. Марголина, Н. С. Сергеева // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2004. – Т. 243. – С. 118–123.

90 Кузьменко, А. П. Исследование динамических характеристик колебаний плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. П. Кузьменко, В. С. Сабуров // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2009. – Т. 256. – С. 97–105.

91 Кузьмин, Н. Г. Особенности состояния бетонной плотины Красноярской ГЭС на этапе длительной эксплуатации [Текст] / Н. Г. Кузьмин // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2015. – Т. 277. – С. 20–34.

92 Ле-Захаров, С. А. Расчетные исследования напряженно-деформированного состояния бетонной плотины Бурейской ГЭС, вызванного действием сейсмических нагрузок [Текст] / С. А. Ле-Захаров, Б. В. Цейтлин, И. В. Федоров / Гидроэнергетика. Новые разработки и технологии. VII науч. техн. конф. – 2013 г.

93 Люцко, Е. А. Мониторинг состояния плотины Чиркейской ГЭС по перемещениям [Текст] / Е. А. Люцко // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2010. – Т. 259. – С. 41–48.

94 Ляпичев, Ю. П. Использование различных моделей бетона и скального основания в расчетах напряженно-деформированного состояния бетонной плотины Богучанской ГЭС [Текст] / Ю. П. Ляпичев, Р. А. Захаров // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2007. – № 4. – С. 45–52.

95 Ляпичев, Ю. П. Оценка достоверности математических моделей грунтов для численных расчетов поведения грунтовых плотин [Текст] / Ю. П. Ляпичев // Вестник Российского университета дружбы народов. Серия: Инженерные исследования. – 2000. – № 3. – С. 110–115.

96 Ляпичев, Ю. П. Расчет напряженного состояния Богучанской плотины с помощью новой модели асфальтобетона [Текст] / Ю. П. Ляпичев // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2006. – № 1. – С. 83–87.

97 Мазуров, Б. Т. Математическое моделирование и идентификация напряженно-деформированного состояния геодинамических систем в аспекте прогноза природных и техногенных катастроф [Текст] / Б. Т. Мазуров, В. К. Панкрушин, В. А. Середович // Вестник СГГА. – 2004. – Вып. 9. – С. 30–35.

98 Марчук, А. Н. Использование сейсмограмм в анализе состояния системы «плотина-основание» Чиркейской ГЭС [Текст] / А. Н. Марчук, Н. А. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 10. – С. 23–26.

99 Марчук, А. Н. О тангенциальных смещениях плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. Н. Марчук // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 1. – С. 57.

100 Математическое моделирование и расчет гидротехнических сооружений типа плотины-пластины с учетом сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды [Текст] / Р. А. Абдикаримов, Х. Эшматов, Ш. П. Бобаназаров, Д. А. Ходжаев, Б. Х. Эшматов // Инженерно-строительный журнал. – 2011. – № 3 (21). – С. 59–70.

101 Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений [Текст] : РД 153-34.2-21.342-00. – М., 2001. – 22 с.

102 Мирсаидов, М. М. Оценка напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин с учетом нелинейного деформирования материала и конечных деформаций [Текст] / М. М. Мирсаидов, Т. З. Султанов // Инженерно-строительный журнал. – 2014. – № 5. – С. 73–82.

103 Могилевская, С. Е. Прогноз деформаций скального основания бетонной плотины с использованием инженерно-геологических критериев безопасности (на

примере плотины Камской ГЭС) [Текст] / С. Е. Могилевская // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 81–90.

104 Моделирование грунтовой плотины Ирганайской ГЭС [Текст] / Е. Н. Беллендир, В. Б. Глаговский, В. С. Прокопович, Т. А. Созинова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2000. – Т. 238. – С. 73–84.

105 Николаев, С. А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений [Текст] / С. А. Николаев. – М. : Недра, 1983. – 112 с.

106 О безопасности гидротехнических сооружений [Текст] : федер. закон № 117-ФЗ от 21.07.1997 // Собрание законодательства Российской Федерации. – 1997. – № 30. – Ст. 3589.

107 О построении математической модели арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. А. Храпков, А. Е. Скворцова, В. С. Костылев, Д. В. Щерба // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2011. – Т. 264. – С. 56–69.

108 Об изменении значений собственных частот плотины Саяно-Шушенской ГЭС при различных уровнях наполнения водохранилища [Текст] / А. В. Лисейкин, В. С. Селезнев, А. А. Бах, Д. В. Кречетов // Геофизические методы исследования земной коры : мат. Всерос. конф., посв. 100-летию акад. Н. Н. Пузырева. – 2014. – С. 182–186.

109 Оптимальное регулирование уровня верхнего бьефа для Саяно-Шушенской ГЭС, обеспечивающей нормальное техническое состояние плотины [Текст] / Е. Н. Беллендир, А. А. Храпков, А. Е. Скворцова, А. Д. Евстифеев // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 32–36.

110 Орехов, В. В. Математическая модель поведения скального массива, вмещающего камерные выработки Рогунской ГЭС [Текст] / В. В. Орехов // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 8. – С. 36–40.

111 Орехов, В. В. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния системы «здание ГЭС – грунтовое основание» с

учетом поэтапности строительства здания [Текст] / В. В. Орехов // Московский государственный строительный университет. – Вестник МГСУ. – 2014. – № 12. – С. 113–120.

112 Орехов, В. В. Объемная математическая модель геофильтрации скального массива, вмещающего подземные сооружения ГЭС ЯЛИ во Вьетнаме [Текст] / В. В. Орехов, С. Н. Хохотва // Гидротехническое строительство. – 2004. – № 12. – С. 46–47.

113 Орехов, В. В. Объемная математическая модель и результаты расчетных исследований напряженно-деформированного состояния основных сооружений Рогунской ГЭС [Текст] / В. В. Орехов // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 4. – С. 12–19.

114 Орехов, В. В. Прогнозное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин и массивов [Текст] / В. В. Орехов // Вестник МГСУ. – 2006. – № 1. – С. 69–72.

115 Орехов, В. В. Прогнозное математическое моделирование напряженно-деформированного состояния грунтовых плотин и скальных массивов [Текст] / В. В. Орехов : автореф. дис. на соискание ученой степени доктора технических наук. – М. : Московский государственный строительный университет, 2003.

116 Орехов, В. Г. Напряженно-деформированное состояние бетонной плотины Канкунского гидроузла [Текст] / В. Г. Орехов, В. В. Толстиков // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 2. – С. 34–42.

117 Оценка устойчивости бетонной плотины на сдвиг с учетом натуральных данных [Текст] / С. М. Гинзбург, И. В. Добрецова, Н. Я. Шейнкер, А. М. Юделевич // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2001. – Т. 239. – С. 50–57.

118 Павловская, Л. Н. Оценка фильтрационных воздействий в системе плотины – основание в периоды наполнения водохранилища и начальной эксплуатации [Текст] / Л. Н. Павловская, Ю. Ю. Савельева, Л. А. Фролова // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2014. – № 273. – С. 18–35.

119 Панкрушин, В. К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем [Текст] : монография / В. К. Панкрушин. – Новосибирск: СГГА, 2002. – 424с.

120 Панов, С. И. Деформационное поведение плотины и основания Колымской ГЭС в эксплуатационный период [Текст] / С. И. Панов, С. М. Воронин // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2007. – Т. 247. – С. 35–44.

121 Панов, С. И. Методика количественной оценки температурного состояния плотин по данным натурных наблюдений [Текст] / С. И. Панов, Ю. М. Николаев // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2009. – Т. 254. – С. 66–72.

122 Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений [Текст] / Д. А. Ивашинцов, А. С. Соколов, С. Г. Шульман, А. М. Юделевич. – СПб. : ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева, 2001. – 432 с.

123 Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М., 2011.

124 Пермякова, Л. С. Формирование напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС при наполнении водохранилища в 2010 году [Текст] / Л. С. Пермякова, А. П. Епифанов // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 4. – С. 2–6.

125 Поведение Саяно-Шушенской плотины после катастрофического разрушения здания ГЭС [Текст] / Н. И. Стефаненко, В. Б. Затеев, Л. С. Пермякова, Е. Н. Решетникова, Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 1. – С. 5–10.

126 Попов, В. Я. Гидротехнические сооружения [Текст] / В. Я. Попов, М. Л. Беликов. – М. : Стройиздат, 1973. – 328 с.

127 Прогнозирование процесса перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации 2007–2009 годов [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов, Д. В. Лисицкий, Н. Н. Кобелева // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2015. – № 5/С. – С. 23–28.

128 Расчет напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины в программном комплексе SOFISTIK [Текст] / В. В. Лалин, А. В. Савченко, А. В. Яваров, Е. В. Зданчук, Д. И. Беляев // Строительство уникальных зданий и сооружений. – 2013. – № 7 (12). – С. 30–37.

129 Рекомендации по анализу данных и проведению натурных наблюдений за осадками и горизонтальными смещениями бетонных плотин [Текст] // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева, 2001. – 12 с.

130 Речицкий, В. И. Поведение основания бетонной плотины Богучанской ГЭС в период строительства и при наполнении водохранилища [Текст] / В. И. Речицкий, К. О. Пудов // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 10. – С. 2–9.

131 Речицкий, В. И. Уточнение деформационной модели основания бетонной плотины Богучанской ГЭС по данным натурных наблюдений [Текст] / В. И. Речицкий, К. О. Пудов // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 9. – С. 3–9.

132 Савич, А. И. Напряженное состояние массива пород в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. И. Савич, А. М. Замахаев, К. О. Пудов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 3. – С. 11–24.

133 Савич, А. И. Напряженное состояние массива пород в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. И. Савич, А. М. Замахаев, К. О. Пудов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 3. – С. 11–24.

134 Савич, А. И. Предложения ЦСГНЭО по совершенствованию критериев безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. И. Савич, Э. Г. Газиев // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 19–21.

135 Саинов, М. П. Расчетное обоснование несущей способности арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС и ее основания [Текст] / М. П. Саинов // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 10. – С. 2–6.

136 Сапожников, А. И. Адекватные расчетные модели зданий и сооружений – гарантия их сейсмостойкости [Текст] / А. И. Сапожников // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2013. – № 6 (173). – С. 38–43.

137 Современное состояние массива пород в основании плотины СШГЭС [Текст] / А. И. Савич, А. Б. Басова, Е. А. Горохова, М. М. Ильин // Гидротехническое строительство. – 2015. – № 12. – С. 2–12.

138 Соснин, С. Ю. Исследование работы плотины Бурейской ГЭС в период наполнения водохранилища [Текст] / С. Ю. Соснин // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2009. – Т. 253. – С. 35–42.

139 Статическое и динамическое поведение Саяно-Шушенской арочно-гравитационной плотины [Текст] / А. И. Савич, В. И. Брошнштейн, М. Е. Грошев, Э. Г. Газиев, М. М. Ильин, В. И. Речицкий, В. В. Речицкий // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 3. – С. 2–13.

140 Стефанишин, Д. В. Прогнозирование аварийности проектируемых и строящихся плотин на основе результатов статистического анализа произошедших аварий [Текст] / Д. В. Стефанишин // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2008. – Т. 251. – С. 3–9.

141 Стефанишин, Д. В. Прогнозирование остаточного ресурса грунтовой плотины на оседание гребня по данным наблюдений за осадками [Текст] / Д. В. Стефанишин // Мониторинг. Наука и безопасность. – 2013. – № 4 (12). – С. 108–115.

142 Тангенциальные перемещения плотины и береговых примыканий Саяно-Шушенской ГЭС по данным натурных наблюдений [Текст] / Л. А. Гордон, С. С. Гутов, А. Е. Скворцова, А. А. Храпков // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 7. – С. 2–8.

143 Тетельмин, В. В. Решение задачи прогиба земной коры как возможного фактора воздействия на поведение плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / В. В. Тетельмин // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 7. – С. 26–31.

144 Тетельмин, В. В. Физические основы «запаздывающей упругости» арочных плотин [Текст] / В. В. Тетельмин // Гидротехническое строительство. – 2014. – № 3. – С. 36–42.

145 Толошинов, А. В. Особенности деформирования арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на контакте с основанием [Текст] / А. В. Толошинов, Ю. Н. Александров // Изв. вузов. Строительство. – 2006. – № 6. – С. 51–60.

146 Толошинов, А. В. Построение конечно-элементной модели для оценки напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. В. Толошинов, Ю. Н. Александров, А. П. Епифанов // Изв. вузов. Строительство. – 2006. – № 7. – С. 38–47.

147 Ходжибоев, А. А. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния неоднородной плотины с учетом податливости основания методом граничных уравнений [Текст] / А. А. Ходжибоев // Интернет-Вестник ВолгГАСУ. – 2013. – № 1 (25). – С. 9.

148 Хорошилов, В. С. Математическое моделирование деформационного процесса для изучения перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе динамической модели (2004-2007 гг.) [Текст] / В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева, П. Н. Губонин // Изв. вузов. Строительство. – 2016. – № 2 (686). – С. 49–58.

149 Хорошилов, В. С. Совершенствование методики построения математических моделей для прогнозирования горизонтальных перемещений плотины Саяно-Шушенской ГЭС для периода эксплуатации после аварии 2009 года [Текст] / В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева, Ю. П. Гуляев // Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2017. – № 2, Т. 61. – С. 23–30.

150 Храпков, А. А. Состояние гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС в период зимней эксплуатации 2009/2010 г. ГЭС [Текст] / А. А. Храпков // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 7. – С. 14–21.

151 Шестопалов, П. В. Расчетное определение физико-механических характеристик скального основания секции № 28 бетонной плотины Богучанской ГЭС [Текст] / П. В. Шестопалов // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. – 2016. – № 1. – С. 77–80.

152 Шуйфер, М. И. Создание плотины Камбаратинской ГЭС-2 крупномасштабным взрывом: некоторые результаты наблюдений [Текст] / М. И. Шуйфер, Э. С. Аргал // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 5. – С. 2–11.

153 Эйдельман, С. Я. Бетонная плотина Усть-Илимской ГЭС (натурные наблюдения и исследования) [Текст] / С. Я. Эйдельман, В. Н. Дурчева. – М. : Энергия, 1981. – 136 с.

154 Юдина, И. М. К вопросу о выборе расчетной модели для прогнозирования напряженно-деформированного состояния грунтов при устройстве котлована [Текст] / И. М. Юдина, А. Н. Климов // Вестник МГСУ. – 2008. – № 2. – С. 145–149.

155 Юсупов, Т. М. Оценка состояния системы «плотина-основание» Саяно-Шушенской ГЭС по завершении этапа наполнения водохранилища в 2012 году [Текст] / Т. М. Юсупов, Е. Н. Решетникова, Ю. Н. Александров // Гидротехническое строительство. – 2013. – № 4. – С. 3–9.

156 Якубсон, В. М. Анализ напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / В. М. Якубсон // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – Т. 27. – № 1. – С. 2.

157 Aleksandrov, Yu. Use of finite-element model to predict of Sayano-Shushenskaya HPP (SShHPP) dam state [Text] / Yu. Aleksandrov, E. Zateeva, N. Stefantnko // ICOLD 75th Annual Meeting, Session III. Large dams safety management. Saint Petersburg, Russia. June 24-29, 2007.

158 Ardito, R. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading [Text] / R. Ardito, G. Maier, G. Massalongo // 2008. Engineering Structures. № 30. Pp. 3176–3185.

159 Geologic-engineering and geomechanical models of the rock mass in the bed of the dam at the Sayano-SHushenskaya HPP [Text] / A. I. Savich, M. M. Il'In, V. P. Elkin, V. I. Rechitskii, A. B. Basova // Power Technology and Engineering. – 2013. – Т. 47. – № 2. – Pp. 89–101.

160 Ghiasian, M. Effective model for dynamic vertical joint opening of concrete arch dam [Text] / M. Ghiasian, M. T. Ahmadi // Proc. of the int. symp. on dams for a changing world-80th annual meet. and 24th cong. of ICOLD. Kyoto, Japan. 2012. Pp. (4) 41–46.

161 Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams [Text] / F. Li, Zh. Wang, G. Liu, C. Fu, J. Wang // Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Volume 11. Issue 12. Pp. 1616–1631.

162 Jafari, M. Deformation modelling of structures enriched by inter-element continuity condition based on multi-sensor data fusion [Text] / M. Jafari // Applied Mathematical Modelling. 2016. Volume 40. Pp. 9316–9326.

163 Khrapkov, A. Assessment of concrete dam state by comparison of the in-situ data with the results of numerical research using mathematical models [Text] / A. Khrapkov, V. Kostylev, A. Sevortsova // International symposium on dams for a changing world. Kyoto, Япония. June 5, 2012. Pp. 261–265.

164 Kostylev, V. S. Use of mathematical «structure-bed» model to analyze changes in kinematic indicators of the concrete arch-gravity dam at the sayano-shushenskaya HPP from 2004 through 2012 [Text] / V. S. Kostylev // Power Technology and Engineering. – 2013. – Т. 47. – № 3. – С. 191–199.

165 Leger, P. Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams [Text] / P. Leger, M. Leclerc // J. Eng. Mec-ASCE. 2007. 133(3). Pp. 267–277.

166 Mata, J. Constructing statistical models for arch dam deformation [Text] / J. Mata, A. T. Castro, J. Costa // Structural Control and Health Monitoring. 2014. Volume 21. Issue 35. Pp. 423–437.

167 Mathematical model for rock foundation and concrete dam of Bureiskaya HPP dynamic interaction [Text] / A. Khrapkov, B. Tseitlin, A. Sevortsova, A. Vasilyev // Ninth International benchmark workshop on numerical analysis of dams. St. Petersburg, Russia, June 22-23. 2007. Proceedings, St. Petersburg, 2008. Pp. 216–236.

168 Mirsaidov, M. M. Stress state of earth dams with account of rheological properties of soil and wave removal of energy through the foundation [Text] / M. M. Mirsaidov, T. Z. Sultanov // International Journal for Computational Civil and Structural Engineering. – 2015. – Т. 11. – № 1. – Pp. 42–53.

169 Perner, F. Analysis of arch dam deformations [Text] / F. Perner, P. Oberhuber // Frontiers of Architecture and Civil Engineering in China. 2010. Volume 4. Issue 1. Pp. 102–108.

170 Rechitskii, V. I. Refined model of the concrete dam at the Boguchanskaya HPP based on field observations [Text] / V. I. Rechitskii, K. O. Pudov // Power Technology and Engineering. – 2014. – T. 47. – № 6. – Pp. 393–399.

171 Salazar, F. Data-based models for prediction of dam behavior: A review and some methodological considerations [Text] / F. Salazar, R. Moran, M. A. Toledo // Archives of Computational Methods in Engineering. 2015. Pp. 1–21.

172 Sani, A. A. Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach [Text] / A. A. Sani, V. Lofti // Engineering Structures. 2010. Volume 32. Issue 5. Pp. 1377–1383.

173 Studies on the static and dynamic behaviour of the Sayano-SHusnenskaya arch gravity dam [Text] / A. I. Savich, V. I. Bronshtein, M. E. Groshev, E. G. Gaziev, M. M. Lliyn, V. I. Rechitski, V. V. Rechifski // International Journal on Hydropower and Dams. – 2013. – T. 20. – № 6. – Pp. 53–58.

174 Su, H. Identification model for dam behavior based on wavelet network [Text] / H. Su, Zh. Wu, Zh. Wen // Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2007. Volume 22. Issue 6. Pp. 438–448.

175 System identification of concrete gravity dams using artificial neural networks based on a hybrid finite element-boundary element approach [Text] / I. Karimi, N. Khaji, M. T. Ahmadi, M. Mirzayee // Engineering Structures. 2010. Volume 32. Issue 11. Pp. 3583–3591.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

ИСХОДНЫЕ ЗНАЧЕНИЯ ОСНОВНЫХ ВОЗДЕЙСТВУЮЩИХ ФАКТОРОВ
ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Таблица А.1

Дата, Месяц	УВБ, м	Переме- щение, $x_{\text{вых}}$, мм	Темпе- ратура, °С	Дата, Месяц	УВБ, м	Переме- щение, $x_{\text{вых}}$, мм	Темпе- ратура, °С
Январь, 2004 г.	526,14	125,74	+0,32	Октябрь	538,43	137,54	+10,32
Февраль	520,43	113,53	+0,06	Ноябрь	534,71	136,67	+7,16
Март	510,43	89,70	+0,39	Декабрь	530,29	130,58	+2,45
Апрель	500,94	67,06	+2,58	Январь, 2006 г.	524,49	121,45	-0,32
Май	524,90	102,06	+6,57	Февраль	519,00	111,71	-1,42
Июнь	534,50	125,59	+10,64	Март	507,52	86,28	-0,52
Июль	537,71	125,74	+13,39	Апрель	500,14	70,14	+1,41
Август	538,29	126,57	+14,00	Май	510,86	82,32	+4,98
Сентябрь	539,00	133,29	+12,84	Июнь	534,14	122,90	+9,41
Октябрь	537,86	139,12	+10,23	Июль	537,21	131,16	+12,52
Ноябрь	535,00	136,18	+6,84	Август	538,28	135,51	+13,16
Декабрь	530,57	131,18	+3,48	Сентябрь	538,57	138,70	+11,55
Январь, 2005 г.	525,71	123,82	+0,29	Октябрь	537,14	140,86	+9,10
Февраль	520,00	112,94	-2,84	Ноябрь	534,71	140,80	+7,10
Март	508,86	88,82	-1,03	Декабрь	529,84	132,32	+4,19
Апрель	501,28	67,94	+2,00	Январь, 2007 г.	523,93	119,42	+1,81
Май	509,71	74,12	+5,87	Февраль	517,57	104,93	+1,23
Июнь	527,71	102,06	+9,55	Март	507,43	83,77	+0,84
Июль	533,04	107,65	+13,48	Апрель	500,14	62,75	+4,00
Август	538,04	125,65	+14,26	Май	510,29	74,35	+7,35
Сентябрь	538,71	133,77	+12,58				

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(обязательное)

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СРЕДНИХ ВЕЛИЧИН ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

Таблица Б.1

Период наблюдений, месяц	Вход, верхний бьеф u_k , м	Центрированное значение, \dot{u}_k , м	Выход, перемещение x_k , мм	Центрированное значение, \dot{x}_k , мм	Вход, температура \dot{T}_k , °C	Центрированное значение, \dot{T}_k , °C
1	2	3	4	5	6	7
Период основания прогноза 2004–2007 гг. (3,5 года)						
Январь, 2004 г.	526,1	+1,4	125,74	+13,138	+0,3	–5,578
Февраль	520,4	–4,3	113,53	+0,928	+0,1	–5,838
Март	510,4	–14,3	89,70	–22,902	+0,4	–5,508
Апрель	500,9	–23,8	67,06	–45,542	+2,6	–3,318
Май	524,9	+0,2	102,06	–10,542	+6,6	+0,672
Июнь	534,5	+9,8	125,59	+12,988	+10,6	+4,742
Июль	537,7	+13,9	125,74	+13,138	+13,4	+7,492
Август	538,3	+13,6	126,57	+13,968	+14,0	+8,102
Сентябрь	539,0	+14,3	133,29	+20,688	+12,8	+6,942
Октябрь	537,9	+13,1	139,12	+26,518	+10,2	+4,332
Ноябрь	535,0	+10,3	136,18	+23,578	+6,8	+0,942
Декабрь	530,6	+5,8	131,18	+18,578	+3,5	–2,418
Январь, 2005 г.	525,7	+1,0	123,82	+11,218	+0,3	–5,608
Февраль	520,0	–4,7	112,94	+0,338	–2,8	–8,738
Март	508,9	–15,9	88,82	–23,782	–1,0	–6,928
Апрель	501,3	–23,4	67,94	–44,662	+2,0	–3,898
Май	509,7	–15,0	74,12	–38,482	+5,9	–0,028
Июнь	527,7	+3,0	102,06	–10,542	+9,6	+3,652
Июль	533,0	+8,3	107,65	–4,952	+13,5	+7,582
Август	538,0	+13,3	125,65	+13,048	+14,3	+8,362
Сентябрь	538,7	+14,0	133,77	+21,168	+12,6	+6,682
Октябрь	538,4	+13,7	137,54	+24,938	+10,3	+4,422
Ноябрь	534,7	+10,0	136,67	+24,068	+7,2	+1,262
Декабрь	530,3	+5,6	130,58	+17,978	+2,4	–3,448
Январь, 2006 г.	524,5	–0,2	121,45	+8,848	–0,3	–6,218
Февраль	519,0	–5,7	111,71	–0,892	–1,4	–7,318
Март	507,5	–17,2	86,28	–26,322	–0,5	–6,418
Апрель	500,1	–24,6	70,14	–42,462	+1,4	–4,488
Май	510,9	–13,9	82,32	–30,282	+5,0	–0,918
Июнь	534,1	+9,5	122,90	+10,298	+9,4	+3,512
Июль	537,2	+12,4	131,16	+18,558	+12,5	+6,622

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7
Август	538,3	+13,6	135,51	+22,908	+13,2	+7,262
Сентябрь	538,6	+13,8	138,70	+26,098	+11,6	+5,652
Октябрь	537,1	+12,4	140,86	+28,258	+9,1	+3,202
Ноябрь	534,7	+10,0	140,80	+28,198	+7,1	+1,202
Декабрь	529,8	+5,1	132,32	+19,718	+4,2	-1,708
Январь, 2007 г.	523,9	-0,8	119,42	+6,818	+1,8	-4,088
Февраль	517,6	-7,2	104,93	-7,672	+1,2	-4,668
Март	507,4	-17,3	83,77	-28,832	+0,8	-5,058
Апрель	500,1	-24,6	62,75	-49,852	+4,0	-1,898
Май	510,3	-14,4	74,35	-38,252	+7,4	+1,452
Σ	524,7	0	112,60	+0,008	+5,90	0

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(обязательное)

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ НОРМАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

Таблица В.1

Период на- блюдений	$\dot{x}_k T_k$	T_k^2	$T_k \dot{u}_k$	$\dot{x}_{k-1} T_k$	\dot{x}_{k-1}^2	$\dot{x}_{k-1} \dot{x}_k$	\dot{u}_k^2	$\dot{x}_{k-1} \dot{u}_k$	$\dot{x}_k \dot{u}_k$
Январь	–	–	–	–76,699	172,6070	+12,1921	–	–56,3620	–
Февраль	–5,417	34,083	+25,045	–5,110	0,8612	–21,2531	18,4041	–13,2611	–3,9811
Март	+126,146	30,339	+74,710	+75,991	524,5016	+1043,0029	204,2041	+544,6096	+327,2696
Апрель	+151,11	11,009	+78,903	–30,602	2074,0738	+480,1038	565,4884	–8,1976	+1082,9888
май	–7,0843	0,4521	+0,121	–49,991	111,1338	–136,9195	0,0324	–103,1008	–1,8976
Июнь	+61,5882	22,4863	+46,376	+97,304	168,6881	+170,6363	95,6484	+168,7141	+127,0226
Июль	+98,4281	56,1291	+97,320	+106,442	172,6070	+183,5116	168,7401	+178,2827	+170,6626
Август	+113,1664	65,6423	+109,943	+96,964	195,1050	+288,9700	184,1449	+199,4630	+189,5458
Сентябрь	+143,6143	48,1912	+99,131	+89,619	427,9933	+548,6044	203,9184	+271,8403	+295,4246
Октябрь	+114,8741	18,7664	+56,922	+24,978	703,2043	+625,2414	172,6596	+272,6050	+348,4465
Ноябрь	+22,2092	0,8871	+9,683	–57,012	555,9221	+438,0321	105,6784	+137,9313	+242,3818
Декабрь	–44,9221	5,8473	–14,146	–104,185	345,1421	+208,4080	34,2225	+18,3922	+108,6813
Январь	–62,9103	31,4502	–5,552	–98,022	125,8435	+3,7917	0,9801	–52,9490	+11,1058
Февраль	–2,9521	76,3531	+41,244	–2,340	0,1142	–8,0383	22,2784	–5,3607	–1,5954
Март	+164,7644	47,9984	+109,879	+92,704	565,5835	+1062,1517	251,5396	+557,4501	+377,1825
Апрель	+174,0952	15,1951	+91,370	+1,253	1994,6942	+1718,6831	549,4336	+670,3766	+1046,8773
май	+1,0793	0,0015	+0,421	–140,535	1480,8643	+405,6772	225,3001	–115,0612	+577,6148
Июнь	–38,5001	13,3371	+10,919	–79,930	111,1338	+52,2040	8,9401	–87,7094	–31,5206
Июль	–37,5473	57,4863	+63,082	–41,410	24,5223	–64,6137	69,2224	–65,9606	–41,2006
Август	+109,1052	69,9224	+111,381	+87,185	170,2503	+276,2001	177,4224	+182,5415	+173,7994
Сентябрь	+141,4424	44,6481	+93,480	+93,603	448,0842	+527,8876	195,7201	+290,2133	+296,1403
Октябрь	+110,2741	19,5544	+60,625	+31,470	621,9038	+600,2078	187,9641	+249,1306	+341,9000
Ноябрь	+30,3723	1,5934	+12,607	–82,987	579,2686	+432,6945	99,8001	+134,0588	+240,4393
Декабрь	–61,9881	11,8892	–19,206	–111,787	323,2085	+159,0693	31,0249	–4,1349	+100,1375

Продолжение таблицы В.1

Период на- блюдений	$\dot{x}_k T_k$	T_k^2	$T_k \dot{u}_k$	$\dot{x}_{k-1} T_k$	\dot{x}_{k-1}^2	$\dot{x}_{k-1} \dot{x}_k$	\dot{u}_k^2	$\dot{x}_{k-1} \dot{u}_k$	$\dot{x}_k \dot{u}_k$
Январь	-55,0163	38,6641	+1,430	-64,749	78,2871	-7,8924	0,0529	-50,6106	-2,0350
Февраль	+6,5293	53,5543	+41,859	+5,726	0,7957	+23,4792	32,7184	+15,3424	+5,1022
Март	+168,9371	41,1912	+110,390	+118,135	692,8477	+1117,6848	295,8400	+646,9948	+452,7384
Апрель	+190,5721	20,1434	+110,316	+38,982	1803,0214	+1285,8343	604,1764	+588,5233	+1043,7160
май	+27,8013	0,8431	+12,724	-106,350	916,9995	-311,8440	192,0996	-285,2564	+419,7085
Июнь	+36,1653	12,3343	+33,083	+68,192	106,0488	+191,1103	88,7364	+128,6220	+97,0072
Июль	+122,8891	43,8505	+82,708	+134,766	344,3993	+425,1267	156,0001	+251,6465	+231,7894
Август	+166,3553	52,7361	+98,472	+129,474	524,7765	+597,8530	183,8736	+317,2758	+310,6325
Сентябрь	+147,5044	31,9453	+78,280	+83,564	681,1056	+737,4773	191,8225	+324,1372	+361,4573
Октябрь	+90,4805	10,2522	+39,768	+33,965	798,5146	+796,8191	154,2564	+282,2974	+350,9644
Ноябрь	+33,8925	1,4454	+12,007	-48,163	795,1272	+556,0082	99,8001	+144,3738	+281,6980
Декабрь	-33,6793	2,9172	-8,745	-80,607	388,7995	+134,4373	26,2144	-15,5772	+100,9562
Январь	-27,872	16,7121	+3,230	-31,826	46,4851	-52,3077	0,6241	-48,7487	-5,3862
Февраль	+35,8143	21,7914	+33,377	+38,806	58,8596	+221,1991	51,1225	+132,6489	+54,8548
Март	+145,8351	25,5841	+87,454	+54,725	831,2842	+1437,3329	298,9441	+708,6906	+498,5053
Апрель	+94,6223	3,6033	+46,654	-72,383	2485,2219	+1906,9387	604,1764	+719,3644	+1225,3622
Май	-55,5405	2,1085	-20,952	-	-	-	208,2249	-	+551,9764
Σ	+2396,2381	1062,9275	+1920,916	+219,518	22449,8842	18065,7018	6761,4500	+7223,2360	+11956,4728

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

(обязательное)

ВЫЧИСЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ ОШИБОК ε_k

И КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

Таблица Г.1

Период наблюдений, месяц	Выход, перемещение x_k , мм	Центрированное значение, \dot{x}_k , мм	Центрированное значение, \dot{y}_k , м	Центрированное значение, \dot{T}_k , °C	$\hat{x}_{k/k-1}$, мм	ε_k	m	$\hat{K}_\varepsilon [m]$
Январь	125,74	+13,138	+1,42	-5,578		-		
Февраль	113,53	+0,928	-4,29	-5,838	+1,626	-0,697	0	+7,352
Март	89,70	-22,902	-14,29	-5,508	-20,117	-2,785	1	+3,437
Апрель	67,06	-45,542	-23,78	-3,318	-45,566	+0,024	2	+0,887
Май	102,06	-10,542	+0,18	+0,672	-10,141	-0,401	3	+0,050
Июнь	125,59	+12,988	+9,78	+4,742	+10,515	+2,473	4	+1,072
Июль	125,74	+13,138	+12,99	+7,492	+18,301	-5,163	5	+2,375
Август	126,57	+13,968	+13,57	+8,102	+18,702	-4,734	6	+2,537
Сентябрь	133,29	+20,688	+14,28	+6,942	+21,577	-0,889	7	+1,436
Октябрь	139,12	+26,518	+13,14	+4,332	+23,943	+2,575	8	-0,087
Ноябрь	136,18	+23,578	+10,28	+0,942	+23,813	-0,235	9	-1,854
Декабрь	131,18	+18,578	+5,85	-2,418	+18,837	-0,259	10	-0,737
Январь	123,82	+11,218	+0,99	-5,608	+12,416	-1,198	11	+0,783
Февраль	112,94	+0,338	-4,72	-8,738	+3,828	-3,490	12	+1,193
Март	88,82	-23,782	-15,86	-6,928	-21,514	-2,268	13	-0,735
Апрель	67,94	-44,662	-23,44	-3,898	-44,432	-0,230	14	-1,278
Май	74,12	-38,482	-15,01	-0,028	-37,621	-0,861	15	-1,719
Июнь	102,06	-10,542	+2,99	+3,652	-6,880	-3,662	16	-1,363
Июль	107,65	-4,952	+8,32	+7,582	+4,430	-9,382	17	-0,680
Август	125,65	+13,048	+13,32	+8,362	+14,079	-1,031	18	+0,076
Сентябрь	133,77	+21,168	+13,99	+6,682	+21,144	+0,024	19	+0,170
Октябрь	137,54	+24,938	+13,71	+4,422	+25,008	-0,070	20	-0,632
Ноябрь	136,67	+24,068	+9,99	+1,262	+22,556	+1,512	21	-1,593
Декабрь	130,58	+17,978	+5,57	-3,448	+19,629	-1,651	22	-0,894
Январь	121,45	+8,848	-0,23	-6,218	+10,719	-1,871	23	-0,245
Февраль	111,71	-0,892	-5,72	-7,318	-0,225	-0,667	24	+0,197
Март	86,28	-26,322	-17,20	-6,418	-24,890	-1,432	25	-0,409
Апрель	70,14	-42,462	-24,58	-4,488	-46,416	+3,954	26	-0,839
Май	82,32	-30,282	-13,86	-0,918	-33,947	+3,665	27	-1,360
Июнь	122,90	+10,298	+9,42	+3,512	+7,090	+3,208	28	-0,898
Июль	131,16	+18,558	+12,49	+6,622	+17,816	+0,742	29	-0,104
Август	135,51	+22,908	+13,56	+7,262	+20,826	+2,082	30	+0,168
Сентябрь	138,70	+26,098	+13,85	+5,652	+24,192	+1,906	31	-0,005
Октябрь	140,86	+28,258	+12,42	+3,202	+25,075	+3,183	32	-0,409
Ноябрь	140,80	+28,198	+9,99	+1,202	+23,333	+4,865	33	-0,417
Декабрь	132,32	+19,718	+5,12	-1,708	+17,614	+2,104	34	-0,117
Январь	119,42	+6,818	-0,79	-4,088	+7,529	-0,711	35	+0,165
Февраль	104,93	-7,672	-7,15	-4,668	-6,461	-1,211	36	+0,061
Март	83,77	-28,832	-17,29	-5,058	-28,103	-0,729	37	+0,061
Апрель	62,75	-49,852	-24,58	-1,898	-50,001	+0,149	38	-0,081
Май	74,35	-38,252	-14,43	+1,452	-39,381	+1,129	39	-0,020

ПРИЛОЖЕНИЕ Д
(обязательное)

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ КОРРЕЛЯЦИОННОЙ ФУНКЦИИ

Таблица Д.1

m	$\hat{K}_\varepsilon[m]$	$\hat{K}_\varepsilon[m-1]^2$	$\hat{K}_\varepsilon[m-1] \hat{K}_\varepsilon[m-2]$	$\hat{K}_\varepsilon[m] \hat{K}_\varepsilon[m-1]$	$\hat{K}_\varepsilon[m-2]^2$	$\hat{K}_\varepsilon[m] \hat{K}_\varepsilon[m-2]$
0	+7,352	–	–	–	–	–
1	+3,437	54,0519	+25,2688	+25,2688	11,8130	+11,8130
2	+0,887	11,8130	+25,2688	+3,0486	54,0519	+6,5212
3	+0,050	0,7868	+3,0486	+0,0444	11,8130	+0,1719
4	+1,072	0,0025	+0,0444	+0,0536	0,7868	+0,9509
5	+2,375	1,1492	+0,0536	+2,5460	0,0025	+0,1188
6	+2,537	5,6406	+2,5460	+6,0254	1,1492	+2,7197
7	+1,436	6,4364	+6,0254	+3,6431	5,6406	+3,4105
8	–0,087	2,0621	+3,6431	–0,1249	6,4364	–0,2207
9	–1,854	0,0076	–0,1249	+0,1613	2,0621	–2,6623
10	–0,737	3,4373	+0,1613	+1,3664	0,0076	+0,0641
11	+0,783	0,5432	+1,3664	–0,5771	3,4373	–1,4517
12	+1,193	0,6131	–0,5771	+0,9341	0,5432	–0,8792
13	–0,735	1,4232	+0,9341	–0,8769	0,6131	–0,5755
14	–1,278	0,5402	–0,8769	+0,9393	1,4232	–1,5247
15	–1,719	1,6333	+0,9393	+2,1969	0,5402	+1,2635
16	–1,363	2,9550	+2,1969	+2,3430	1,6333	+1,7419
17	–0,680	1,8578	+2,3430	+0,9268	2,9550	+1,1689
18	+0,076	0,4624	+0,9268	–0,0517	1,8578	–0,1036
19	+0,170	0,0058	–0,0517	+0,0129	0,4624	–0,1156
20	–0,632	0,0289	+0,0129	–0,1074	0,0058	–0,0480
21	–1,593	0,3994	–0,1074	+1,0068	0,0289	–0,2708
22	–0,894	2,5376	+1,0068	+1,4241	0,3994	+0,5650
23	–0,245	0,7992	+1,4241	+0,2190	2,5376	+0,3903
24	+0,197	0,0600	+0,2190	–0,0483	0,7992	–0,1761
25	–0,409	0,0388	–0,0483	–0,0806	0,0600	+0,1002
26	–0,839	0,1673	–0,0806	+0,3432	0,0388	–0,1653
27	–1,360	0,7039	+0,3432	+1,1410	0,1673	+0,5562
28	–0,898	1,8496	+1,1410	+1,2213	0,7039	+0,7534
29	–0,104	0,8064	+1,2213	+0,0934	1,8496	+0,1414
30	+0,168	0,0108	+0,0934	–0,0175	0,8064	–0,1509
31	–0,005	0,0282	–0,0175	–0,0008	0,0108	+0,0005
32	–0,409	0,0000	–0,0008	+0,0020	0,0282	–0,0687
33	–0,417	0,1673	+0,0020	+0,1706	0,0000	+0,0021
34	–0,117	0,1739	+0,1706	+0,0488	0,1673	+0,0479
35	+0,165	0,0137	+0,0488	–0,0193	0,1739	–0,0688
36	+0,061	0,0272	–0,0193	+0,0101	0,0137	–0,0071
37	+0,061	0,0037	+0,0101	+0,0037	0,0272	+0,0101
38	–0,081	0,0037	+0,0037	–0,0049	0,0037	–0,0049
39	–0,020	0,0066	–0,0049	+0,0016	0,0037	–0,0012
Σ	+103,248	78,5541	+53,2869	+115,0540	24,0161	–