

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

В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ОБЪЕКТАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ**

Монография

Новосибирск
СГУГиТ
2023

УДК 528
Х821

Рецензенты: доктор технических наук, профессор КемГУ *А. Н. Соловицкий*
кандидат технических наук, доцент, СГУГиТ *Е. И. Аврунев*

Хорошилов, В. С.

Х821 Математическое моделирование деформационных процессов на объектах гидротехнических сооружений : монография / В. С. Хорошилов, Н. Н. Кобелева. – Новосибирск : СГУГиТ, 2023. – 183 с. – Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907513-98-3

В монографии изложены особенности построения прогнозных моделей для математического моделирования деформационных процессов. Цель – оказание пользователям практической помощи, позволяющей с глубоким пониманием освоить процедуру выявления по геодезическим данным закономерностей динамики изучаемых деформационных процессов в результате геодезического контроля за поведением водоподпорных сооружений и агрегатных блоков зданий как строящихся, так и эксплуатируемых ГЭС. Представлен теоретический и практический опыт построения прогнозных моделей при изучении протекающих деформационных процессов на примере высоконапорной плотины СШ ГЭС.

Монография предназначена для научных работников и специалистов в области геодезии, а также для студентов старших курсов геодезических специальностей, магистрантов и аспирантов.

Печатается по решению редакционно-издательского совета СГУГиТ

УДК 528

ISBN 978-5-907513-98-3

© СГУГиТ, 2023

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	5
1. Особенности разработки прогнозных математических моделей на основе геодезических данных для анализа процесса деформаций гидротехнических сооружений.....	9
1.1. Общие сведения о действии сил и перемещениях на плотинах ГЭС	9
1.2. Крупнейшие плотины мира.....	12
1.3. Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс	22
1.4. Разработка прогнозных математических моделей. Анализ существующих методов их построения	38
1.4.1. Прогнозные математические модели корреляционно-регрессионного типа. Достоинства и недостатки	43
1.4.2. Математические модели на основе численных методов исследований. Достоинства и недостатки.....	47
1.4.3. Прогнозные математические модели динамического типа.....	50
1.4.4. Влияние температурного фактора и мультиколлинеарности между основными воздействующими факторами.....	58
1.4.5. Обоснование точности измерительной информации.....	61
2. Построение прогнозных математических моделей для изучения перемещений высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков.....	65
2.1. Геодезические наблюдения за деформациями высоконапорных бетонных плотин	65
2.1.1. Общие положения прогнозирования	67
2.1.2. Требования к исходным данным для прогнозирования	72
2.2. Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе рекуррентного уравнения 1-го порядка	76
2.3. Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе рекуррентного уравнения 2-го порядка	84
2.4. Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе декорреляции входных воздействий	87

3. Результаты практических исследований прогнозирования перемещений контролируемых точек сооружения на основе построенных прогнозных моделей.....	93
3.1. Прогнозные математические модели для этапов эксплуатации плотины СШ ГЭС на этапах эксплуатации 2004–2005, 2005–2007, 2007–2009 и 2013–2016 гг.	93
3.1.1. Динамические модели 1-го типа (1-го порядка) на этапе эксплуатации 2004–2005 гг.	93
3.1.2. Динамические модели на этапе эксплуатации 2004–2008 гг.	102
3.1.2.1. Динамические модели 1-го и 2-го типов (1-го порядка) (период основания прогноза 2004–2007 гг.)	102
3.1.2.2. Динамические модели 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий (период основания прогноза 2004–2007 гг.).....	106
3.1.3. Прогнозные математические модели для этапа эксплуатации плотины после аварии 2009 г.	108
3.1.3.1. Динамические модели 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий	108
3.1.3.2. Прогнозные математические модели на основе рекуррентных уравнений 2 типа 1-го и 2-го порядков и 3 типа 1-го порядка.....	115
3.1.4. Примеры построения прогнозных математических моделей с использованием возможностей для численных расчетов прикладной программы MS EXCEL.....	127
3.1.5. Методические решения при построении прогнозных математических моделей	129
3.2. Прогнозные математические модели для плотины СШ ГЭС на этапах эксплуатации 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 и 2013–2016 гг.	134
Заключение.....	152
Библиографический список.....	154
Приложение 1. Используемые термины	174
Приложение 2. Вычисление коэффициентов для решения системы нормальных уравнений.....	180
Приложение 3. Вычисление прогнозных значений с введением транспортного запаздывания.....	181
Приложение 4. Вычисление прогнозных значений перемещений для запаздывания (0,5; 1.0; 1.5; 2.0 месяц)	182

ВВЕДЕНИЕ

К настоящему времени в Российской Федерации возведено большое количество высоконапорных гидротехнических сооружений, к которым (вследствие возможности катастрофических последствий при их разрушении) предъявляются повышенные требования к их надежности. Как показывает опыт натурных наблюдений за поведением высоких плотин в процессе их эксплуатации, состояние сооружений и их оснований в той или иной мере отличается от предполагаемых на стадии проектирования; при этом отличаются определенным образом и нагрузки. В связи с этим оценка эксплуатационного состояния сооружения и его безопасность следует осуществлять путем сравнения измеренных количественных и качественных диагностических показателей с их критериальными значениями, установленными на стадии проектирования сооружения и откорректированными на стадии его эксплуатации. С этой целью для оценки изменения диагностических показателей и более точной их корректировки должны быть разработаны и откалиброваны по данным натурных наблюдений прогнозные математические модели поведения сооружения.

Одними из главных и незаменимых видов натурных наблюдений являются геодезические исследования гидротехнических сооружений. 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 недостаточное внимание. Можно считать, что прогнозирование объединяет

в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, и 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.

К настоящему времени накоплен большой объём данных натурных наблюдений эксплуатируемых гидротехнических сооружений. При обработке последних традиционно применяется регрессионный анализ, позволяющий выявлять 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, когда при математической обработке удастся выявить и учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции сооружения на воздействующие факторы.

По мере развития численных методов анализа, всё большее место уделяется результатам, полученным с использованием расчётных математических моделей. При этом могут быть смоделированы различные нагрузки эксплуатационного периода, включая температурное воздействие внешней среды, учет сейсмической нагрузки и гидродинамического давления воды, в том числе и ведущие к необратимым изменениям составляющие, такие как пластичность, возникновение и продвижение трещин, необратимые перемещения плотины, реологические свойства основания 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 похода 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 не выявленное инерционное запаздывание и более объективно выполнять прогнозирование величин деформации сооружения и оценивать параметры математической модели. Существенный вклад в разработку методологических и теоретических положений для построения прогнозных моделей данного типа привнёс д.т.н., профессор Гуляев Ю.П. Отличительной особенностью его разработок является тот факт, что в качестве прогнозной модели использовалось уравнение условного математического ожидания процесса перемещения наблюдаемых точек сооружения, что позволило получить прогноз перемещений каждой наблюдаемой точки и оценить точность прогнозирования по модели, обобщающей закономерности развития процесса. Выполненные исследования базируются на данном методологическом и теоретическом положениях и являются их дальнейшим развитием.

В представленной авторами монографии изложены теоретические и методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа для изучения процесса деформаций гидротехнических сооружений на примере высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС):

– выполнен всесторонний анализ существующих методов построения прогнозных математических моделей для изучения поведения гидротехнических сооружений;

– разработаны различные варианты прогнозных математических моделей динамического типа на основе геодезических данных для анализа перемещений плотины СШГЭС с различными входными воздействиями, дискретностью исходных данных, периодом основания прогноза, декорреляцией входных воздействий и транспортным запаздыванием;

– представлены и проанализированы методические особенности конструирования прогнозных математических моделей динамического типа для анализа процесса перемещений высоких плотин;

– выполнены исследования по совершенствованию прогнозных математических моделей с целью выбора наиболее оптимальной (с точки зрения точности и адекватности) модели для изучения деформационного процесса перемещений плотины СШ ГЭС после аварии 2009 года и на последующие годы;

– представлены методические особенности построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для анализа процесса перемещений плотины СШГЭС на этапах эксплуатации 2013-2016 гг.

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

1.1. Общие сведения о действии сил и перемещениях на плотинах ГЭС

Плотины ГЭС классифицируются рядом авторов [Попов, 1973; Гуляев, 2008] 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 возникает напряженно-деформированное состояние плотины и ее перемещения, наблюдаемые геодезическими методами. Ограничимся при этом рассмотрением бетонных плотин, которым уделяется большое внимание.

Силы, воздействующие на плотину, 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 [Карлсон, 1980; Зайцев, Марфенко, Михелев, 1991]. Вертикальные

перемещения 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, ориентируют 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 рис. 1.1 показана схема действия основных сил, действующих в поперечном сечении гравитационной плотины [Попов, 1973]. Показано что горизонтальная составляющая напора воды стремится сдвинуть или опрокинуть сооружение, а вертикальное взвешивающее и фильтрационное давление – стремится поднять сооружение. Кроме того, физико-химическое и биологическое действие воды постоянно разрушает материал сооружения, что, в конечном счете, также находит свое отражение, как в изменении 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 оказывает влияние не только на изменение температурного состояния бетона и воды, от нее, как правило, существенно зависят сроки и харак-

тер паводковых и меженных периодов, 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.

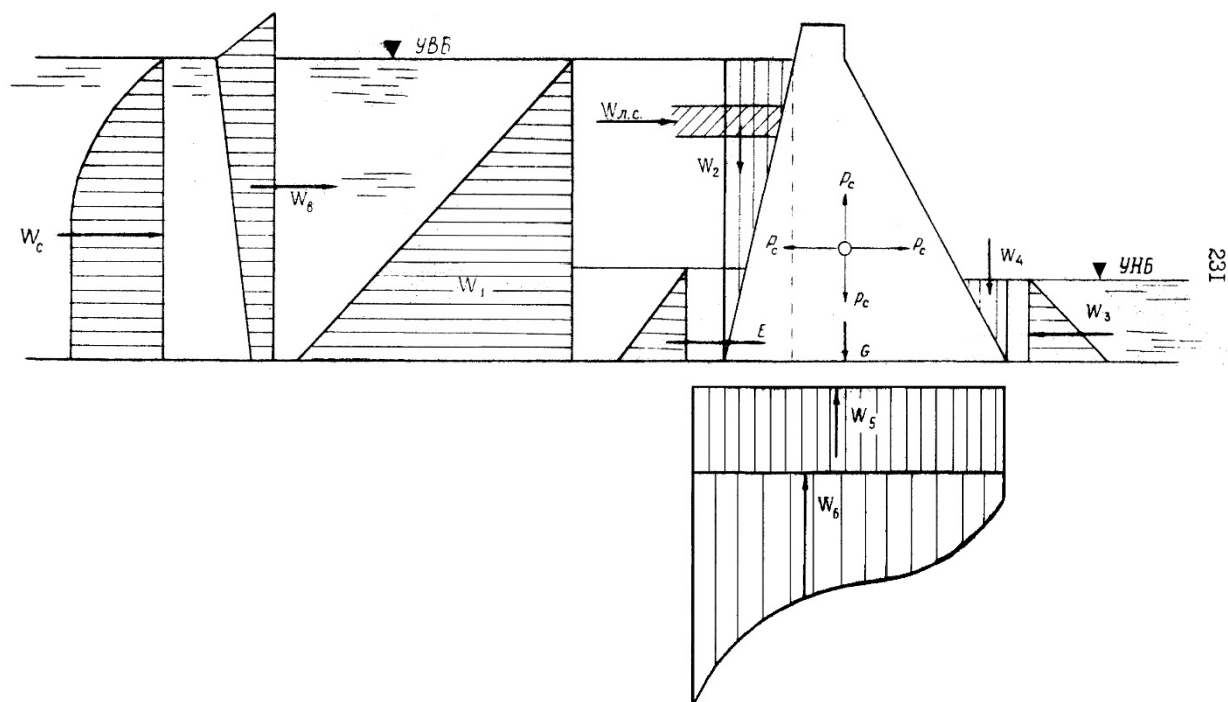


Рис. 1.1. Схема сил, действующих на водоподпорное сооружение

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 сторон верхнего и нижнего бьефов, обусловленные наклонными гранями плотины; W_5 – взвешивающее давление воды на подошву сооружения; W_6 – фильтрационное противодавление; W_B – давление от действия волн; $W_{л.с.}$ – статическое давление льда; E – давление наносов в верхнем бьефе; W_c – сейсмическое давление при землетрясениях, вызывающее инерционные силы P_c , приложенные в центре тяжести плотины; УВБ, УНБ – соответственно уровни верхнего и нижнего бьефов.

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, изложенными в разделе 2.4. 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. Ну, а комплексные натурные наблюдения, достаточно хорошо организованные на гидротехнических сооружениях, позволяют в этом случае строить на основе геодезических данных достаточно полные и содержательные прогнозные модели динамического типа [Гуляев, Хорошилов, 2014].

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 [Гуляев, Хорошилов, 2012; Хорошилов, Квашенко, Носков, 2013].

1.2. Крупнейшие плотины мира

Издавна человек пытался строить гидротехнические сооружения, так как во многих районах земного шара в силу временных условий (паводки, разливы, наводнения и др.) невозможно было обойтись без трансформации стока рек [Кобелева, 2017]. Еще в XXIII веке 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. 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, как 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 (и правительства) – это справедливая цена за полученное электричество. Как же выглядят нынешние 20 самых высоких плотин мира?

Например, Токтогульская ГЭС, построенная в 1975 году, является наиболее крупной и значимой электростанцией, вырабатывающей до 40% электроэнергии в республике Кыргызстан (рис. 1.2, а). Эта плотина одновременно и ГЭС, и источник орошения. Она расположена на реке Нарын в Джалалабадской области. Токтогульское водохранилище глубиной 215 м, объёмом 19,5 км³, площадью

284 км² и длиной 65 км – является крупнейшим водохранилищем не только в Кыргызстане, но и во всей Центральной Азии. Значение Токтогульского водохранилища для гидроэнергетической отрасли страны поистине бесценно. Водохранилище состоит из узкого долинного участка непосредственно выше плотины и удлинённого озеровидного расширения (до 12 км) в Кетмень-Тюбинской котловине. Заполнение началось в 1973 году и по настоящее время осуществляет многолетнее регулирование стока. Проектное колебание уровня бьефа до 63 м. Создано для нужд энергетики и ирригации; строилось более 10 лет.

ГЭС Лунтань – компактная бетонная плотина на реке Хоншуйхэ в Китае. Её высота 216,5 м; запущена в 2009 году (рис. 1.2, б). 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.



а)



б)

Рис. 1.2. а) Токтогульская ГЭС; б) ГЭС Лунтань

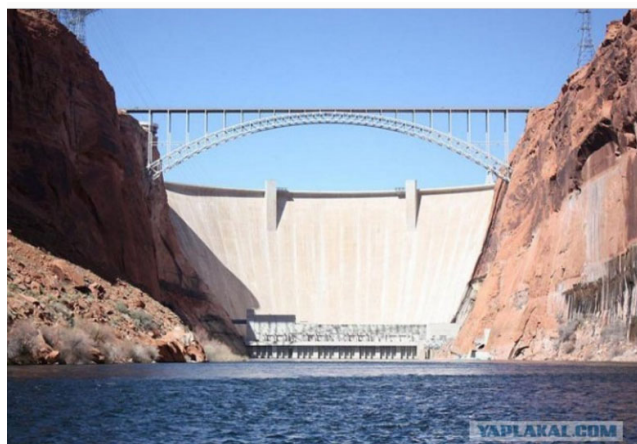
Плотина (ГЭС) Сяовань – расположена на крупнейшей реке Юго-Восточной Азии – Меконге, текущей по территории Китая, Мьянмы, Таиланда, Лаоса, Камбоджи, Вьетнама (рис. 1.3, а). Строительство плотины завершено в марте 2010 года, а пуск последнего гидроагрегата состоялся в 2013 году. Сяовань пред-

ставляет 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 году 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 (рис. 1.3, б).



а)



б)

Рис. 1.3. а) ГЭС Сяовань; б) 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. К созданию этой плотины приступили в 1966 году, и уже через 6 лет в 1973 она была пущена в эксплуатацию (рис. 1.4, а). 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 было более четырех лет, а ее строительство завершилось в 1965 году. Сама же плотина Контра – это арочная плотина над швейцарской рекой Верзаска, высота которой составляет 220 м (рис. 1.4, б).



а)



б)

Рис. 1.4. а) Плотина Дворжак; б) плотина Контра

Плотина Гувера – одна из крупнейших гидроэлектростанций страны, построена на границе двух штатов – Невады и Аризоны, в которых действуют разные часовые пояса. Когда-то её называли плотиной Боулдера. Нынче же плотина Гувера – это бетонное рукотворное чудо архитектуры, расположенное в Черном каньоне реки Колорадо мощностью 2,1 млн. кВт·ч (рис. 1.5, а). Это самая высокая дамба в Западной полушарии; высота плотины над уровнем реки Колорадо – 221 м. Выработка электроэнергии – 4 млрд. кВт·ч энергии в год. Содержание и обслуживание плотины Гувера полностью окупается за счет продажи энергии и денег от туристов из многих стран.

Плотина Луццоне построена в 1963 году в Швейцарии, известна своей самой высокой в мире искусственной стеной на одной из ее сторон. Достигает 225 м в высоту (рис. 1.5, б), а объем водохранилища составляет около 87 миллионов м³.



а)



б)

Рис. 1.5. а) Плотина Гувера; б) плотина Луццоне

Плотина Бхакра – одно из крупнейших комплексных гидроэнергетических сооружений Индии. Построена в 1963 году, имеет очень важное значение для развития сельского хозяйства и промышленности на равнинах верхнего Ганга, Пенджаба и северной части Раджастхана, где имеются плодородные, но засушливые почвы (рис. 1.6, а). Достигает 226 м в высоту, а объем водохранилища составляет 9870 миллионов м³.



а)



б)

Рис. 1.6. а) Плотина Бхакра; б) плотина Карун-4

Плотина Карун-4 расположена на реке Карун на юго-западной части Ирана. Это 230 м арочная бетонная плотина является самой высокой плотиной в Иране (рис. 1.6, б). 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 году в Китае. Она работает не только как ГЭС, но и как сооружение для предотвращения наводнений; также её используют для навигации, туризма и рыболовства (рис. 1.7, а). Достигает в высоту 233 м, объем водохранилища составляет 4580 м³.

Чиркейская ГЭС расположена на р. Сулак в республике Дагестан. Она построена в сейсмически активном районе, в сложных геологических условиях. Строительство было начато в 1964 году, а последний четвертый агрегат ввели в работу только в 1976 году (рис. 1.7, б). 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, учитывая её маневренные возможности, стала основной регулирующей станцией в Объединенной энергосистеме юга России.



а)



б)

Рис. 1.7. а) Плотина Шибуйя; б) Чиркейская ГЭС

Плотина Эртан – арочная плотина высотой 240 м; расположена на реке Ялонг, притоке Янцзы в провинции Сычуань, юго-запад Китая (рис. 1.8, *а*). Объем водохранилища составляет 5800 миллионов м³.

Саяно-Шушенская ГЭС – уникальная арочно-гравитационная плотина – крупнейшая ГЭС в России и шестая по величине в мире. Плотина выстроена на реке Енисей возле города Саяногорска (рис. 1.8, *б*). Конструкция плотины не имеет аналогов в мировой и отечественной практике. Высота сооружения составляет 242 м, длина по гребню плотины – 1066,4 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.



а)



б)

Рис. 1.8. *а)* Плотина Эртан; *б)* 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 мира (рис. 1.9, а).

Плотина Эль Кахон – это гигантский строительный проект. Официальное название данного сооружения звучит как Центральная гидроэлектростанция им. Франциско Моразана. Расположена в Западном Гондурасе на реке Сантьяго в Мексике (рис. 1.9, б). Её высота составляет 226 м, а длина – 282 м. Суммарная мощность электростанции составляет 0,7 млн. кВт·ч электроэнергии. Уникальность ГЭС состоит в том, что она имеет самую высокую каменно-набросную с железобетонным противофильтрационным экраном плотину в мире.

Плотина Оровилл расположена на реке Фитер (приток реки Сакраменто) в штате Калифорния (США). Построена плотина в 1961-68 годах. Земляная насыпная дамба высотой 235 м является самой высокой в США; объем водохранилища составляет 4299 миллионов м³. Основная задача – это обеспечение водоснабжения населения и борьба с наводнениями, а также попутная выработка электроэнергии (рис. 1.10, а).



а)



б)

Рис. 1.9. а) Плотина Мика; б) плотина Эль Кахон

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 (рис. 1.10, б); выше, чем самая высокая плотина в России (Саяно-Шушенская), но в мировом рейтинге она не входит даже в первую десятку.



а)



б)

Рис. 1.10. а) Плотина Оровилл; б) плотина Деринер

Плотина Лаксива – арочная плотина высотой 250 м, расположена на реке Хуанхэ в провинции Цинхай (рис. 1.11, а) на северо-западе Китая.

Плотина Мовуазен высотой 250 м, живописно смотрится на фоне горы Мон Блан де Шейлон. По высоте эта вторая плотина в Швейцарии и 8-я в мире (рис. 1.11, б). Первоначальная высота плотины была 237 м. Однако, в 1991 году 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, выстроена на реке Бхагирати неподалеку от города Тери, в индийском штате Уттараканде (рис. 1.12, а).

ГЭС Ингури – находится на р. Ингури в Грузии. Она является второй по высоте бетонной арочной плотиной в мире (рис. 1.12, б).



а)



б)

Рис. 1.11. а) Плотина Лаксива; б) плотина Мовуазен



Рис. 1.12. а) Плотина Тери; б) ГЭС Ингури

Обобщая вышесказанное, отметим, что на сегодняшний день гидроэлектростанции — это комплекс сложных гидротехнических сооружений и оборудования, которые играют важнейшую роль для выработки электроэнергии, а также в предотвращении наводнений, стихийных катастроф и т.п.

1.3. Саяно-Шушенский гидроэнергетический комплекс

Саяно-Шушенский гидротехнический комплекс расположен в верхнем течении р. Енисей и включает: высоконапорную Саяно-Шушенскую гидроэлектростанцию, мощность которой составляет 6 400 МВт и контррегулирующий Майн-

ский гидроузел, мощность которого составляет 321 МВт [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Вульфович, 2013].

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 [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012]. 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) (табл. 1.1).

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.

Таблица 1.1

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 – инъектирования эпоксидных растворов в трещинах.

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 плотиной 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 [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Статическое и динамическое поведение..., 2013].

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 (рис. 1.13). Плотина разделена на 68 секций радиальными швами через каждые 15,8 м. Левобережная часть плотины – глухая и состоит из 16 секций (1-16 секции) общей протяженностью по гребню плотины 252,2 м. Правобережная часть плотины – так же глухая и состоит из 19 секций (секции 49-67) общей протяженностью 300 м. Водосбросная часть плотины содержит 12 секций (секции 37-48) общей протяженностью 190 м. Станционная часть плотины состоит из 21 секции (секции 16-36) общей протяженностью по гребню 331 м. Секция 33 – ключевая.

Береговые арки имеют меньшие радиусы. Напорная вертикальная грань плотины имеет в нижней 50 м части плавную подрезку, достигающую у основания 10 м. Низовая грань имеет уклон: в верхней части 1 : 0,05, в средней – 1 : 0,25, в нижней – 1 : 0,7.

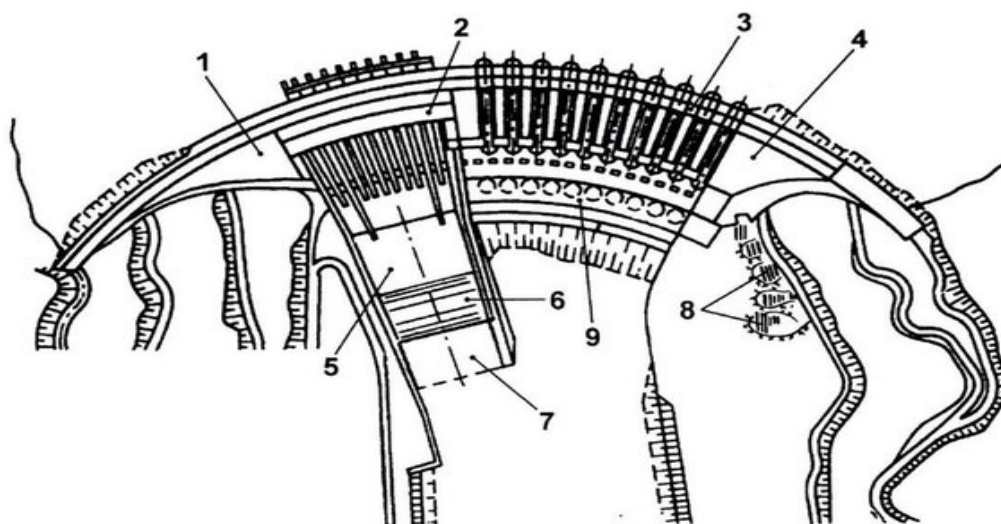


Рис. 1.13. План гидротехнических сооружений Саяно-Шушенской ГЭС:

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

Водосбросная плотина имеет 11 водосбросных отверстий, пороги водоприемников которых заглублены на 61 м от НПУ (рис. 1.14).

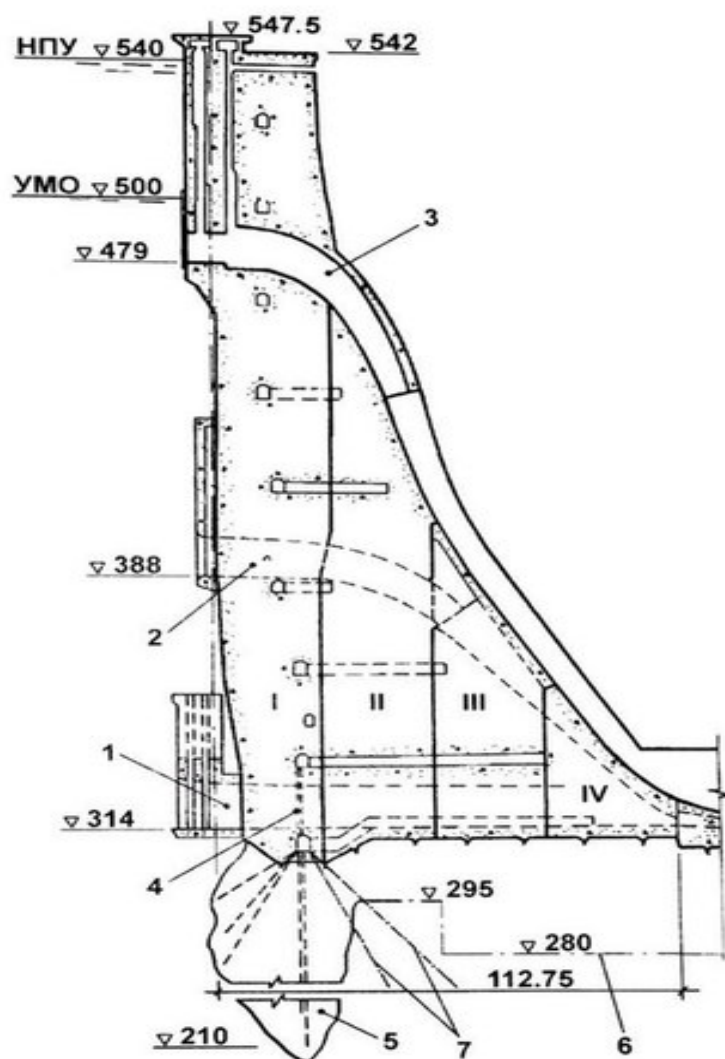


Рис. 1.14. Разрез водосбросной плотины Саяно-Шушенской ГЭС

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

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.

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 [Гордон, Скворцова, Стефаненко, 2011; Якубсон, 2012; Бронштейн, Грошев, Савич, Речицкий, 2014; Савич, Басова, Горохова, Ильин, 2015]. 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.

Основные диагностические показатели состояния и работы гидротехнических сооружений (на примере высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС)

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 позволяет выявить факторы, влияющие на безопасность сооружения, которые не были учтены в проекте и при возведении сооружения [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Методика определения критериев..., 2001; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Волынчиков, Газиев, 2015].

В то же время обеспечение эксплуатационной надежности высоконапорных бетонных плотин является важной научно-технической и социальной задачей. При этом геодезические измерения являются необходимыми и в то же время одними из основных составных частей натурных наблюдений, так как именно они непосредственно дают информацию о пространственных перемещениях си-

стемы «плотина – основание» под действием нагрузок, о деформации береговых массивов, вмещающих гидротехническое сооружение, а также информацию о влиянии техногенных факторов в случае проведения ремонтных работ [Рекомендации по анализу данных..., 2001; Броншейн, 2008; Гордон, Затеев, Стефаненко, 2004, 2005; Гордон, 2010; Козинец, 2011; Тангенциальные перемещения плотины..., 2011; Пермякова, Епифанов, 2011; Савич, 2012; Костылев, 2013; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013; Статическое и динамическое поведение..., 2013; Исследование влияния различных факторов..., 2014; Павловская, Савельева, Фролова, 2014]. 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 [Гуляев, Хорошилов, 2014].

Высотные и плановые смещения бетонной плотины относятся к основным диагностическим параметрам, связанным с критериями безопасности гидротехнических сооружений [Методика определения критериев..., 2001; Дурчева, 2007; Гордон, Скворцова, 2012, 2013; Газиев, Савич, 2013, 2014]. 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.

Основные показатели работы гидротехнических сооружений характеризуют напряженно-деформированное состояние, 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 [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Методика определения критериев..., 2001]:

– 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 учитываются также повреждения, непредвиденные процессы в сооружениях и их основаниях, которые связаны с недостаточным объемом инженерно-геологических изысканий, качеством проекта и строительных работ, старением материалов и износом сооружений [Гинзбург, Юделевич, Шейнкер, 2000; Оценка устойчивости бетонной плотины..., 2001; Дурчева, Пучкова, Загрядский, 2000; Толошинов, Александров, 2006; Карпик, Стефаненко, 2009; Могилевская, 2011; Савич, Замахаев, Пудов, 2012; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Газиев, Савич, 2014. 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 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 [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Дурчева, 2007; Марчук, 2012; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Газиев, Савич, 2014]. 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. В соответствии с [РД 153-34.2-21.342-00, 2006] измеряемый (или вычисляемый по результатам измерений) контролируемый показатель, выбранный в качестве диагностического показателя, должен отвечать следующим условиям:

- диапазон изменения значений показателя при нормальном эксплуатационном состоянии должен в несколько раз превосходить погрешность измерительной системы;

- диагностический показатель должен поддаваться прогнозу с помощью детерминистических или статистических прогнозных моделей.

При выборе диагностических показателей из всей имеющейся совокупности контролируемых показателей рекомендуется, чтобы диагностические показатели обладали следующими свойствами [Методика определения критериев..., 2001]:

- диагностический показатель должен быть достаточно **чувствителен** к изменению внешних воздействий на сооружение (например, если контролируемый показатель *не реагирует* на изменение УВБ и температуру окружающей среды, то вряд ли он пригоден в качестве диагностического);

- в диапазоне изменения внешних воздействий при нормальной эксплуатации сооружения (например, при изменении УВБ) амплитуда изменения показателя, выбранного в качестве диагностического, должна в несколько раз превосходить погрешность измерения (вычисления) этого показателя; в противном случае его **замер** будет соизмерим с погрешностью, а диагностика будет недостоверной;

- состав диагностических показателей должен быть, по возможности, полным, таким, чтобы контролировать все возможные сценарии повреждений и отказов;

– во избежание ложной тревоги желательно, чтобы один и тот же диагностический показатель измерялся не одним, а двумя независимыми измерительными преобразователями.

Определение критериальных значений диагностических показателей для эксплуатируемых сооружений следует осуществлять на основе многофакторного анализа следующей информации [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Методика определения критериев..., 2001]:

– 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.

До введения в действие «Методики» [Методика определения критериев..., 2001] оценка состояния гидротехнических сооружений (ГТС) гидроэлектростанций регламентировалась «Правилами» [Правила технической эксплуатации..., 2003], в котором предусматривалась одна проверка состояния ГТС – это сравнение измеренных показателей с их предельно допустимыми значениями (ПДЗ). То есть возможных групп состояний было два – состояние сооружения отвечало требованиям норм, если критериальные соотношения выполнялись, и состояние сооружения не отвечало требованиям норм, если критериальные соотношения нарушались. Такой подход, во-первых, не оставлял возможности принятия заблаговременных мер по предотвращению аварий, что не соответствует требованиям ст. 9 Федерального закона [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997], и во-вторых – не в полной мере соответствовал реальной практике эксплуатации ГТС. Наличие двух возможных состояний (исправного и неисправ-

ного) естественно в основном для изделий с «мгновенным» отказом (электрическая лампа, реле, транзистор и т.п.); эти изделия или работают, или не работают. Отказ же гидротехнического сооружения – не мгновенный; сооружение оснащено контрольно-измерительной аппаратурой, позволяющей зафиксировать отклонения от нормальной работы и предотвратить повреждение или отказ. «Идеальных» гидротехнических сооружений не существует и практика эксплуатации ГТС такова, что, несмотря на наличие неисправностей, эти сооружения продолжают эксплуатироваться, при этом обнаруженные неисправности устраняются.

Вследствие вышеназванных обстоятельств 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 [Методика определения критериев..., 2001; Гордон, Затеев, Стефаненко, 2004, 2005; Гордон, Скворцова, 2012, 2013; Савич, 2013].

В соответствии с [РД 153-34.2-21.342-00, 2006] для обеспечения безопасности эксплуатируемых сооружений СШ ГЭС было рекомендовано введение двух уровней критериальных значений диагностических показателей состояния ГТС: $K1$ и $K2$, что обеспечивает возможность своевременного принятия мер по ликвидации потенциально опасного и предотвращению предаварийного (и аварийного) состояний сооружения.

За критериальные значения осадок ($K1$) сооружений на нескальных основаниях при среднем давлении под подошвой сооружений меньше расчетного сопротивления грунта основания на стадии проекта принимаются значения осадок [Основания гидротехнических сооружений, 1986], полученные расчетом (например, методом послойного суммирования в пределах сжимаемого слоя в соответствии со СНиП 2.02.02-85). При среднем давлении под подошвой сооружения, большем расчетного сопротивления грунта основания, критериальные значения осадок ($K1$) на стадии проекта принимают равными расчетным значениям, определенным численными методами, учитывающими упругопластический характер

деформирования грунтов, пространственное напряженное состояние, последовательность возведения сооружения в соответствии со СНиП 2.02.02–85 [Основания гидротехнических сооружений, 1986].

Отметим при этом, что изменение осадок сооружений во время строительства зависит от ряда производственных факторов и трудно поддается прогнозу. Изменение осадок же в условиях нормальной эксплуатации во времени определяются по *прогнозным моделям*, основанным на статической обработке данных натурных наблюдений. Прогноз изменения осадок в период эксплуатации на любой момент времени выполняется в соответствии с рекомендациями [РД 153-34.2-21.342-00, 2006].

За критериальное значение (K_2) горизонтального перемещения гребня плотины принимается величина, полученная расчетом на особое сочетание нагрузок методами строительной механики, теории упругости, пластичности при принятых в проекте физико-механических характеристиках плотины и основания [Основания гидротехнических сооружений, 1986; Рекомендации по определению предельно..., 1985]. Выделяют следующие уровни технического состояния и безопасности ГТС [Методика определения критериев..., 2001]:

I – технически исправное состояние (нормальный уровень безопасности) – состояние сооружения, соответствующее всем требованиям нормативных документов и проекта;

II – работоспособное состояние (пониженный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой техническое состояние гидротехнического сооружения удовлетворяет требованиям обеспечения технологических процессов и безопасной эксплуатации, но имеются дефекты и повреждения, а также частичные нарушения правил эксплуатации, которые не могут оказать непосредственного влияния на снижение работоспособности гидротехнического сооружения, его основания и строительных конструкций; при этом значения диагностических показателей состояния сооружения не превышают критериальных значений K_1 ;

III – ограниченно работоспособное состояние (неудовлетворительный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой гидротехническое сооружение и его основание пригодны для дальнейшей эксплуатации при условии введения щадящих режимов работы и разработки мероприятий по устранению выявленных дефектов и повреждений;

IV – неработоспособное (опасное, аварийное) состояние (опасный уровень безопасности) – категория технического состояния, при которой гидротехническое сооружение, его основание, строительные конструкции или оборудование непригодны для дальнейшей эксплуатации до восстановления, капитального ремонта или реконструкции с ликвидацией всех повреждений и разрушений, которые привели к потере работоспособности.

Границы между техническими состояниями (предельно допустимые значения диагностических показателей для данного технического состояния) задаются критериями безопасности.

Критериальные значения ($K1$, $K2$) горизонтальных перемещений гребня плотины должны быть уточнены в процессе эксплуатации плотины на основе контрольных расчетов с учетом фактических физико-механических характеристик бетона плотины и основания, а также выявленных закономерностей работы реального сооружения. Для уточнения критериальных значений ($K1$, $K2$) горизонтальных перемещений гребня бетонных плотин используют статистический метод с целью установления эмпирической зависимости горизонтальных перемещений от уровня воды в водохранилище (НПУ для $K1$ и ФПУ для $K2$), температуры внешней среды (t) и времени (T) в соответствии с [Пособие к «Методике...», 2006].

$$x = \phi[H(t), t(T), T], \quad (1.1)$$

где x – горизонтальные перемещения гребня плотины; H – уровень верхнего бьефа; t – температура; T – время.

Вследствие этого, ниже обозначенные критериальные соотношения $K1$ и $K2$ приводят к следующим возможным состояниям сооружений ГТС:

– **нормальное** (исправное) состояние сооружения, если:

$$F_{изм.} \leq K1; \quad (1.2)$$

– **потенциально опасное** состояние сооружения, если

$$K1 < F_{изм.} \leq K2; \quad (1.3)$$

– **предаварийное** состояние сооружения, если

$$F_{изм.} > K2, \quad (1.4)$$

где $F_{изм.}$ – измеренное (вычисленное в процессе измерений) значение диагностического показателя.

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 [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Методика определения критериев..., 2001; Дурчева, 2007; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2013; Газиев, 2013; Savich A. I., Bronshtein V. I., 2013], позволяющие в целях раннего обнаружения отклонений от проектной работы состояния ГТС, наряду со сравнением диагностических показателей с критериальными значениями, осуществлять сравнение измеренных диагностических показателей с прогнозируемым интервалом их изменения.

Для обеспечения безопасности и контроля технического состояния плотины СШГЭС в качестве одного из диагностических показателей выбраны радиальные перемещения гребня плотины ключевой секции 33 (отметка 542 м), которые измеряются прямыми и обратными отвесами, расположенные в секциях 10, 18, 25, 33, 39, 45, 55 (рис. 1.15; показаны красными линиями) и соответствующие им значения таких параметров, как гидростатическое давление и температура бетона тела плотины в нижней (отметка 462 м; расстояние от напорной грани 30,7 м; расстояние от низовой грани 2,85 м) и верхней (отметка 461 м; расстояние от напорной грани 2,6 м) базовых точках [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012].

Выбор базовых точек по температуре обусловлен тем, что для Саяно-Шушенской плотины удалось подобрать такие термометры, показания которых обобщенно характеризуют нагрев и охлаждение верховой и низовой граней плотины. В частности, охлаждение бетона в нижней базовой точке на 1 градус вызывает увеличение прогиба секции 33 на 2,4 мм; а охлаждение бетона в верхней базовой точке на 1 градус приводит к уменьшению прогиба на 2,2 мм.

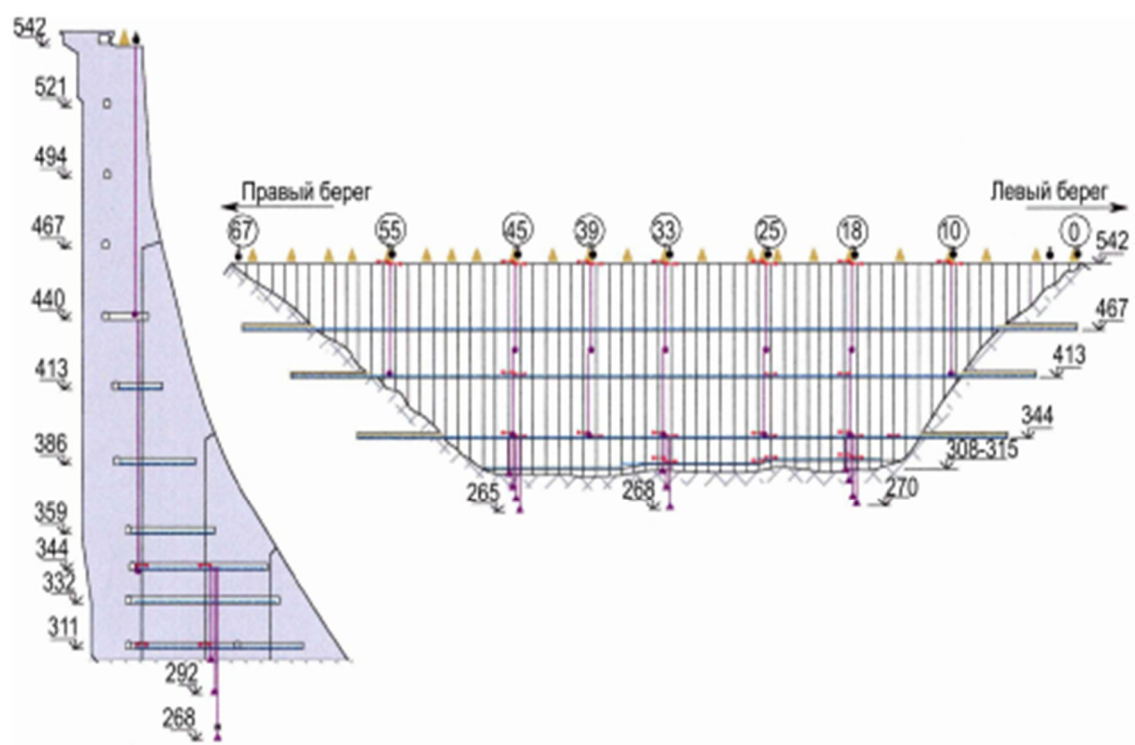


Рис. 1.15. Планово-высотная сеть плотины Саяно-Шушенской ГЭС

1.4. 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 совместно 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 [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997].

Разработка прогнозных математических моделей является обязательным условием диагностического контроля плотины Саяно-Шушенской ГЭС (СШ ГЭС) в соответствии с принятой «Методикой определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» [Методика определения критериев безопасности..., 2001] и рекомендациями Федерального закона [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997]. В соответствии со ст.9 Федерального закона [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997] 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». При этом согласно методики 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.

Вопросы уточнения диагностических показателей рассмотрены в работах [Дурчева, 2007; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Гордон, Скворцова, 2012; Газиев, 2013]; 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 эксплуатация) должны быть разработаны и откалиброваны по данным натурных наблюдений прогнозные математические модели поведения сооружений.

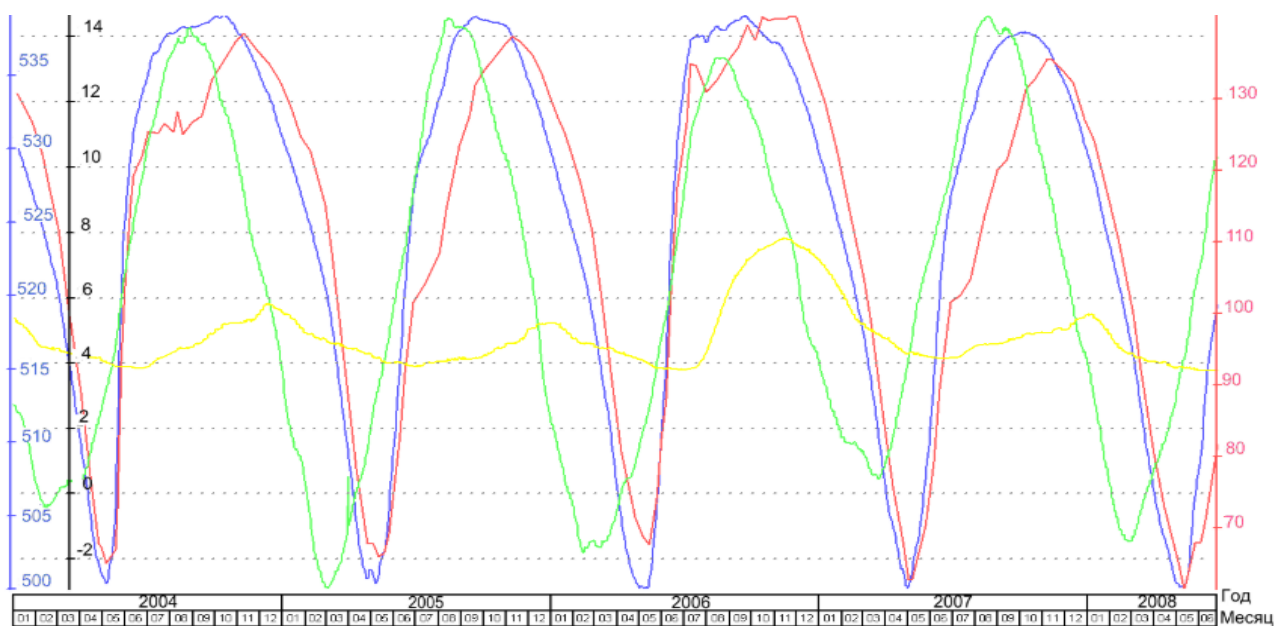
Осенью 1990 года водохранилище Саяно-Шушенской ГЭС было впервые наполнено до проектной отметки (НПУ=540 м) и с 1991 года ГЭС и её сооружения вышли на проектный эксплуатационный режим [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012]. В этом режиме для плотины характерно циклическое изменение основной нагрузки – гидростатического давления верхнего бьефа (УВБ) на верхнюю грань плотины и дно водохранилища. Каждый цикл имеет две ветви – ветвь нагружения (наполнение водохранилища: май-октябрь); ветвь разгрузки (сработка водохранилища: ноябрь-апрель).

Так как обеспечение надежной и безопасной работы высоконапорных плотин является одной из важнейших задач в процессе их эксплуатации [О безопасности гидротехнических сооружений, 1997], а учитывая, что многие из этих сооружений эксплуатируются уже длительное время, то вероятность возникновения негативных, а иногда и очень опасных своими последствиями процессов, существенно повышается. Поэтому многочисленные исследования методов анализа данных мониторинга в целях безопасной эксплуатации плотин в условиях реального времени приобретают все большее значение.

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 (например, высокая «приточность»). Отметим при этом, что 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.

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 которой зависит время и характер паводковых и меженных периодов, распределение и изменение температуры в самом сооружении и д. п. Существенный вклад в разработку прогнозных математических моделей подобного типа отражен в работах [Александровская, Урахчин, 1974; Гордон, Соколовский, Цовикян, 1989; Гинзбург, 2000; Александров, 2006, 2008; Идентификация параметров расчетных моделей..., 2015], а методологический подход в [Гинзбург, 1974; О безопасности гидротехнических сооружений, 1997; Ghiasian M., Ahmadi M.T., 2000; Броншейн, Грошев, 2002; Панкрушин, 2002; Гуляев, 2008; Вульфович, 2013 и др.

В качестве примера на рис. 1.16 представлены совмещенные 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 [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012].



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

Рис. 1.16. Хронограммы перемещений гребня плотины, УВБ и температура бетона в базовой точке $T_{\text{низ}}$ и $T_{\text{верх}}$ во времени (2004–2008 гг.)

На основании анализа графиков можно сделать следующие выводы [Гуляев, Хорошилов, Кобелева, 2015].

1. 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.

2. Горизонтальные перемещения точек плотины подвержены сезонным колебаниям, степень проявления которых зависит от местоположения точек и температурного или гидростатического влияния для каждого года.

3. 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 давление, количество срабатываемой воды и др. Очевидно, что необходимо выделять

постоянную составляющую среднегодового влияния температуры, гидростатического давления и других факторов.

С целью анализа и прогнозирования поведения бетонных плотин на основе данных мониторинга за последние десятилетия были разработаны многочисленные математические модели. Анализ публикаций в области теории и методов создания моделей позволяет выделить несколько направлений исследований: это разработка статистических, детерминистических и гибридных моделей [Wu Z. R., Shen C. S., Ruan H. X., 1988; Léger P., Leclerc M., 2007; Ardito R., Maier G., Massalongo G., 2008; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Salazar F., Morán R., Toledo M. A., Oñate E., 2015; Li B., Yang J., Hu D., 2019; Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre JP., 2018; Mata J., Tavares de Castro A., Sá da Costa J., 2013; Zhao E., Wu Ch., Wang Sh., Hu J., Wang W., 2020].

В принципе, могут быть смоделированы различные, в том числе и ведущие к необратимым изменениям составляющие, например, такие как пластичность, возможность возникновения и продвижения трещин в теле плотины, фильтрация воды через тело плотины [Ardito R., Maier G., Massalongo G., 2008; Stephan P., Salin J., 2012; Глаговский, Белкова, 2008] и ее необратимые перемещения, реологические свойства основания и т.п. [Jafari M., 2016; Gaziev E.G., 2012; Savich A.I., Il'in M.M., Elkin V.P., Rechiyskii V.I., Basova A.B., 2013; Kostylev V.S., 2013; Mirsaidov M.M., Sultanov T.Z., 2015].

Математические модели для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований представлены в работах [Параметрическая идентификация расчетных моделей..., 2001; Газиев, 2010; О построении математической модели..., 2011; Саинов, 2011; Khrapkov A.A., Kostylev V.S., Scvortsova A.E., 2012; Geologic-engineering and geomechanical..., 2013; Орехов, 2014]. Ну, а в силу того, что многие плотины были построены в горных регионах с неблагоприятными геологическими и геотехническими условиями (разломы, трещины, зоны сдвига горных пород и т.п.), то обязательными являются исследования устойчивости бортов водохранилищ [Толошинов, Алексан-

дров, 2006; Дергачева, 2007; Затеев, 2008; Гордон, 2010; Марчук, 2012, 2014; Тетельмин, 2013, 2014]. Однако, все-таки большинство научных и практических исследований посвящены изучению смещений плотины, которые характеризуют ее глобальное поведение.

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 [Гуляев, Хорошилов, 2014]. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, и 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.

1.4.1. 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 [Marcello C., 1958]. При этом следует отметить, что многие исследования раннего периода имели постановочный характер или относились к решению частных задач. Характерное содержание такого рода исследований отражено в публикациях [Карпенко, 1979; Гридчин, 1970, 1973; Видуев, Староверов, 1972; Ганьшин, Нестеренок, 1973; Александровская, Урахчин, 1974; Рабочая книга по прогнозированию, 1980]. Для вынесения обоснованного заключения о степени надежности и безопасности состояния пло-

тины, как правило, необходимо иметь в распоряжении многочисленные данные натурных наблюдений и владеть эффективными методами их анализа. Для обработки последних традиционно применялся регрессионный анализ, позволяющий выявлять закономерности и взаимозависимости как реакцию исследуемых контролируемых параметров сооружения на приложенные внешние воздействия. В этом случае статистическая модель выгодно отличается от других моделей более простой формой установления и выявления любого типа корреляции между воздействующими факторами и выходными переменными в процессе реализации хорошо известных и изученных методов регрессии, включая множественную линейную регрессию [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Salazar F., Morán R., Toledo M.A., Oñate E., 2015; Rico J., Barateiro J., Mata J., Antunes A., Cardoso E., 2019], пошаговую регрессию [Shen W.W., Ren J.M., 2014], частичную регрессию метода наименьших квадратов [Shao C. F., Gu C. S., Yang M., Xu Y. X., Su H. Z., 2018], логистическую регрессию [Lan S.Y., Fang C., 2012] и др. В ряде случаев находимые решения сводились к различным видам аппроксимации с последующей экстраполяцией перемещений наблюдаемых контролируемых точек сооружений. При этом аппроксимировались изменения средней осадки во времени. Далее 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. К числу подобных работ, отражающих применение корреляционно-регрессионных и эвристических методов для оценки ожидаемого поведения сооружений можно отнести [Marazio A., 1965; Motta A., Russo F., 1967; Pelzer H., 1972; Häfner H., 1974; Schnitter N., 1976]. Представляет своеобразный интерес построение прогнозной математической модели осадки сооружения и ее последующая корректировка с использованием известных принципов механики грунтов – методов эквивалентного слоя и метода послойного суммирования [Орехов, 2003, 2014]. Вопросы моделирования и прогнозирования осадки сооружений в период их экс-

плутации при геодезических наблюдениях через равные промежутки времени представлены в работе [Гридчин, 1970], в которой для прогнозирования использовался степенной полином. При этом для получения 10%-ой 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 [Ardito R., Maier G., Massalongo G., 2008], 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 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 многочлена выбирается на основании минимума дисперсии отклонений фактически измеренных значений от значений соответствующего многочлена представлена в работе [Зайцев, Марфенко, Михелев, 1991]. При этом рассмотрены возможности отбраковки грубых ошибок результатов измерений и анализ однородности исследуемого процесса с возможным исключением временного запаздывания. В работе [Храпков, 2010] 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.

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 обеспечивалась как грамотно

продуманным выполнением натурных наблюдений, так и глубоким пониманием особенностей развития деформаций плотин ГЭС. Существенный вклад в разработку математических моделей данного типа привнесен коллективом сотрудников ОАО ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, что нашло отражение в работах [Гинзбург, 1969; Александровская, Урахчин, 1972, 1974; Эйдельман, Дурчева, 1981; Гинзбург, Шейнкер, Юделевич, 2000; Параметрическая идентификация расчетных моделей..., 2001; Добрецова, Юделевич, 2005; Mathematical model..., 2008; Газиев, 2010; О построении математической модели..., 2011; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Khrapkov A. A., Kostylev V. S., Scvortsova A. E., 2012; Орехов, 2014]. В работах ВНИИГ основное внимание уделено исследованию горизонтальных перемещений высоких плотин, поскольку эти перемещения являются одной из главных характеристик статической работы сооружения и его основания. Выявленные при этом зависимости горизонтальных перемещений от действия температуры воздуха, гидростатического давления и времени отличаются высокой точностью аппроксимации. Однако, к использованию для прогнозирования таких корреляционно-регрессионных моделей приходится относиться осторожно, так как в них лишь косвенно, по остаточным ошибкам аппроксимации, учитывается влияние фактора времени и не учитывается большое инерционное запаздывание реакции плотины на воздействия. 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 корреляционно-регрессионных моделей для моделирования поведения деформаций сооружений вызвало необходимость разработки новых подходов для решения данной проблемы.

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

В многогранном комплексе работ по обеспечению безопасности гидротехнических сооружений особое место занимает оценка текущего напряжённо-деформированного состояния сооружения и его прогнозирования на последующий период времени. Существенный вклад в разработку математических моделей данного типа представлен в работах [Параметрическая идентификация расчетных моделей..., 2001; Бронштейн, Грошев, 2002, 2008; Глаговский, 2008; Александров, 2008; Якубсон, 2012; Ходжибоев, 2013; Идентификация параметров расчетных моделей..., 2015; Беллендир, Гордон, Храпков, Скворцова, 2016].

При этом по мере развития численных методов анализа, всё большее место уделялось результатам, полученным с использованием расчётных 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 [Дурчева, Пучкова, Загрядский, 2000; Гахова, 2004; Гордон, 2010; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Вульфович, 2013; Salazar F., Moran R., Toledo M.A., 2015].

Вопросы численного моделирования напряженно-деформированного состояния высоких плотин под воздействием статических и динамических нагрузок, включая сейсмостойкость рассмотрены в работах [Бронштейн, Грошев, Савич, 2008; Статическое и динамическое поведение..., 2013]. Математические модели для оценки и прогнозирования прочности и устойчивости гидротехнических сооружений и их оснований представлены в работах [Добрецова, Юделевич, 2005; Александров, 2008; Газиев, 2010; О построении математической модели..., 2011; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013].

Для работы системы «бетонная плотина-скальное основание» исследовано влияние температуры воздуха и противодействия на использовании способа приближенного решения с использованием вспомогательных имитационных моде-

лей [Гинзбург, 2000; Евстифеев, Костылев, Храпков, 2012; Перельмутер, Сливкер, 2011].

Разработке математических моделей сезонного изменения состояния бетонных плотин под действием нагрузок эксплуатационного периода, включая температурное и сейсмологическое воздействия, посвящены работы [Александров, 2008; Храпков, Скворцова, Костылев, Щерба, 2011; Костылев, 2013]. В результате была построена и в последствие 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-ти 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 и т.п.

За период после окончания строительства плотины произошло значительное накопление остаточных смещений, что постоянно привлекает внимание различных исследователей. Среди работ, посвященных данной теме, следует выделить работу [Rechitskii V. I., Pudov K. O., 2014]. Здесь автор применил 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 или кусочно-линейных локальных базисных функций времени.

В работе [Костылев, 2013] 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 [Гордон, Скворцова, Стефаненко, 2013] 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 [Вульфович, 2013]. Влияние температурного фактора на напряженно-деформированное состояние плотины свидетельствует о необратимом характере изменений работы плотины после работы в нештатном режиме зимой 2009-2010 гг.; приводятся возможные причины снижения конструктивного модуля деформации плотины.

Службой мониторинга ГТС с применением конечно-элементной модели [Юсупов, Решетникова, Александров, 2013] были 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 порядка 4–6 мм, что составляет примерно 1 мм в год. Были названы ряд возможных причин нарастания роста необратимых перемещений; сделаны выводы о необходимости продолжения исследований в данном направлении с привлечением широкого круга научно-исследовательских организаций.

Разработка математических моделей сезонного изменения состояния бетонных плотин под действием нагрузок эксплуатационного периода представлена в работах, включая температурное воздействие внешней среды [Александров, 2008; Евстифеев, Костылев, Храпков, 2012], учет сейсмической нагрузки [Затеев,

2008], гидродинамического давления воды [Кузьменко, Сабуров, 2009; Математическое моделирование и расчет..., 2011; Вульфович, 2013; Об изменении значений собственных частот..., 2014]. Результаты исследований характера взаимодействия плотины с вмещающим массивом скальных пород и водохранилищем, выполненные в ЦСГНЭО и отражающие поведение плотины при статистических и сейсмических воздействиях, а также анализ оценки несущей способности системы «плотина-скальное основание-водохранилище» представлен в работах [Kostylev V. S., 2013; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013].

Применяются и другие 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 [Karimi I., Khaji N., Ahmadi M. T., Mirzayee M., 2010]; на основе динамического анализа состояния бетонных плотин в частотной области за счет изменения формы колебаний [Sani A. A., Lofti V., 2010]; путем решения дифференциальных уравнений для моделирования деформаций на основе данных единой системы объединенных датчиков [Jafari M., 2016]; в результате использования теории нестационарных временных рядов для анализа структурных данных с использованием алгоритма максимизации ожидания для нахождения оценок максимального правдоподобия параметров вероятностных моделей [Li F., Wang Zh., Liu G., Fu C., Wang J., 2015]; 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 [Su H., Wu Zh., Wen Zh., 2007] и др.

1.4.3. Прогнозные математические модели динамического типа

Несовершенство применения вышеперечисленных методов для моделирования деформаций сооружений вызвало необходимость новых подходов к решению данной проблемы [Гуляев, Хорошилов, Лисицкий, 2014]. 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 представлен в работах [Панкрушин, 2002, 2004; Мазуров, Панкрушин, Середович, 2004]; в этих разработках рассматривались задачи прогнозирования движений и деформаций по результатам геодезических наблюдений. Обобщение и развитие данных исследований представлено в работе [Панкрушин, 2002]; были предложены новые подходы к изучению геодинимических 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 геодинимики, инженерных сооружений и технологического оборудования.

Существенный вклад в методологический подход при разработке прогнозных математических моделей на основе динамического типа при изучении деформаций сооружений и земной коры отражен в работе [Мазуров, Панкрушин, Середович, 2004].

Среди работ высокого научного уровня в данной области исследований необходимо отметить работу [Есиков, 2011], 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.

В монографии [Гуляев, 2008] 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 опи-

сания 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.

Одним 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. 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.

Особенности математического моделирования деформационных процессов

Результаты геодезических наблюдений за деформациями любого наземного сооружения представляют в интегральной количественной форме объективную и точную информацию о сложном взаимодействии его конструкций с грунтовым основанием и внешней средой [Гуляев, Хорошилов, 2014]. Такая информация является основой для выявления путем математического моделирования закономерностей развития деформационных процессов, контролируемых не только геодезическими, но и комплексными натурными наблюдениями. Выявленные для конкретных локальных условий закономерности деформаций отдельных сооружений могут быть обобщены на надлокальных уровнях, выбранных по заданным критериям однотипности сооружений, однородности инженерно-геологиче-

ских условий грунтов оснований и близости характера воздействий внешней среды. Степень объективности выявленных закономерностей деформации сооружений и достоверности прогнозов определяется в значительной мере рядом основных факторов. Без знания природы и структуры объекта исследования трудно правильно ориентироваться в характере проявления причинно-следственных связей, присущих предмету исследования. Только в результате анализа таких связей можно обоснованно выбрать формы и метод математического описания, определить необходимые объемы и точность наблюдений, выработать методику прогнозирования и пути эффективного использования его результатов. Прежде всего, необходимо грамотно обеспечить оптимальную пространственно-временную достаточность и измерительную точность геодезического контроля за деформациями. Затем следует обоснованно, но неформально выполнить структурную и параметрическую идентификацию математических моделей. При этом к структурной идентификации относим определение и формирование подсистем в исследуемых системах «сооружение-среда», выбор периодов основания прогноза и упреждения, а к параметрической идентификации – корректный выбор однозначных непротиворечивых форм математического описания наблюдаемых процессов деформации, соответствующего природе их возникновения и развития, оценку параметров моделей и их адекватности. Особое внимание нужно обращать на выбор периодов основания прогноза и упреждения, чтобы они охватывали одинаковую природу развития процесса или учитывали ее изменения адаптивными свойствами модели. При статистической оценке параметров и адекватности моделей важно, чтобы законы распределения исходной информации соответствовали используемым методам оценки.

Теория динамических систем, возникшая из теорий автоматического регулирования и управления, давно и успешно применяется в различных областях науки, техники и производства [Заде Л., Дезоер Ч., 1970; Сейдж Э. П., Мелса Дж. Л., 1974; Казаков, 1975; Евланов, 1979]. Важнейшим достоинством математических моделей динамических систем, описываемых дифференциаль-

ными или разностными уравнениями, является то, что они отражают, с учетом инерционного запаздывания, естественные свойства преобразования входных воздействий в реакцию системы, представленную выходным сигналом.

Таким образом, использование теории динамических систем для моделирования деформационных процессов на основе результатов геодезических наблюдений представляло новый этап развития прогнозирования деформаций сооружений [Гуляев, Хорошилов, 2014], что проявлялось в следующем:

1. Выбор методов оценивания параметров динамических систем зависит от наличия и полноты априорной, а также апостериорной информации, от типа задач статистического анализа. Для использования многих критериев оценивания параметров требуются априорные данные не только о физической природе систем, но и знание распределения вероятностей входов и выходов, а иногда и самих параметров. При исследовании систем «сооружение-среда» по геодезическим данным имеется, как правило, неполная априорная и апостериорная информация. В связи с этим разработка базовой прогнозной модели была выполнена на основе корреляционной теории случайных функций при условии линейности и нормальности или линеаризации и нормализации моделируемого деформационного процесса. Соблюдение указанных условий построения базовой прогнозной модели позволяет правомерно оценивать параметры системы по критерию минимума средней квадратической погрешности, предназначенному для решения задач статистического синтеза без априорной информации. Этот критерий является простейшим и дает наиболее простые алгоритмы определения оптимальных оценок. При его использовании задача определения оптимальной системы решается с помощью двух первых моментных функций, выбранных в условной форме в качестве базовой прогнозной модели. Кроме того, обеспечение нормальности распределения моделируемого процесса приводит к совпадению всех видов критериев оценивания параметров [Гуляев, Хорошилов, Лисицкий, 2014].

2. Теория оценки адекватности математических моделей до сих пор разработана недостаточно и практическое построение адекватных моделей остается

искусством. Явными признаками неадекватности являются противоречивость выводов и невозможность найти решение. Оценки адекватности должны отражать степень соответствия выбранных форм, методов и методик математического описания, моделируемых процессов природе и условиям их развития, учитывать уровень репрезентативности и точности используемых результатов натурных наблюдений. Рекомендуемое в работе [Панкрушин, 2002] формальное применение F-критерия для оценки адекватности прогнозных моделей сильно детерминированных процессов деформаций сооружений далеко не всегда отвечает вышеперечисленным требованиям. Далее, статистический F-критерий предназначен для проверки гипотезы о равенстве дисперсий двух репрезентативных нормально распределенных выборок, однако в указанной выше работе не обуславливается оценка нормальности распределения. При конструктивном вероятностно-статистическом моделировании сильно детерминированных процессов деформаций требования к объему выборки заменяются условием ее статистической однородности.

3. Оценку обоснованности, достоверности и точности прогнозов принято осуществлять верификационными способами. Наиболее надежным является способ инверсной верификации, характеризующий степень согласованности фактических ошибок прогноза с их предвычисленными значениями на контрольном периоде упреждения. Существенный опыт применения представленных в монографии [Гуляев, 2002] математических моделей, методологии их построения и методики прогнозирования деформаций сооружений подтверждает адекватность выполненного моделирования в смысле точности прогнозов, непротиворечивости выводов и возможности решения различных прогнозных задач.

4. Методика построения прогнозных моделей всегда обеспечивает установление не только временных, но и пространственных закономерностей деформаций каждого исследуемого сооружения. Для совокупности статистически однородных реализаций процесса синтезируется закономерность его развития во времени, и на основании этой закономерности находятся прогнозы перемещений

каждой наблюдаемой деформационной марки из числа входящих в совокупность. Прогнозные оценки определяются как условные математические ожидания конкретных реализаций процесса. Пространственное положение реализаций определяется соответствующими номерами деформационных марок, заложенных в геометрически заданных точках конструкций сооружения. Таким способом исключается необходимость введения в модель координат контролируемых точек. Вышеуказанный методический прием является по существу косвенной деконпозицией модели, упрощающей ее структуру и построение, повышающей устойчивость. Следует отметить также методические решения, повышающие устойчивость и точность моделей, такие, как декорреляция входных воздействий, учет влияния шумовой компоненты, адаптация изменений инерционных свойств динамической системы.

5. Методы математической обработки результатов натурных наблюдений и моделирования по ним должны быть ориентированы на необходимую точность прогнозирования, а иногда их приходится выбирать, исходя из невысокой точности и недостаточной полноты имеющихся геодезических данных. Следует подчеркнуть, что пользователей результатов математического моделирования деформационных процессов интересует не столько геодезическая точность, сколько совместное влияние всевозможных факторов на точность прогнозирования [Гуляев, Хорошилов, Лисицкий, 2014]. Такая обобщенная оценка точности реализована в виде коридора погрешностей прогноза, представляющего вторую условную моментную функцию моделируемого процесса. Применение методики обобщенной оценки точности моделирования целесообразно в случаях несущественного влияния погрешностей геодезических измерений и неизбежно, когда для моделирования приходится использовать уравниваемые плановые координаты и высоты контролируемых деформационных марок, не имеющие характеристик точности их определения. Отметим также, что в разностях координат и высот, представляющих значения деформаций, ослабляется влияние ошибок исходных данных и систематических погрешностей измерений.

6. Особого подхода требует обработка результатов высокоточных наблюдений, когда погрешности геодезических измерений близки по величине к значениям деформаций, где традиционное уравнивание может исказить подлинную картину развития контролируемых процессов. В этих условиях рекомендованы [Гуляев, 2002] совместная математическая обработка и моделирование с корректным использованием оптимальной фильтрации и учетом межцикловых изменений результатов наблюдений. В тех же нередких случаях, когда не обеспечен регулярный высокоточный геодезический контроль развития исследуемых процессов или в нем нет необходимости, целесообразно или неизбежно приходится исключать сложную совместную обработку. Отметим при этом преувеличенные в работах В.К. Панкрушина возможности использования фильтра Калмана-Бьюси, который эффективен лишь при обработке переходных участков развития контролируемых процессов и не играет существенной роли на их стационарных периодах.

Хотелось бы отметить и технологии Big Data, позволяющие начать использование тех данных, которые при традиционном подходе являлись просто *«мертвым грузом»* [Реальный сектор на пороге..., 2014]. Революция в сфере данных фактически уже произошла – в компаниях накопилось такое гигантское количество данных (создаваемых в основном не людьми, а машинами), что обрабатывать их «старыми» методами во многих случаях уже не представляется возможным. Поиск инструментов для анализа этих данных и их использования относится уже к вопросу эволюции цифровых инструментов, необходимых для решения задач качественно нового уровня. Информация является ключом к пониманию потребностей людей, основой для процессов принятия решений, стратегическим ресурсом или основным средством предприятия. Целые отрасли трансформируются вслед за возможностями технологий по извлечению, накоплению, обработке и анализу информации.

В завершении необходимо подчеркнуть, что не следует противопоставлять различные методы и методики прогнозирования наблюдаемых деформационных

процессов, а необходимо находить пути их грамотного взаимного усиления в соответствии с поэтапным развитием научно-технических достижений. Ну а процесс прогнозирования деформаций сооружений на сегодняшнем этапе развития является важной составляющей геодезического мониторинга природно-технических систем и этим обусловлена перспектива его дальнейшего развития.

1.4.4. Влияние температурного фактора и мультиколлинеарности между основными воздействующими факторами

Корреляционная зависимость воздействующих факторов является следствием того, что на большинстве эксплуатируемых ГЭС сезонные изменения температуры воздуха практически функционально связаны с изменениями гидростатического давления (уровнем верхнего бьефа) и температурой бетона тела плотины, как в период наполнения водохранилища, так и в период его «разгрузки» [Ardito R., Maier G., Massalongo G., 2008; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013; Li F., Wang Zh., Liu G., Fu C., Wang J., 2015; Aleksandrov Y. N., 2016]. Имеются также и другие подобные связи между основными воздействующими факторами [Perner F., Obernhuber P., 2010; Храпков, Скворцова, Костылев, Щерба, 2011; Kostylev V. S., 2013; Mata J., 2014], поэтому одновременный ввод основных коррелирующих воздействующих факторов в строящуюся прогнозную модель приводит, как правило, к ее неустойчивости. Следует отметить, что большинство разработанных моделей не могут также достаточно корректно решить задачу прогнозирования в силу того, что влияние температурного фактора на перемещение плотины является нелинейным и носит эффект запаздывания.

Присутствует также и влияние мультиколлинеарности между основными воздействующими факторами (изменение гидростатического давления и изменение температуры бетона тела плотины), что вносит дополнительные неясности и трудности в окончательные результаты прогнозирования. Для устранения этих негативных явлений были проведены многочисленные исследования с целью

улучшения качества моделей [Yang J., Hu D. X., Wu Z. R., 2004; Xi G. Y., Yue J. P., Zhou B. X., Tang P., 2011; Tatin M., Briffaut M., Dufour F., Simon A., Fabre J. P., 2018; Shao C. F., Gu C. S., Yang M., Xu Y. X., Su H. Z., 2018], а также предложены методы для анализа выходных параметров с применением моделей экспоненциальной, гиперболической и логарифмической функций [Chen J. Y., 1980]. При этом следует отметить, что большинство традиционных статистических методов не могут достаточно корректно решить эту задачу в силу того, что влияние температурного фактора на перемещение плотины является нелинейным и носит эффект запаздывания [Lombardi G., Amberg F., Darbre G., 2008; Wang S., Gu C., Bao T., 2018]. Поэтому корректное применение моделей корреляционно-регрессионного типа возможно, когда удастся выявить и при математической обработке учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие факторы.

Существенно улучшить качество математических моделей путем уменьшения влияния мультиколлинеарности удалось с применением методов машинного обучения, изучающих подходы к построению самообучающихся алгоритмов, ориентированных на выбор разумной структуры сети и алгоритма обучения, таких как нейронная сеть многослойного персептрона (MLP), сосредоточенная в основном на точности и скорости сходимости моделей [Mata J., Tavares de Castro A., Sá da Costa J., 2013]; машина экстремального обучения на основе алгоритма (ELM), объединившая результаты прогнозирования по средним значениям и модель регрессионного анализа с целью улучшения обобщающей способности алгоритма [Kang F., Liu J., Li J., Li S., 2017]; машина опорных векторов (SVM), сочетающая преимущества в решении задач с малой выборкой, нелинейного и многомерного обучения с МНК для улучшения скорости сходимости алгоритма [Cheng L, Zheng D., 2013]; модель деревьев принятия решений объединенная со статистической моделью [Dai B., Gu C., Zhao E., Qin X., 2018] и другие достаточно эффективные методы для мониторинга безопасности плотин [Rankovic V., Novakovic A., Grujovic N., Divac D., Milivojevic N., 2013; Li L. H., Peng S. J.,

Jiang Z. X., 2014; Wei B. W., Yuan D., Xu Z., Li L., 2018; Liu W., Pan J., Ren Y., Wu Z., Wang J., 2020; De Granrut M., Simon A., Dias D., 2019; Fan L. F., 2013].

Многие из рассмотренных выше прогнозных математических моделей дают неплохие результаты прогнозирования. Однако, корректное прогнозирование перемещений контролируемых точек тела плотины при различных неблагоприятных температурных условиях эксплуатации сооружения (теплый и аномально холодный в температурном отношении годы), а также в условиях аварийных ситуаций существенно затруднено в силу того, что на величину перемещения оказывают дополнительное воздействие факторы, учесть которые затруднительно. Кроме того, влияние температурного фактора на перемещение плотины является нелинейным и носит эффект запаздывания, в то же время влияние мультиколлинеарности между воздействующими факторами (изменение гидростатического давления и изменение температуры бетона тела плотины) дополнительно вносит определенные неясности и трудности в окончательные результаты прогнозирования. Подобные негативные воздействия могут быть устранены в результате декорреляции основных входных воздействий путем их последовательного ввода в модель, например, как это показано в работах авторов для декоррелирующей модели 1-го и 2-го порядков [Prediction of the movement process..., 2017; Khoroshilov V.S., 2018; Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F., 2022]. 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. Поэтому дальнейшее совершенствование прогнозных математических моделей в целях обеспечения надежности и безопасности функционирования крупных плотин является одной из важных задач мониторинга для выявления аномальных результатов в значениях наиболее значимого, с точки зрения безопасности эксплуатации плотины, диагностируемого параметра – ее радиального перемещения. Это может быть достигнуто в процессе решения ряда следующих поставленных задач:

- а) исключения влияния корреляционной зависимости между входными воздействующими факторами путем раздельного ввода их в модель;
- б) учета продолжительности инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие факторы в результате введения поправки в виде транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования;
- в) существенного повышения точности прогнозирования.

1.4.5. 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 Ю.П. Гуляевым в работе [Гуляев, 2008] 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:

$$m_y = \sqrt{\frac{\beta_1^2 m_T^2 + \beta_2^2 m_u^2}{1 + 2\varphi \cos \omega_0 \Delta t + \varphi^2}}. \quad (1.5)$$

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).

Выражение (1.5) справедливо и для негармонических процессов при условии, что круговая частота $\omega_0 = 0$. Формула (1.5) пригодна и для расчета согласо-

ванной 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 измерительных 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 моделировании 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 существую-

щей методикой произвольного выбора моментов наблюдений относительно высокочастотных колебаний процесса. Для этого нужно предвычислить по формуле (1.5) 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 [Гуляев, Хорошилов, 2014], 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 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 натуральных наблюдений с использованием уточненной прогнозной модели.

Из работы [Бокс, Дженкинс, 1974] известно, что одной из наиболее удовлетворительной оценок автокорреляции при задержке k может служить выражение:

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

$$c_k = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^{N-k} (z_i - \bar{z})(z_{i+k} - \bar{z}),$$
(1.6)

где $k=1, 2, 3 \dots K$ – выборочная оценка автоковариации, а z – выборочное значение временного ряда.

Для практических целей достаточно округлять автокорреляцию до двух знаков после запятой; при этом выборочная авторокреляционная функция характеризуется знакопеременной корреляцией с тенденцией к затуханию по мере роста задержки. В предположении, что ряд полностью случайный, для всех задержек используется формула Барлетта, имеющая вид [Бокс, Дженкинс, 1974]:

$$D \approx \frac{1}{N} \left\{ 1 + 2 \sum_{v=1}^q p_v^2 \right\}, k > q.$$
(1.7)

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, делается вывод об адекватности математической модели (в случае, если выборочные автокорреляции меньше стандартной ошибки – модель считается адекватной).

2. ПОСТРОЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ВЫСОКОНАПОРНОЙ ПЛОТИНЫ САЯНО-ШУШЕНСКОЙ ГЭС НА ОСНОВЕ РЕКУРРЕНТНЫХ УРАВНЕНИЙ 1-ГО И 2-ГО ПОРЯДКОВ

2.1. Геодезические наблюдения за деформациями высоконапорных бетонных плотин

Исходной информацией для прогнозирования деформаций гидротехнических сооружений являются геодезические наблюдения. Они являются одними из главных и незаменимых видов натурных наблюдений для исследования гидротехнических сооружений. 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.

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 [Гуляев, Хорошилов, Лисицкий, 2014]. Можно считать, что прогнозирование объединяет в особой форме различные стороны геодезических исследований, выполненных с определенной точностью, и 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.

Разработка прогнозных математических моделей является обязательным условием диагностического контроля плотины СШГЭС в соответствие с принятой [Методика определения критериев..., 2001] и рекомендациями ФЗ [О без-

опасности гидротехнических сооружений, 1997]. Отметим, что результаты геодезических наблюдений за деформациями высоконапорных бетонных плотин представляют собой в интегральной количественной форме объективную и точную информацию о сложном взаимодействии сооружения с грунтовым основанием и внешней средой. При этом степень влияния различных факторов на величину перемещения контролируемых точек можно определять с помощью корреляционно-регрессионных моделей, однако, их корректное применение возможно лишь в случаях, когда удастся выявить и при математической обработке учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие факторы.

Более совершенны в этом плане модели динамического типа, обладающие свойствами ряда методов для описания деформаций сооружения и имеющие подвижную структуру, соответствующую физической сущности развития процесса: учитывают инерционный характер взаимодействия сооружения с окружающей средой и реагируют на изменения во времени воздействующих факторов. При этом корректный учет остаточной части инерционного запаздывания, обусловленный действием неучтенных и случайных факторов, можно выявить в форме модели авторегрессии закономерности развития процесса. В монографии [Гуляев, 2008] 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.

1. Предложена базовая прогнозная модель в динамической форме в виде двух первых условных моментных функций исследуемого процесса деформации сооружения; данная модель синтезирует закономерности его 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.

2. Анализ амплитудно-частотных и фазо-частотных 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.

2.1.1. Общие положения прогнозирования

*Объектом прогнозирования*¹ (здесь и далее цифры сносок – порядковые номера терминов, приведенных в прил. 1) – является исследуемый процесс деформации основания или несущих конструкций гидротехнического сооружения [Гуляев, Хорошилов, 2014]. Все изучаемые виды деформационных процессов выражаются через линейные вертикальные и горизонтальные перемещения наблюдаемых контролируемых геодезических знаков, заложенных в наиболее характерных местах так, чтобы по значениям перемещений можно было вычислить любой необходимый конкретный вид деформации.

Прогнозирование осуществляется по результатам геодезических наблюдений за деформациями статистическим методом прогнозной экстраполяции² и может выполняться как с помощью кинематических, так и динамических моделей в зависимости от полноты, типа и вида имеющихся исходных данных. Отметим при этом, что кинематические модели отражают зависимость величин деформаций от времени, а динамические модели описывают процессы деформаций с учётом совместного влияния как времени, так и главных воздействующих факторов. Следовательно, кинематические модели строятся только по геодезическим данным, динамические модели – по количественным данным комплексных натуральных наблюдений.

Эндогенной переменной³ объекта прогнозирования служит величина перемещения, получаемая из геодезических наблюдений в форме динамического ряда⁴. Геодезические данные в этом случае рассматриваются как дискретное

представление непрерывного случайного процесса; за отдельные реализации которого принимаются изменяющиеся во времени значения перемещения каждой наблюдаемой точки, а за сечение – случайная величина перемещения в данном цикле наблюдений. Таким образом, значения перемещений всех наблюдаемых деформационных знаков образуют семейство реализаций случайного процесса, по которому можно в каждом цикле наблюдений установить эмпирический закон распределения случайной величины перемещения, а по распределению случайной величины перемещения в ряде циклов наблюдений – определить закон случайного процесса перемещения. В результате будет получена наиболее полная математическая модель наблюдаемого процесса перемещения, которая может быть выражена через характеристики случайного процесса.

Эндогенная переменная в динамической модели является выходной переменной⁵. При этом в построенной на основе геодезических данных динамической модели в качестве выходной переменной может использоваться не только процесс перемещения, но и связанный с ним функционально какой-либо другой наблюдаемый процесс, характеризующий напряженно-деформированное состояние конструкций сооружения.

В кинематических моделях за экзогенную переменную⁶ принимается фактор времени, а к прогнозному фону⁷ относятся инженерно-геологические, конструктивные, строительно-эксплуатационные и другие условия работы сооружений. Влияние прогнозного фона учитывается априорно при выборе периодов основания прогноза⁸ и упреждения⁹ так, чтобы оба периода схватывали одинаковую природу развития процесса деформации. В динамических моделях экзогенной переменной служат наряду с фактором времени наблюдаемые факторы прогнозного фона, используемые апостериорно в виде входных воздействий¹⁰.

При использовании кинематических моделей их гибкое реагирование на изменения, происходящие на объекте прогнозирования, должно обеспечиваться за счет выполнения принципа непрерывности прогнозирования¹¹ с учетом дисконтирования информации¹². Для динамических моделей также следует соблюдать

принцип непрерывности, однако способность гибкого реагирования на изменение входных воздействий заложена в самих динамических моделях, и необходимость их корректировки возникает лишь в случаях недопустимого возрастания фактических ошибок прогноза¹³ на контрольных периодах упреждения¹⁴.

Прогнозирование деформаций гидротехнических сооружений, выполняемое на основе геодезических данных, обеспечивает получение всех предусмотренных современной прогностикой видов прогнозов: поискового¹⁵, нормативного¹⁶, интервального¹⁷, точечного¹⁸, оперативного¹⁹, краткосрочного²⁰, среднесрочного²¹, долгосрочного²², дальнесрочного²³. При этом продолжительность периодов упреждения прогнозов различной срочности в основном согласуется с принятой для других видов объектов.

Поисковое и нормативное прогнозирование должно осуществляться в целях своевременного принятия мер, повышающих надежность, долговечность гидротехнических сооружений, обеспечивающих безопасность их эксплуатации, а также для оптимизации объемов геодезических наблюдений за деформациями сооружений. Нормативное прогнозирование позволяет при этом получать оценки возможных сроков стабилизации осадок и других видов деформации сооружений, устанавливать путем моделирования²⁴ критерии допустимых значений наблюдаемых перемещений при данном состоянии сооружения в естественных условиях экстремального воздействия факторов, вызывающих перемещение.

С помощью прогнозной модели²⁵ в виде двух первых условных моментных функций случайного процесса²⁶ наблюдаемого перемещения достигается сочетание интервального и точечного прогнозов. Условное математическое ожидание, определяемое по плотности распределения случайного процесса, позволяет находить наилучшие прогнозы значений перемещения каждого наблюдаемого деформационного знака из числа включений в модель, а по условной корреляционной функции, отражающей рассеивание плотности условного распределения, можно предвычислить точность прогнозов²⁷.

Ошибки прогнозов и правильность предвычисленной точности прогнозов зависит, прежде всего, от продолжительности периодов упреждения и согласованности этих периодов с выбранными периодами основания прогноза. При этом существенное влияние оказывают сопутствующие факторы, такие, как условия функционирования сооружения, полнота и точность информации о будущем развитии прогнозного фона, а также вид применяемой математической модели [Гуляев, Хорошилов, 2014]. Например, на эксплуатируемых плотинах ГЭС для сезонных перемещений, имеющих инерционное запаздывание²⁸ продолжительностью до 5-6 месяцев, с помощью динамических моделей можно выполнять краткосрочное прогнозирование по фактическим значениям входных воздействий. Для этого при построении моделей нужно ввести транспортное запаздывание²⁹, заменяющее часть инерционного запаздывания, описываемого моделью. В результате такого подхода ошибки прогнозов будут незначительно превышать ошибки измерений и согласовываться с предвычисленной точностью прогнозов, что позволит сократить объём наблюдений, заменив их выборочно контролируемые прогнозами.

На периодах упреждения среднесрочного прогнозирования можно достичь приемлемой точности прогнозов с помощью кинематических моделей лишь при подборе трендов³⁰, адекватно отражающих будущее развитие описываемых процессов деформации при условии неизменности прогнозного фона в части, не учитываемой трендом. Динамические модели позволяют получить необходимую точность среднесрочных прогнозов, если с достаточной точностью будут известны значения входных воздействий на периоде упреждения. Отмеченные особенности распространяются и на долгосрочные и дальнесрочные прогнозы, причем ошибки прогнозов будут возрастать за счёт изменения состояния сооружений, если эти изменения не учитываются адаптирующимися моделями.

Принцип верифицируемости³¹ прогнозирования заключается в определении достоверности³², точности и обоснованности прогнозов. Поскольку точность прогнозов наблюдаемых процессов перемещений предвычисляется в виде сред-

них квадратических отклонений, то достоверность прогнозов составляет 0,68 или 0,95 соответственно для одинарного или удвоенного коридора погрешности³³. При этом предполагается, что процесс является нормальным³⁴ или нормализованным³⁵.

На данном этапе развития прогнозирования процессов деформации гидротехнических сооружений основным видом определения обоснованности прогнозов является инверсная верификация³⁶, осуществляемая путем проверки адекватности модели на периоде основания прогноза по остаточным ошибкам её построения и на периоде контрольного упреждения по ошибкам прогнозов, по их согласованности с предвычисленной точностью прогнозов. Кроме того, можно проверять обоснованность прогнозов, получая их по моделям, построенным на периодах основания прогноза разной длины. Дополнительную верификацию можно производить в отдельных случаях, сравнивая результаты прогнозирования одного и того же процесса, полученные по кинематическим и динамическим моделям, а также прогнозы различных, но взаимосвязанных характеристик деформации.

Организация выполнения прогнозирования зависит от уровня обеспечения гидроцехов ГЭС современными компьютерами и подготовленными специалистами [Гуляев, Хорошилов, 2014]. На данном этапе целесообразно осуществлять разработку прогнозов в научно-исследовательских организациях и передавать результаты для использования в гидроцеха ГЭС. Результаты прогнозирования могут быть представлены в виде распечаток с компьютеров, содержащих прогнозы и характеристики их точности в табличной форме, позволяющей быстро находить прогнозы для конкретных условий без применения вычислительных средств; в виде выраженных графически критериев допустимых значений наблюдаемых перемещений, возможных при данном состоянии сооружения. В последующем развитии организация прогнозирования должна быть ориентирована на включение прогнозирующей подсистемы в информационно-измерительную автоматизированную систему геодезического контроля за состоянием сооружений ГЭС.

Табличную форму прогнозов удобно использовать в эксплуатационный период для краткосрочного прогнозирования наблюдаемых перемещений, имеющих характер сезонных гармонических колебаний. Таблицы разрабатываются на основе динамических моделей на многолетних периодах основания прогноза, которые охватывают различные условия работы сооружения при его установившемся состоянии.

Критерии допустимых значений наблюдаемых перемещений при данном состоянии сооружения могут определяться в результате непосредственного прогнозирования по динамическим моделям или с помощью таблиц для возможного в условиях нормальной эксплуатации сочетания максимальных влияний основных воздействующих факторов. Выход измеренных значений перемещений за границы установленных критериев будет служить сигналом об изменении состояния гидротехнического сооружения и потребует тщательного специального обследования условий функционирования сооружения. Дополнительным критерием будут служить фактические ошибки прогнозов, возрастание которых связано с изменением состояния сооружения и служит одновременно указанием к обновлению модели.

2.1.2. Требования к исходным данным для прогнозирования

Исходной информацией для прогнозирования деформаций гидротехнических сооружений и земной поверхности в районе гидроузла является аналитический обзор результатов повторных геодезических наблюдений, оформляемый в виде научно-технического отчета по отдельному циклу или группе циклов наблюдений. Общие требования, структура и правила составления отчетов должны соответствовать ГОСТ 7.32-2017 [Система стандартов по информации..., 2017]. В состав отчета должны быть включены титульный лист, реферат, введение, основная часть, заключение и список используемых источников. Основная часть должна состоять из двух подразделов [Гуляев, Хорошилов, 2014]:

а) характеристики геодезических работ в районе гидроузла (в том числе автоматизированных инженерно-геодезических наблюдений за плотиной и наблю-

дений за движениями земной поверхности, выполняемых также и методами геодезической астрономии и геодезической гравиметрии);

б) интерпретации результатов геодезических измерений.

В первом подразделе основной части отчета представляются по видам работ сведения об используемых приборах, методах и точности измерений, сведения о предварительной обработке и уравнивании результатов наблюдений в каждом цикле. Данные могут быть представлены как в табличном виде, так и на электронных носителях информации (CD, DVD-дисках, флешках и т.п.).

Во втором подразделе должен быть обоснован метод подготовки исходных данных для интерпретации и прогнозирования. Деформации и перемещения должны быть представлены в виде графиков и картосхем.

Научно-технический отчет должен быть согласован:

а) в части наблюдений за движениями и деформациями земной поверхности района гидроузла – с территориальным научно-исследовательским институтом, курирующим геофизические работы в данном регионе;

б) в части наблюдений за гидротехническими сооружениями – с отраслевым научно-исследовательским или проектным институтом, курирующим работы по строительству и эксплуатации данного гидроузла.

Кроме требований, изложенных выше, исходные данные должны соответствовать техническому проекту на геодезические работы, включающему производственную программу выполнения всех видов геодезических наблюдений.

Геодезические сети в районе гидроузла объединяются в специальный техногенный геодинамический полигон ГЭС (ТГП ГЭС). В частности, для прогнозирования движений и деформаций земной поверхности с применением динамических моделей исходные данные должны быть освобождены от систематического влияния внешних условий, кроме этого, внешние факторы условий должны быть сгруппированы и оценены для возможного выполнения корреляционного и факторного анализа. Подробное описание исходных данных должно сопровождаться следующим:

а) по плановым сетям:

– описанием физической природы внешних условий на ТГП ГЭС и методики их учета при геодезических наблюдениях (характеристикой природных процессов в системе «плотина-водохранилище-окружающая среда», влиянием метеорологических факторов на измерение линий электронными тахеометрами, влиянием метеорологических факторов на угловые измерения, влиянием техногенных факторов на линейные и угловые измерения);

– описанием рекогносцировки геодезической сети, заложенных центров сети и построенных знаков;

– описанием методики угловых измерений;

– описанием методики линейных измерений;

– обоснованием принятой периодичности измерений;

б) по высотным сетям:

– описанием рекогносцировки нивелирных линий и закладки реперов;

– описанием приборов для нивелирования и методики их поверки;

– описанием методики выполнения геометрического, тригонометрического, гидростатического и гидродинамического нивелирования;

в) по астрономическим определениям:

– описанием выбора мест расположения и закладки астропунктов;

– описанием астрономических приборов, методики их поверки и исследования;

– описанием методики выполнения астрономических определений на ТГП ГЭС;

г) по гравиметрическим определениям:

– описанием выбора мест расположения и закрепления гравиметрических пунктов;

– описанием гравиметрических приборов и методики их поверки;

– описанием методики гравиметрических определений в теле плотины ГЭС;

– описанием методики гравиметрических определений на земной поверхности в районе ТГП ГЭС;

– описанием методики математической обработки результатов гравиметрических определений в теле плотины и на земной поверхности;

д) по учету влияния непривливаемых изменений силы тяжести на результаты геодезических и гравиметрических измерений на ТПП ГЭС:

– описанием методики оценки прилегающей к гидроузлу области, в которой следует учитывать влияние изменения поля силы тяжести на результаты гравиметрических определений;

– описанием методики оценки прилегающей к гидроузлу области, в которой следует учитывать влияние изменения уклонов отвеса на результаты геодезических измерений;

– рабочими таблицами поправок за изменение силы тяжести для конкретных геодезических и гравиметрических пунктов, попадающих в область влияния;

– рабочими картосхемами поправок для области влияния (в зависимости от изменения уровня водохранилища ГЭС);

е) по математической обработке результатов:

– описанием предварительной обработки результатов астрономических, гравиметрических, геодезических измерений на ТПП;

– описанием применяемой методики уравнивания результатов астрономических, гравиметрических и геодезических измерений;

– каталогами уравненных координат и высот пунктов геодезических сетей (внутриплотинной и наземной) на каждый цикл измерений;

– корреляционными матрицами координат и высот пунктов сетей по каждому циклу и группам циклов (матрицами шума для учета при прогнозировании);

– ведомостями уравненных результатов геодезических наблюдений для каждого цикла наблюдений относительно начального цикла изменений горизонтальных направлений, изменений зенитных расстояний, изменений астрономических азимутов, изменений расстояний, изменений превышений, изменений силы тяжести;

– ведомостями оценки точности уравненных величин для каждого цикла.

Прогнозирование движений и деформаций земной поверхности в районе гидроузла и гидротехнических сооружений может выполняться как с использованием исходных данных по всему комплексу работ на ТГП ГЭС представленному выше, так и с частичным объемом исходных данных, подготовленных по одному из видов измерений (плановых, высотных, гравиметрических), либо по одному из участков работ (только водохранилищная зона, только приплотинная зона, только внутриплотинные измерения и т.д.).

2.2. Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей 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 [Гуляев, 2008; Гуляев, Хорошилов, 2014], 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 динамической модели 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 шумовой компонентой, и это 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 первого порядка учитывает инерционное запаздывание продолжительностью до 3 месяцев, звено второго порядка – продолжительностью до 6 месяцев.

Можно утверждать, что 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 [Гуляев, Хорошилов, 2014].

В представленном исследовании *выбор для прогнозирования* рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков 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.

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

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta U_k + \gamma \omega_k. \quad (2.1)$$

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

В модели (2.1) 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 влияние 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, повышая тем самым степень обусловленности системы нормальных уравнений, решаемых при оценивании параметров, и повышает устойчивость модели.

На первом этапе построения динамических моделей методом МНК осуществляется оценка параметров φ, β, x_0 по результатам наблюдений за входом $\{U_k\}$ и выходной переменной $\{x_k\}$ на периоде основания прогноза $k=1, 2, 3, \dots, N$. Для оценивания необходимо представить условное математическое ожидание дискретного уравнения (2.1), которое определяется выражением:

$$M\{x_k / x_{k-1}, U_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\varphi} x_{k-1} + \hat{\beta} U_k. \quad (2.2)$$

Формула (2.2) 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:

$$F(\varphi, \beta, x_0) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2 \quad (2.3)$$

Оценки параметров $\hat{\varphi}, \hat{\beta}, \hat{x}_0$ находятся из решения следующей системы нормальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N x_{k-1} U_k &= \sum_{k=2}^N x_k x_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} U_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N U_k^2 &= \sum_{k=2}^N x_k U_k, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N x_{k-1} + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N U_k + x_0^N &= \sum_{k=2}^N x_k. \end{aligned} \right\} \quad (2.4)$$

Отметим при этом, что количество циклов наблюдений N , выполненных на периоде основания прогноза, можно свести при необходимости к минимуму, достаточному для решения системы (2.4), 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 [Гуляев, Хорошилов, 2014].

Система нормальных уравнений (2.4) 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 $\hat{\varphi}, \hat{\beta}, \hat{x}_0$ с использованием такого методического приема, как центрирование процесса, выполняемого в два этапа.

На первом этапе первоначально оцениваются параметры φ, β , для чего выполняется 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: $F_1(\varphi, \beta) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$; в этом случае система нормальных уравнений (2.4) принимает более простой вид (2.5):

$$\left. \begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{U}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{U}_k. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

После вычисления прогнозных значений $\hat{\varphi}, \hat{\beta}$ оценивается $\hat{x}_0$ по формуле: $\hat{x}_0 = \bar{x}(1 - \hat{\varphi}) - \hat{\beta}\bar{U}$. Вычислив оценки $\hat{\varphi}, \hat{\beta}, \hat{x}_0$, приступают ко второму этапу оценивания, который начинается с вычисления остаточных ошибок ε_k . Вычисление остаточных ошибок осуществляется на периоде основания прогноза с использованием выражения:

$$\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1}, \quad (2.6)$$

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. 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 с использованием выражения [Бокс, Дженкинс, 1974]:

$$\hat{K}_{\varepsilon}[m] = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N-m} \varepsilon_k \varepsilon_{k+m}, \quad (2.7)$$

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

Далее по оценкам $\hat{K}_{\varepsilon}[m]$ строится график автокорреляционной функции, который будет иметь вид, близкий к одному из тех, которые представлены на рисунке 2.1. Вид автокорреляционной функции типа (а) свидетельствует о том, что отсутствие затухания у автокорреляционной функции логично истолковать в том смысле, что изучаемый процесс ведет себя нестационарно. Это свидетельство о некорректности строящейся математической модели и ее необходимо подправлять. В случае, когда график автокорреляционной функции имеет вид (б), т.е. затухание происходит экспоненциально, то описание шумовой компоненты следует выполнять моделью авторегрессии 1-го порядка (AP1). Если получена корреляционная функция вида (в), то описание шумовой компоненты осуществляется моделью авторегрессии 2-го порядка (AP2). Если автокорреляционная функция случайно и незначительно колеблется около оси времени, то она представляет собой белый шум, вид (г), т.е. некоррелированный процесс и ее дальнейшее исследование не имеет смысла.

Шумовая компонента для модели авторегрессии 2-го порядка согласно [Бокс, Дженкинс, 1974] имеет вид:

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (2.8)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

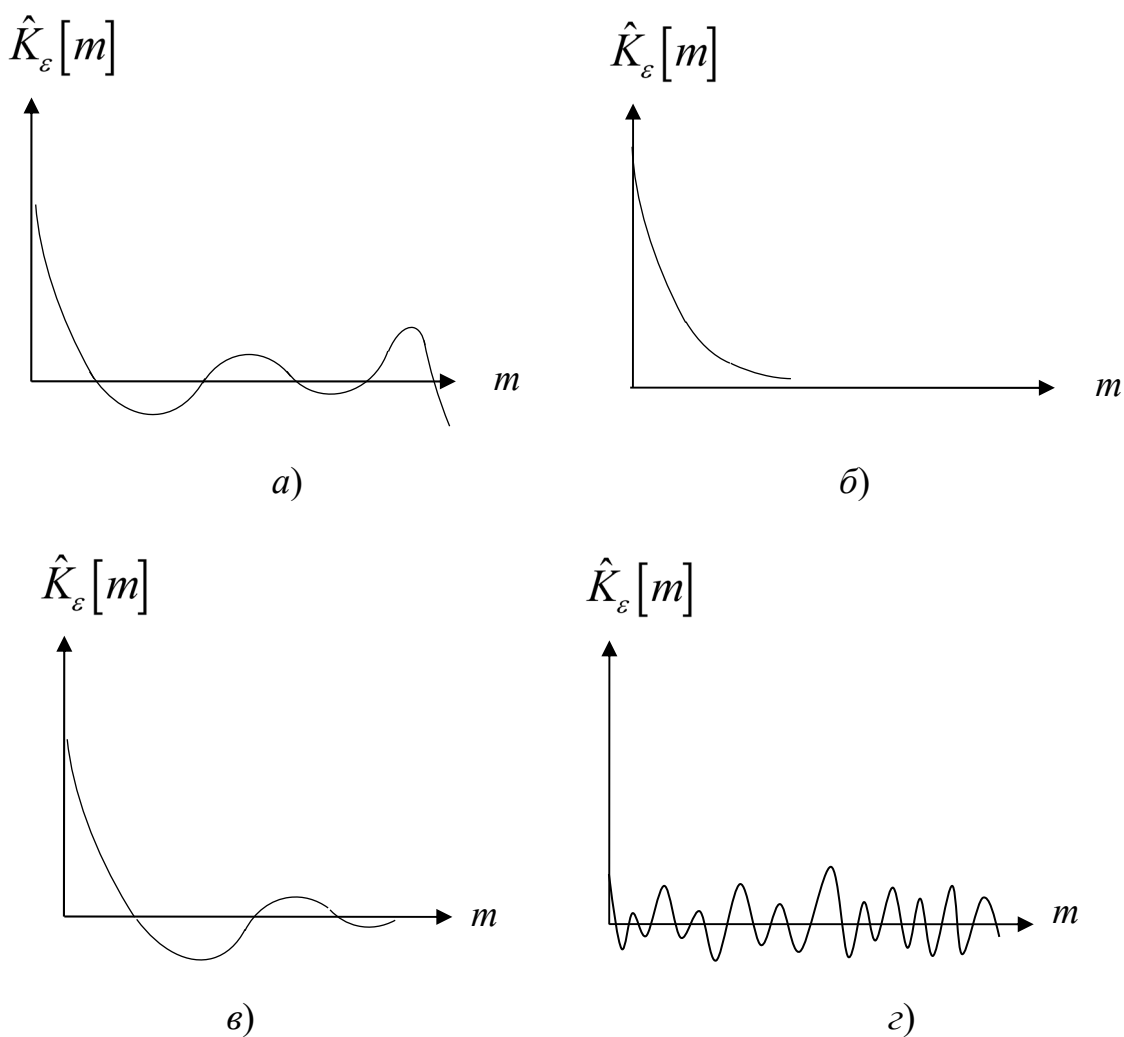


Рис. 2.1. Графики автокорреляционной функции:

а) модель 1; б) модель 2; в) модель 3; г) модель 4

Оценка этих параметров производится путём минимизации функционала

вида $F_2(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu \hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta \hat{K}_\varepsilon[m-2] \right)^2$, т.е. оценки параметров

$\hat{\mu}, \hat{\eta}$ находятся из решения соответствующей системы нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\mu} \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m-1] \right)^2 + \hat{\eta} \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m-1] \hat{K}_\varepsilon[m-2] - \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m] \hat{K}_\varepsilon[m-1] &= 0, \\ \hat{\mu} \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m-1] \right) \hat{K}_\varepsilon[m-2] + \hat{\eta} \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m-2] \right)^2 - \sum_{m=1}^M \hat{K}_\varepsilon[m] \hat{K}_\varepsilon[m-2] &= 0. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Далее осуществляется оценка коэффициента $\hat{\gamma}$ по формуле [Гуляев, 2008]:

$$\hat{\gamma} = \sqrt{\frac{\hat{K}_\varepsilon[0]}{\hat{K}_\omega[0]}}, \quad (2.10)$$

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 (2.1) представляется в виде авторегрессионных зависимостей первого порядка (*AP1*) или второго порядка (*AP2*) 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:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (2.11)$$

В этом случае минимизируется функционал:

$$F(\varphi, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2,$$

а условное математическое ожидание принимает выражение:

$M\{x_k / x_{k-1}, U_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\varphi}x_{k-1} + \hat{\beta}_1 U_k + \hat{\beta}_2 T_k$. Оценки параметров $\hat{\varphi}, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ получаются в результате решения системы нормальных уравнений:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{U}_k, \\ \hat{\varphi} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{T}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{T}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_k. \end{aligned} \quad (2.12)$$

Дальнейшая процедура для второго этапа оценивания осуществляется в порядке, как было представлено ранее.

2.3. Теоретическое обоснование и методика построения прогнозных математических моделей на основе рекуррентного уравнения 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 обеспечения необходимой точности* прогнозирования.

Дискретное выражение рекуррентного уравнения динамической модели 2-го порядка для изучения процесса перемещения точек сооружения для одного входного воздействия U_k имеет вид:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta U_k + \gamma \omega_k. \quad (2.13)$$

Решение осуществляется в результате минимизации функционала вида

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

имеет выражение: $M\{x_k / x_{k-1}, U_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\varphi}_1 x_{k-1} + \hat{\varphi}_2 x_{k-2} + \hat{\beta} U_k$. Оценки параметров $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\beta}$ находят из решения системы нормальных уравнений, которые имеют вид:

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2}^2 + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{x}_{k-2} &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-2}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{x}_{k-1} + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{U}_k + \hat{\beta} \sum_{k=2}^N \dot{U}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{U}_k. \end{aligned} \quad (2.14)$$

Модель инерционного звена второго порядка, описывающая процесс перемещения для одной наблюдаемой точки под воздействием двух основных факторов, в общем виде имеет следующее рекуррентное выражение:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (2.15)$$

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 .

Подобная структура модели позволяет учитывать инерционное запаздывание продолжительностью до половины основной гармоники, сохраняя при этом хорошие сглаживающие свойства математического описания, присущие звену первого порядка и высокую точность описания, присущую звену второго порядка.

Решение уравнения (2.15) осуществляется в результате минимизации функционала вида:

$$F(\varphi_1, \varphi_2, \beta_1, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2,$$

для которого условное математическое ожидание имеет вид:

$$M\{x_k / x_{k-1}, U_k\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\varphi}_1 x_{k-1} + \hat{\varphi}_2 x_{k-2} + \hat{\beta}_1 U_k + \hat{\beta}_2 T_k.$$

Оценки параметров $\hat{\varphi}_1, \hat{\varphi}_2, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$ находят из решения соответствующей системы нормальных уравнений (2.16).

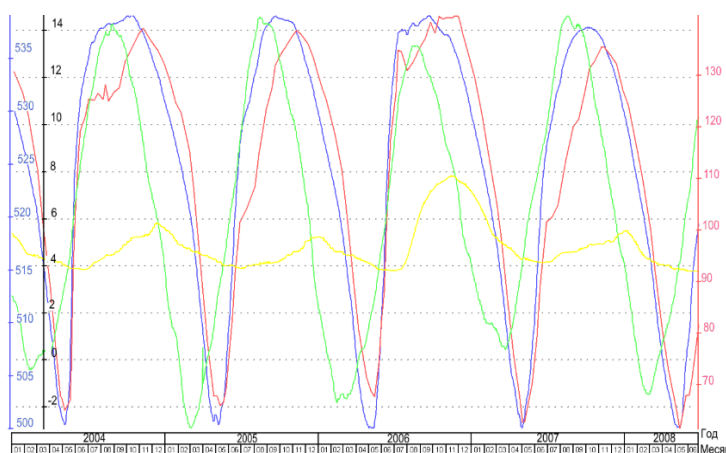
Дальнейшая процедура для второго этапа оценивания осуществляется в порядке, как было представлено выше.

$$\begin{aligned} \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{x}_{k-2} + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{x}_{k-2} + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-2}, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{U}_k + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{U}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{T}_k &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{U}_k, \\ \hat{\varphi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_k + \hat{\varphi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-2} \dot{T}_k + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{T}_k + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{T}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_k. \end{aligned} \quad (2.16)$$

2.4. 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. В качестве примера, 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.

За основные входные воздействия могут быть приняты: U_k – значение уровня верхнего бьефа (гидростатическое давление) и $T_{низ.}; T_{верх.}$ – температура бетона тела плотины в нижней и в верхней базовых точках в соответствии с рис. 2.2.



-- верхний бьеф; -- температура бетона $T_{низ.}$; -- температура бетона $T_{верх.}$ · -
- радиальные перемещения

Рис. 2.2. Графики перемещений гребня плотины, изменения УВБ и температура бетона тела плотины в базовой точке $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$ во времени по секции 33

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. Последовательность ввода определяется первичностью и вторичностью действия факторов, т.е. вначале вводится влияние температуры $T_{низ.}$ или $T_{верх.}$ в базовых точках, а затем – гидростатическое давление, либо их сочетания.

В качестве исходных рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков могут быть использованы модели вида [Гуляев, Хорошилов, 2014]:

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{низ.} + U_0; \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_{низ.} + x_0; \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k; \\ \omega_k &= AP2. \end{aligned} \tag{2.17}$$

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{низ.} + \beta_2 T_{верх.} + U_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \varphi_3 x_{k-2} + \beta_3 T_{низ.} + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_4 \Delta x_{k-1} + \beta_4 \Delta U_k + \Delta x_0, \\ \omega_k &= AP2. \end{aligned} \tag{2.18}$$

В моделях (2.17) и (2.18) первые два уравнения представляют основные входные воздействия $U_k; T_{низ.}$ и $T_{верх.}$, вызывающие перемещение x_k и выражают зависимость гидростатического давления и перемещения от температуры бетона тела плотины. Третье уравнение описывает зависимость Δx_k от ΔU_k , где Δx_k – найденные по второму уравнению разности между фактическими значениями перемещений x_k и вычисленными на периоде основания прогноза, а ΔU_k – аналогичные соответствующие разности между фактическими и вычис-

ленными по первому уравнению значениями U_k ; четвертое уравнение – одна из разновидностей шумовой компоненты, например, $AP2$, решение которого будет показано ниже. Замена в выражениях (2.17) и (2.18) значений x_k , U_k , $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$ их центрированными по времени значениями: $\dot{x} = x_k - \bar{x}$, $\dot{U} = U_k - \bar{U}$; $\dot{T} = T_{низ.} - \bar{T}$; $\dot{T} = T_{верх.} - \bar{T}$ ($\bar{x}$, $\bar{U}$, $\bar{T}_{низ.}$, $\bar{T}_{верх.}$ – средние величины перемещения и входных параметров: уровень верхнего бьефа и температуры, взятых на периоде основания прогноза), как было показано в работе авторов [Гуляев, Хорошилов, Кобелева, 2015], что позволяет существенно упростить процесс вычислений, и повышает обусловленность систем нормальных уравнений.

Покажем на примере модели (2.17) общее решение для обеих моделей (2.17) и (2.18). Решение осуществляется в три этапа. На первом этапе определяется зависимость изменения гидростатического давления от температуры воздуха (отметим при этом, что для построения прогнозных моделей может использоваться температура как в нижней $T_{низ.}$, так в последствие и в верхней базовой точке $T_{верх.}$. С использованием метода наименьших квадратов (МНК) по результатам наблюдений за входом $\{T_{низ.}\}$ и выходом $\{U_k\}$ вначале оценивают параметры модели на периоде основания прогноза $k=1,2,\dots,N$. С этой целью минимизируется функционал вида: $F_1(\varphi_1, \beta_1) = \sum_{k=2}^N \left(U_k - \hat{U}_{k/k-1} \right)^2$; через $\hat{U}_{k/k-1}$ обозначено условное математическое ожидание первого уравнения в модели (2.17) и (2.18), которое, например, для модели (2.17) имеет вид:

$$M\{U_k / U_{k-1}, T_{низ.}\} = \hat{U}_{k/k-1} = \hat{\varphi}_1 U_{k-1} + \hat{\beta}_1 T_{низ.}. \quad (2.19)$$

Условные математические ожидания для первых трех выражений модели (2.17) соответственно имеют вид:

$$\begin{aligned}
M\{U_k / U_{k-1}, T_{\text{низ.}}\} &= \hat{U}_{k/k-1} = \hat{\phi}_1 U_{k-1} + \hat{\beta}_1 T_{\text{низ.}}, \\
M\{x_k / x_{k-1}, T_{\text{низ.}}\} &= \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_2 x_{k-1} + \hat{\beta}_2 T_{\text{низ.}}, \\
M\{\Delta x_k / \Delta x_{k-1}, \Delta U_k\} &= \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_3 \Delta x_{k-1} + \hat{\beta}_3 \Delta U_k.
\end{aligned} \tag{2.20}$$

Оценки параметров $\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \hat{\phi}_3, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3$ находят из решения соответствующих систем нормальных уравнений, имеющих вид:

$$\begin{aligned}
\hat{\phi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_{k-1} \dot{T}_{\text{низ.}} &= \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{U}_{k-1}, \\
\hat{\phi}_1 \sum_{k=2}^N \dot{U}_{k-1} \dot{T}_{\text{низ.}} + \hat{\beta}_1 \sum_{k=2}^N \dot{T}_{\text{низ.}}^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{U}_k \dot{T}_{\text{низ.}},
\end{aligned} \tag{2.21}$$

$$\begin{aligned}
\hat{\phi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_{\text{низ.}} &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{x}_{k-1}, \\
\hat{\phi}_2 \sum_{k=2}^N \dot{x}_{k-1} \dot{T}_{\text{низ.}} + \hat{\beta}_2 \sum_{k=2}^N \dot{T}_{\text{низ.}}^2 &= \sum_{k=2}^N \dot{x}_k \dot{T}_{\text{низ.}},
\end{aligned} \tag{2.22}$$

$$\begin{aligned}
\hat{\phi}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1}^2 + \hat{\beta}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1} \Delta \dot{U}_k &= \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_k \Delta \dot{x}_{k-1}, \\
\hat{\phi}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_{k-1} \Delta \dot{U}_k + \hat{\beta}_3 \sum_{k=2}^N \Delta \dot{U}_k^2 &= \sum_{k=2}^N \Delta \dot{x}_k \Delta \dot{U}_k.
\end{aligned} \tag{2.23}$$

На втором этапе определяется зависимость перемещения от влияния температуры, т.е. оцениваются параметры по результатам наблюдений за входом $\{T_{\text{низ.}}\}$ или $\{T_{\text{верх.}}\}$ и выходом $\{x_k\}$ подобно оцениванию на первом этапе. С этой целью

выполняется минимизация функционала вида: $F_2(\phi_2, \beta_2) = \sum_{k=2}^N \left(x_k - \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$;

$\hat{x}_{k/k-1}$ представляет собой условное математическое ожидание второго выражения для моделей (2.17) и (2.18), которое, например, для модели (2.17) имеет вид:

$$M\{x_k / x_{k-1}, T_{\text{низ.}}\} = \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_2 x_{k-1} + \hat{\beta}_2 T_{\text{низ.}}. \quad (2.24)$$

На третьем этапе определяются соответствующие разности Δx_k между фактическими и вычисленными с помощью второго уравнения значениями перемещений x_k и разности ΔU_k между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями гидростатического давления U_k .

Далее оцениваются параметры по результатам наблюдений за входом $\{\Delta U_k\}$ и выходом $\{\Delta x_k\}$ в результате минимизации функционала вида

$F_3(\phi_3, \beta_3) = \sum_{k=2}^N \left(\Delta x_k - \Delta \hat{x}_{k/k-1} \right)^2$; где через $\hat{x}_{k/k-1}$ обозначено условное математическое ожидание третьего уравнения для моделей (2.17) и (2.18), которое, например, для модели (2.17) имеет вид:

$$M\{\Delta x_k / \Delta x_{k-1}, \Delta U_k\} = \Delta \hat{x}_{k/k-1} = \hat{\phi}_3 \Delta x_{k-1} + \hat{\beta}_3 \Delta U_k. \quad (2.25)$$

На последнем этапе определяется порядок модели авторегрессии и оценивание параметров корреляционной функции с использованием ранее приведенной в разделе 2.2 формулы (2.7) для оценивания временных рядов:

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

где временной сдвиг $m = 0, 1, 2, 3 \dots M \triangleleft N$.

Остаточные ошибки, как результат действия всех оставшихся неучтенных и случайных факторов $\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1}$, позволяют характеризовать строящуюся прогнозную модель с точки зрения ее структурной идентификации; в тоже время – это характеристика свойств шумовой компоненты ω_k . В результате, исследуя аналитически влияние остаточных ошибок, имеется возможность математического описания процесса шума ω_k известными моделями авторегрессии 1-го или 2-го порядков.

Окончательный этап разработки прогнозной модели заключается в анализе полученных результатов с контрольным прогнозированием на основе принципа инверсной верификации. В случаях неудовлетворительного качества построенной прогнозной модели заново повторяются все предыдущие этапы ее разработки с целью найти другой вид или структуру модели, либо более тщательно отнестись к выбору основных воздействующих факторов и возможному транспортному запаздыванию, а также выбору периода основания прогноза, которые наиболее адекватно описывают исследуемый деформационный процесс.

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

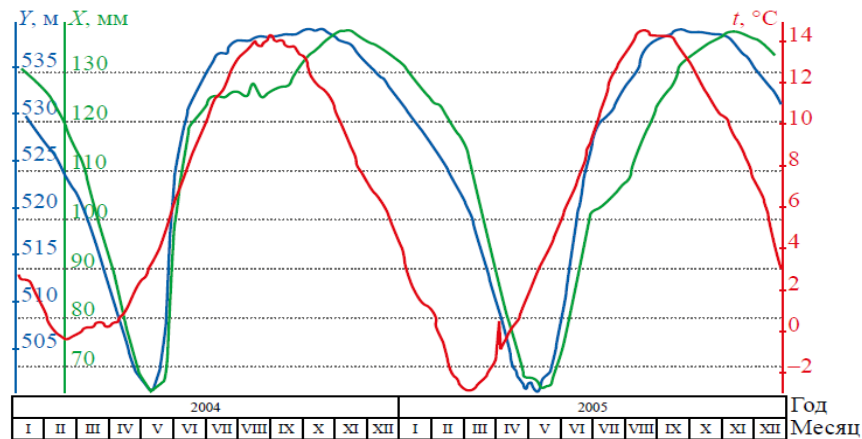
3.1. Прогнозные математические модели для этапов эксплуатации плотины СШ ГЭС на этапах эксплуатации 2004–2005, 2005–2007, 2007–2009 и 2013–2016 гг.

В данном разделе представлены результаты практических исследований при построении прогнозных моделей на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков для изучения процесса перемещения, происходящего под воздействием различных входных воздействий для изучения поведения плотины СШ ГЭС. Для отработки методических решений при построении математических моделей в работах авторов представлены различные варианты построенных математических моделей для различных входных воздействий, периодов основания прогноза для этапов работы плотины 2004-2005, 2005-2007, 2007-2009 и 2013-2016 гг. Результаты исследований послужили основой для отработки последующих методических решений при совершенствовании методики построения прогнозных моделей.

3.1.1. Динамические модели 1-го типа (1-го порядка) на этапе эксплуатации 2004–2005 гг.

В соответствии с принятыми положениями [Методикой определения критериев..., 2001] в качестве одного из диагностических показателей контроля Саяно-Шушенской ГЭС выбраны радиальные перемещения гребня плотины: левобережной секции 18, ключевой секции 33 и правобережной секции 45, измеренные отвесами и соответствующие им значения параметров: УВБ и температура бетона $T_{низ.}, T_{верх.}$ в нижней и верхней базовых точках. В качестве исходных

данных для построения динамических моделей нами были использованы данные измерений за 2004-2005 годы (табл. 3.1) на основании рис. 3.1. из работы [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012].



--- верхний бьеф; --- температура бетона (секция 33);
 --- радиальные перемещения

Рис. 3.1. Изменение диагностического показателя (радиального перемещения гребня плотины) и параметров-аргументов УВБ и температура бетона $T_{низ}$ в базовой точке во времени (2004–2005 гг.)

Для построения динамической модели послужило рекуррентное уравнение 1-го порядка процесса перемещения, происходящего под воздействием одного из основных факторов, а остаточная часть процесса дополнительно была описана моделью шумовой компоненты, т. е. путем расширения вектора состояний (в который, например, могут быть включены неучтенные факторы перемещений гребня плотины). Стационарная динамическая модель 1-го типа (в соответствии с разделом 2.2) имеет вид:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta U_k + \gamma \omega_k. \quad (3.1)$$

Заменим в выражении (3.1) значения x_k и U_k их центрированными по времени значениями: $\dot{x} = x_k - \bar{x}$ и $\dot{U} = U_k - \bar{U}$ ($\bar{x}$ и $\bar{U}$ – средние величины переме-

щения и входных параметров – уровень верхнего бьефа и температуры бетона в нижней базовой точке на годичном интервале, взятом за период основания прогноза). Это позволяет не только определить $\dot{x}$, но и упрощает вычисления, повышая тем самым степень обусловленности системы нормальных уравнений, решаемых для оценивания параметров.

Были построены три математические модели [Гуляев, Хорошилов, Кобелева, 2015; Хорошилов, Кобелева, Губонин, 2016]. В связи с тем, что рекуррентное уравнение 1-го порядка учитывает инерционное запаздывание динамической системы продолжительностью от 3 до 5 месяцев, то при построении первой модели было введено транспортное запаздывание величиной 2 месяца, за входной фактор была выбрана температура бетона $T_{низ}$ в нижней базовой точке, а за период основания прогноза: ветвь нагружения и ветвь разгрузки (май 2004 г. – май 2005 г.). В двух других моделях в качестве основного входного фактора использовался уровень верхнего бьефа (гидростатическое давление) для различных периодов основания прогноза: 1) ветвь нагружения и ветвь разгрузки: май 2004 г. – май 2005 г.; 2) календарный год с января 2004 г. по январь 2005 г.

Процедура построения динамических моделей методом МНК и оценивания параметров по результатам наблюдений за входом $\{U_k\}$ и выходом $\{x_k\}$ на периоде основания прогноза $k=1, 2, \dots, N$ осуществлялась в соответствии с процедурой, представленной в разделе 2.2. Полученная система нормальных уравнений для первой модели имеет вид:

1 модель:

$$\begin{aligned} 6267,6571\hat{\phi} + 1185,2469\hat{\beta} &= 4182,3799; \\ 1185,2469\hat{\phi} + 383,7539\hat{\beta} &= 1354,3349. \end{aligned} \tag{3.2}$$

Далее, в процессе решения полученной системы нормальных уравнений были найдены оценки параметров: $\hat{\phi} = -0,0002$; $\hat{\beta} = 3,5298$.

Таблица 3.1

Исходные данные для прогнозирования этапа эксплуатации 2004-2005гг.

Исходные данные для построения прогнозных моделей на этапе эксплуатации (2004–2005 гг.) 961-я модель			2-я модель		3-я модель			Остаточные ошибки		
Дата, месяц	$T_{низ.}, ^\circ C$	Перемещение, $x_{вых}, мм$	УВБ, м	Перемещение, $x_{вых}, мм$	Дата, месяц	УВБ, м	Перемещение, $x_{вых}, мм$	$\varepsilon_1, мм$	$\varepsilon_2, мм$	$\varepsilon_3, мм$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Май 2004	+0,18	66,67	503,6	66,67	Янв. 2004	528,8	128,15	-8,89	+8,20	+5,92
июнь	+1,36	120,00	532,2	120,00	февраль	523,6	119,26	+18,34	-5,89	+0,16
июль	+4,36	125,18	537,2	125,18	март	516,4	100,74	+2,70	-8,06	-2,72
август	+9,00	125,91	538,4	125,91	апрель	505,0	76,67	-7,76	-7,01	-7,44
сентябрь	+12,36	127,41	538,6	127,41	май	503,6	66,67	-4,30	-0,30	+7,24
октябрь	+13,82	135,92	539,2	135,92	июнь	532,2	120,00	+1,39	+4,12	-6,80
ноябрь	+13,73	138,52	537,0	138,52	июль	537,2	125,18	+2,26	+4,33	-9,01
декабрь	+11,54	134,44	533,6	134,44	август	538,4	125,91	+5,45	+5,03	-7,97
Янв. 2005	+8,54	127,04	528,6	127,04	сентябрь	538,6	127,41	-9,39	+7,30	-0,69
февраль	+5,64	120,74	523,8	120,74	октябрь	539,2	135,92	+4,12	+1,56	+3,35
март	+1,36	100,37	514,6	100,37	ноябрь	537,0	138,52	-10,08	-1,87	+3,80
апрель	-1,86	74,81	502,4	74,81	декабрь	533,6	134,44	-17,14	-4,01	+4,81
Май 2005	-2,27	66,30	502,0	66,30	Янв. 2005	528,6	127,04	-8,89	+8,20	+5,92

Примечание. Исходные данные для построения прогнозных моделей получены для середины каждого месяца.

После вычисления оценок $\hat{\phi}, \hat{\beta}$ находили оценку $\hat{x}_0$ из выражения:

$$\hat{x}_0 = \bar{x}(1 - \bar{\phi}) - \hat{\beta}\bar{U}. \quad (3.3)$$

Подобным образом были построены и другие оставшиеся математические модели и вычислены оценки параметров $\hat{\phi}, \hat{\beta}$.

2 модель:

$$\begin{aligned} 6267,6571\hat{\phi} + 1923,4139\hat{\beta} &= 4182,3799; \\ 1923,4139\hat{\phi} + 2123,5196\hat{\beta} &= 3484,0524. \end{aligned} \quad (3.4)$$

$$\hat{\phi} = 0,2268; \hat{\beta} = 1,4352; \hat{x}_0 = -667,132 \text{ мм.}$$

3 модель:

$$\begin{aligned} 6041,2816\hat{\phi} + 1695,9849\hat{\beta} &= 3873,7474; \\ 1695,9849\hat{\phi} + 1838,7504\hat{\beta} &= 3133,9478. \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\hat{\phi} = 0,2196; \hat{\beta} = 1,5018; \hat{x}_0 = -701,141 \text{ мм.}$$

Остаточные ошибки характеризуют (табл. 3.1), 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 [Бокс, Дженкинс, 1974] вида:

$$\varepsilon_k = x_k - \hat{x}_{k/k-1} = \gamma \omega_{k-1} \quad (3.6)$$

Для определения порядка модели авторегрессии и выполнения второго этапа оценивания параметров вычислялись асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции остаточных ошибок с использованием выражения (2.7).

Построенные в дальнейшем графики корреляционной функции (рис. 3.2, а) свидетельствуют о том, что описание процесса шума для второй и третьей моделей следует производить моделью авторегрессии 2-го порядка. Вид же корреляционной функции для первой модели указывает на то, что шумовая компонента представляет собой расходящийся процесс и ее дальнейшее исследование не имеет смысла (рис. 3.2, б).

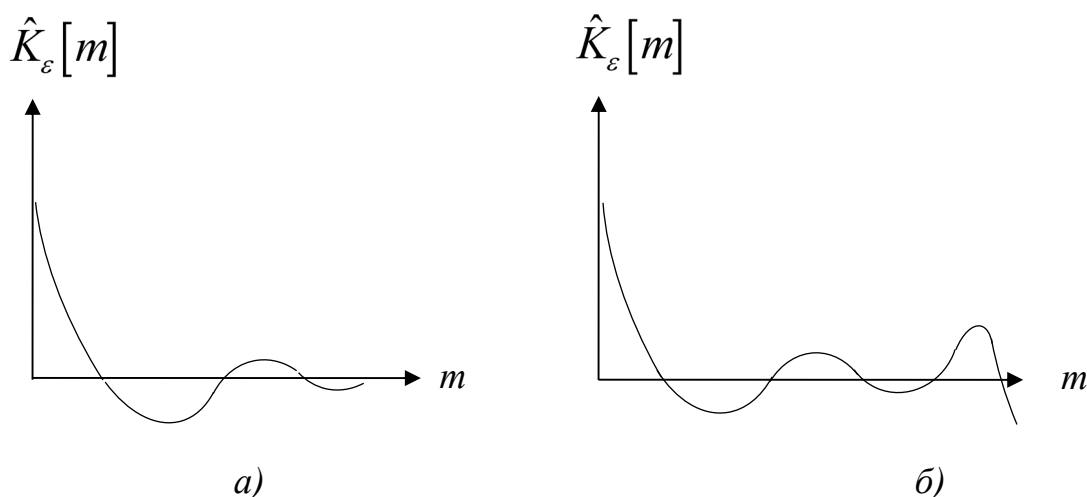


Рис. 3.2. График корреляционной функции:

а) модель 2 и модель 3; б) модель 1

Анализируя остаточные ошибки (табл.3.1, графы 9,10,11), уже после выполнения 1-го этапа построения моделей можно было сделать вывод о том, что вторая и третья модели достаточно корректны с точки зрения структурной идентификации, а первая модель нуждается в доработке.

Дополнительное оценивание по остаточным ошибкам с использованием оценок автокорреляции по формуле Бартлетта [Бокс, Дженкинс, 1974] дало сле-

дующие результаты. При стандартной ошибке для ряда $\hat{\sigma} = 0,30$ – оцениваемые автокорреляции для второй и третьей моделей оказались меньше заданного значения; нет причин сомневаться в адекватности моделей. По-существу, этим самым мы подтвердили вывод, сделанный в работе [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012], что при построении регрессионной прогнозной модели для СШГЭС на периоде 2004-2007 годов оказалось недостаточным использование только одного из основных входных воздействий – температуры бетона $T_{низ}$ в нижней базовой точке; необходим, очевидно, совместный учёт влияния температуры $T_{низ}, T_{верх}$ в обеих базовых точках, что и было впоследствии выполнено при построении прогнозной модели на периоде 2004-2008 годов для контролируемых точек гребня плотины. В связи с этим не видим смысла в ее дальнейшем построении и ограничимся построением оставшихся двух моделей.

Шумовая компонента модели авторегрессии 2-го порядка (в соответствии с разделом 2.2) имеет вид:

$$\omega_k = \mu\omega_{k-1} + \eta\omega_{k-2} + \xi_k, \quad (3.7)$$

где μ, η – оцениваемые параметры.

Оценка этих параметров производилась путём минимизации функционала:

$$F_2(\mu, \eta) = \sum_{m=1}^M \left(\hat{K}_\varepsilon[m] - \mu\hat{K}_\varepsilon[m-1] - \eta\hat{K}_\varepsilon[m-2] \right)^2. \quad (3.8)$$

Из решения полученной системы нормальных уравнений были найдены оценки параметров $\hat{\mu}, \hat{\eta}$, а вычисление коэффициента γ осуществлялось с использованием выражения (2.10). В результате, для всех строящихся моделей в процессе решения системы нормальных уравнений были вычислены оценки параметров $\hat{\mu}; \hat{\eta}; \hat{\gamma}$.

2 модель:

$$\begin{aligned}1434,7289\hat{\mu}+1022,1880\hat{\eta} &= 655,5002; \\1022,1880\hat{\mu}+1588,4070\hat{\eta} &= 108,2707. \\ \hat{\mu} &= +0,7540; \hat{\eta} = -0,4171; \gamma = 4,1713\end{aligned}\tag{3.9}$$

3 модель:

$$\begin{aligned}1260,9663\hat{\mu}+514,8224\hat{\eta} &= 289,5179; \\514,8224\hat{\mu}+1307,1876\hat{\eta} &= 49,6265. \\ \hat{\mu} &= +0,2551; \hat{\eta} = -0,0625; \hat{\gamma} = 5,5246\end{aligned}\tag{3.10}$$

Таким образом были найдены все оценки параметров и для остальных строящихся моделей, которые получили вид:

2 модель:

$$\begin{aligned}x_k &= 0,2268x_{k-1} + 1,4352U_k - 667,132 + 4,1713\omega_k; \\ \omega_k &= -0,7540\omega_{k-1} - 0,4171\omega_{k-2} + \xi_k.\end{aligned}\tag{3.11}$$

3 модель:

$$\begin{aligned}x_k &= 0,2196x_{k-1} + 1,5018U_k - 701,141 + 5,5321\omega_k; \\ \omega_k &= 0,2551\omega_{k-1} - 0,0625\omega_{k-2} + \xi_k.\end{aligned}\tag{3.12}$$

Результаты прогнозирования по обеим моделям методом инверсной верификации (сравнение результатов прогноза с известными значениями перемещений) представлены в табл. 3.2.

Результаты инверсной верификации по построенным моделям

$X_{перем-е}$, мм	Дата прогноза, месяц	2-я модель		3-я модель	
		$X_{прогноз}$ мм	Ошибка, Δ_1 , мм	$X_{прогноз}$ мм	Ошибка, Δ_2 , мм
1	2	3	4	5	6
127,04	Январь 2005	-	-	129,14	-2,10
120,26	февраль	-	-	113,16	+7,10
100,51	март	-	-	93,14	+7,37
75,64	апрель	-	-	63,21	+12,43
66,15	май	-	-	80,57	-14,42
91,80	июнь	102,45	-10,65	101,77	-9,97
104,62	июль	109,77	-5,15	113,40	-8,78
116,67	август	116,15	+0,52	121,52	-4,85
130,00	сентябрь	127,09	+2,91	134,03	-4,03
135,64	октябрь	142,12	-6,48	140,98	-5,34
138,21	ноябрь	139,57	-1,36	140,91	-2,70
134,36	Декабрь 2005	131,45	+2,91	129,03	+5,33

В результате выполненного анализа получены следующие выводы.

1. Построенные прогнозные модели позволяют отслеживать основные закономерности развития процесса деформации гребня плотины и характеризуют близкие друг к другу прогнозные значения перемещений по обеим моделям.

2. Большинство ошибок прогноза перемещений Δ_k в сравнении с самими перемещениями – находятся в пределах графической точности полученных исходных данных по обеим построенным моделям (неточность исходных данных с использованием рис. 3.1 внесло неточность в результаты прогнозирования) за исключением отдельных месяцев. Очевидно, что существует необходимость в уточнении исходных данных при построении прогнозных моделей, что возможно осуществить *либо за счет использованием данных натурных наблюдений, либо повысить точность графических данных путем применения специальных автоматизированных программ для обработки графических данных.*

3. Большие по величине ошибки прогнозирования приходятся на время конца срабатывания и начала нагружения плотины (апрель-июнь); очевидно, что инъецирование трещин [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012] также изменило

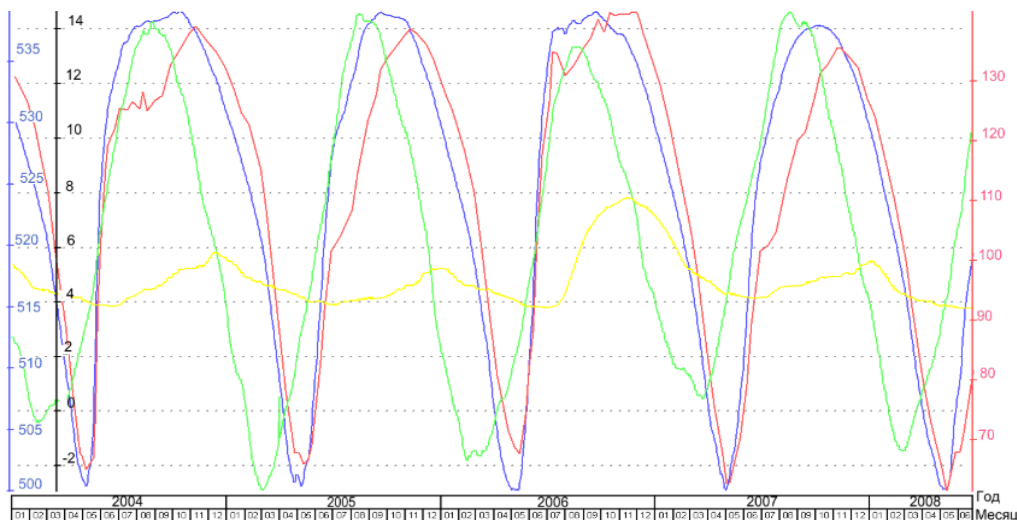
характер работы плотины, что препятствовало возврату плотины в исходное состояние. Представляется, что для данного периода работы плотины необходимо строить отдельные прогнозные модели.

4. Повысить точность прогнозирования возможно *за счет увеличения периода основания прогноза* при построении модели (включение нескольких лет натурных наблюдений в период основания прогноза), что планируется показать в дальнейшем.

3.1.2. Динамические модели на этапе эксплуатации 2004–2008 гг.

3.1.2.1. Динамические модели 1-го и 2-го типов (1-го порядка) (период основания прогноза 2004–2007 гг.)

В качестве исходных данных нами были использованы данные измерений за 2004-2008 годы, полученные на основании графика (рис. 3.3.) из работы [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2004] (необходимые исходные данные натурных перемещений гребня плотины отсутствуют в открытой печати).



--- температура бетона $T_{низ.}$ (секция 33); --- температура бетона $T_{верх.}$;

--- радиальные перемещения; --- верхний бьеф;

Рис. 3.3. Хронограммы перемещений гребня плотины, УВБ и температура бетона во времени в базовой точке: $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$

Следует отметить, что с целью **повышения точности** исходных данных была разработана специальная автоматизированная программа в среде MS Excel для считывания координат точек с графиков (см. рис. 3.12, раздел 3.1.5).

Параллельно строились два типа математических моделей с различным количеством входных воздействий [Кобелева, Хорошилов, 2015, 2016]. Динамическая модель 1-го типа с одним входным воздействием $x(U, x_0)$ имеет вид:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta U_k + \gamma \omega_k. \quad (3.13)$$

Динамическая модель 2-го типа с двумя входными воздействиями $x(U, T_{низ.}, x_0)$ имеет вид:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_{низ.} + \gamma \omega_k. \quad (3.14)$$

Период основания прогноза для построения моделей составил: с января 2004 г. – по май 2007 г. Процесс построения прогнозных моделей данного типа достаточно подробно изложен в разделе 3.1.1. Построенные прогнозные модели получили вид:

1 модель:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2196x_{k-1} + 1,5018U_k - 701,141 + 5,5321\omega_k, \\ \omega_k &= 0,2551\omega_{k-1} - 0,0625\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.15)$$

2 модель:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2127x_{k-1} + 1,8757U_k - 1,1782T_{низ.} - 888,616 + 2,1216\omega_k, \\ \omega_k &= 0,7435\omega_{k-1} - 0,2989\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.16)$$

Результаты прогнозирования (табл. 3.3) показывают, что для периода ветви нагружения (июнь-сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями в сравнении с самими перемещениями.

Таблица 3.3

Результаты инверсной верификации по прогнозным моделям

Дата прогноза, месяц	$X_{\text{перемещение}}, \text{мм}$	Модель 1-го типа (u, x_0)		Модель 1-го типа (уточненная)		Модель 2-го типа ($u, T_{\text{низ.}}, x_0$)	
		$X_{\text{прогноз}}, \text{мм}$	Ошибка, $\Delta_1, \text{мм}$	$X_{\text{прогноз}}, \text{мм}$	Ошибка $\Delta_2, \text{мм}$	$X_{\text{прогноз}}, \text{мм}$	Ошибка $\Delta_3, \text{мм}$
Июнь 2007	101,45	97,71	+3,74	104,62	-3,17	114,48	-13,03
июль	108,12	119,95	-11,83	118,67	-10,55	124,45	-16,33
август	120,00	133,79	-13,79	130,68	-10,68	131,39	-11,39
сентябрь	127,97	139,74	-11,77	138,39	-10,42	135,73	-7,76
октябрь	134,35	140,54	-6,19	141,11	-6,76	137,94	-3,59
ноябрь	133,48	136,42	-2,94	138,31	-4,83	131,95	+1,53
декабрь	126,09	126,54	-0,45	127,48	-1,39	123,25	+2,84
Январь 2008	116,67	114,85	+1,82	115,36	+1,31	113,57	+3,10
февраль	102,86	100,87	+1,99	100,53	+2,33	98,95	+3,91
март	81,55	85,65	-4,10	83,48	-1,93	74,61	+6,94
апрель	66,67	69,21	-2,54	63,00	+3,67	63,43	+3,24
Май 2008	67,87	66,85	+1,02	65,53	+2,34	66,26	+1,61

Эта разница может быть объяснена тем, что высокая «*приточность*» в 2006 году (особенно высокая в июне) *вновь внесла* свои коррективы в прогнозные модели, а данный год входит в период основания прогноза построенной модели. Анализ данных показал, что причиной роста максимальных радиальных перемещений дополнительно явилось существенное изменение температуры бетона вблизи верховой грани, что хорошо отражено на графике (рис. 3.3.); а это внесло свои изменения в работу плотины. Представляется, что прогнозную модель необходимо дополнить моделью, отражающей существенные колебания температуры при *нештатных* ситуациях работы плотины. Дополнение построенной прогнозной модели (3.15) за влияние температуры в верхней базовой точке $T_{\text{верх.}}$ в выражении (3.17) позволило несколько скорректировать прогнозные перемещения. Результаты прогнозирования по уточненной модели также представлены в табл. 3.3.

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,2190U_{k-1} + 1,6703T_{\text{верх.}} + 351,607; \\
x_k &= 0,5647x_{k-1} + 2,2211T_{\text{верх.}} + 34,431; \\
\Delta x_k &= -0,1027\Delta x_{k-1} + 1,8185\Delta U_k - 0,556 + 2,1324\omega_k; \\
\omega_k &= -0,3151\omega_{k-1} - 0,0329\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.17}$$

Выполненные исследования позволили сделать следующие выводы.

1. При построении прогнозных моделей для периода эксплуатации 2004-2008 гг. оказалось возможным увеличение периода основания прогноза (включение нескольких лет натурных наблюдений в период основания прогноза). Большинство полученных ошибок прогноза перемещений Δ в сравнении с самими перемещениями лежат в пределах точности исходных графических данных, что позволяет оценить точность прогнозных моделей достаточно хорошей. При этом следует отметить, что точность исходных данных удалось повысить практически на порядок за счет применения специальной программы в среде MS Excel для считывания координат точек с графиков.

2. Для ветви нагружения (июнь-сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями в сравнении с самими перемещениями. Очевидно, необходим более корректный учет, отражающей существенные колебания температуры при *нештатных* ситуациях (к такому состоянию мы относим на данном этапе высокую *приточность* работы плотины), т.е. дополнительный учет изменения температуры вблизи верховой грани $T_{\text{верх.}}$.

3. Дополнительно построенная прогнозная модель за влияние температуры $T_{\text{верх.}}$ к модели 1-го типа позволила несколько скорректировать прогнозные перемещения для периода ветви нагружения (июнь-сентябрь).

3.1.2.2. Динамические модели 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий (период основания прогноза 2004-2007 гг.)

Для построения динамических моделей 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий за влияние температуры в качестве основных входных воздействующих факторов использовались: уровень верхнего бьефа (гидростатическое давление) и температура в нижней базовой точке $T_{низ}$. Построение прогнозных моделей осуществлялось в соответствии с рекомендациями (раздел 2.4); период основания прогноза составил несколько лет: с января 2004 г. – по май 2007 г. Различие в построении моделей состояло в том, что при построении одной из моделей применялось транспортное запаздывание по температуре в один месяц. Были построены две модели, которые получили вид:

1 модель:

$$\begin{aligned}U_k &= 0,6107U_{k-1} + 1,2680T_{низ.} + 196,795; \\x_k &= 0,7843x_{k-1} + 2,0927T_{низ.} + 11,945; \\ \Delta x_k &= -0,0002\Delta x_{k-1} + 1,7600\Delta U_k + 0,203 + 4,0301\omega_k; \\ \omega_k &= -0,2588\omega_{k-1} + 0,0737\omega_{k-2} + \xi_k.\end{aligned}\tag{3.18}$$

2 модель:

$$\begin{aligned}U_k &= 0,2902U_{k-1} + 1,7000T_{низ.} + 362,603; \\x_k &= 0,5441x_{k-1} + 2,4511T_{низ.} + 37,132; \\ \Delta x_k &= -0,1050\Delta x_{k-1} + 1,8859\Delta U_k - 0,651 + 2,6624\omega_k; \\ \omega_k &= -0,3123\omega_{k-1} - 0,0239\omega_{k-2} + \xi_k.\end{aligned}\tag{3.19}$$

Результаты прогнозирования методом инверсной верификации представлены в табл. 3.3.

Результаты инверсной верификации по обеим моделям

Дата прогноза, месяц	Перемещение, $x_{вых}$, мм	1-я модель		2-я модель	
		$X_{прогн.}$, мм	Ошибка Δ_1 , мм	$X_{прогн.}$, мм	Ошибка Δ_2 , мм
Июнь 2007	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	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 2008	67,87	66,85	+1,02	64,95	+2,42

По результатам исследования можно сделать следующие выводы.

1. Обе построенные прогнозные модели для периода эксплуатации 2007-2008 годов 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.

2. Для периода ветви нагружения (июнь-сентябрь) имеется существенная разница между прогнозными значениями в сравнении с самими перемещениями. Эта разница *вновь* может быть объяснена тем, что высокая *приточность* в 2006 году (особенно высокая в июне) внесла свои коррективы в прогнозные модели, а данный год входит в период основания прогноза построенных моделей. Также (как отмечалось ранее) причиной роста максимальных радиальных перемещений явилось существенное изменение температуры бетона вблизи верховой грани (рис. 3.3.); это также внесло свои изменения в работу плотины. Кроме того, ранее для более корректного прогнозирования построенные модели были дополнены моделью, отражающей колебания температуры $T_{верх}$. при *нештатных* ситуациях работы плотины.

3. Вопрос об увеличении периода основания прогноза для повышения точности прогнозирования при построении модели (включение нескольких лет натурных наблюдений в период основания прогноза), остается на данный момент все еще *открытым*.

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

3.1.3.1. Динамические модели 3-го типа (1-го порядка) с декорреляцией входных воздействий

В качестве исходных данных и инверсной верификации строящихся математических моделей были использованы данные измерений, полученные из работ [Храпков, 2011; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Евстифеев, Костылев, Храпков, 2012; Вульфович, 2013; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013]. Период основания прогноза для всех строящихся моделей составил: с 30 апреля 2007 по 15 мая 2008 гг. (см. рис. 3.3). *Этот выбор был 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 [Вульфович, 2013], а также тем, что данный временной период является *предшествующим* аварии 19 сентября 2009 года.

Были построены несколько вариантов прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядка для изучения перемещений контролируемых точек плотины СШ ГЭС. За основные входные воздействия были приняты: U_k – значение уровня верхнего бьефа (гидростатическое давление) и $T_{низ}; T_{верх}$ – температура бетона тела плотины в нижней и в верхней базовых точках. Последовательность ввода определялась первичностью и вторичностью действия факторов, т.е. вначале в модель вводилось влияние температуры $T_{низ}$ или $T_{верх}$ в базовых точках, а затем – гидростатическое давление, либо их сочетания.

В качестве исходных рекуррентных уравнений 3-го типа 1-го и 2-го порядков были использованы модели вида [Гуляев, Хорошилов, 2014] с различными сочетаниями входных воздействующих факторов.

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{низ.} + U_0; \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_{низ.} + x_0; \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k; \\ \omega_k &= AP2. \end{aligned} \quad (3.20)$$

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_{низ.} + \beta_2 T_{верх.} + U_0, \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \varphi_3 x_{k-2} + \beta_3 T_{низ.} + x_0, \\ \Delta x_k &= \varphi_4 \Delta x_{k-1} + \beta_4 \Delta U_k + \Delta x_0, \\ \omega_k &= AP2. \end{aligned} \quad (3.21)$$

В моделях (3.20) и (3.21) первые два уравнения представляют основные входные воздействия U_k ; $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$, вызывающие перемещение x_k и выражают зависимость гидростатического давления и перемещения от температуры бетона тела плотины. Третье уравнение описывает зависимость Δx_k от ΔU_k , где Δx_k – найденные по второму уравнению разности между фактическими значениями перемещений x_k и вычисленными на периоде основания прогноза, а ΔU_k – аналогичные соответствующие разности между фактическими и вычисленными по первому уравнению значениями U_k ; четвертое уравнение – одна из разновидностей шумовой компоненты, например, $AP2$, решение которого будет показано ниже.

Замена в выражениях (3.20) и (3.21) значений x_k , U_k , $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$ их центрированными по времени значениями: $\dot{x} = x_k - \bar{x}$, $\dot{U} = U_k - \bar{U}$, $\dot{T} = T_{низ.} - \bar{T}$,

$\dot{T} = T_{\text{верх.}} - \bar{T}$ ($\bar{x}, \bar{U}, \bar{T}_{\text{низ.}}, \bar{T}_{\text{верх.}}$ – средние величины перемещения и входных параметров: уровень верхнего бьефа и температуры, взятых на периоде основания прогноза), как было показано ранее в работе [Гуляев, Хорошилов, Кобелева, 2015], позволяет существенно упростить процесс вычислений, и повышает обусловленность систем нормальных уравнений. Для определения порядка модели авторегрессии и выполнения второго этапа оценивания параметров вычислялись асимптотически несмещенные оценки корреляционной функции остаточных ошибок с использованием выражения (2.7).

Решение систем уравнений (3.20) и (3.21) осуществлялось поэтапно в соответствии с разделом 2.4. Окончательный этап разработки прогнозной модели заключался в анализе полученных результатов с контрольным прогнозированием на основе принципа инверсной верификации. В случаях неудовлетворительного качества построенной прогнозной модели заново повторялись все предыдущие этапы ее разработки с целью найти другой вид или структуру модели, либо более тщательно отнестись к выбору основных воздействующих факторов и возможному транспортному запаздыванию, а также выбору периода основания прогноза, которые наиболее адекватно описывают исследуемый деформационный процесс. Построенные окончательно прогнозные модели 3-го типа 1-го и 2-го порядков с различными сочетаниями воздействующих факторов соответственно получили вид [Хорошилов, Барлиани, Губонин, 2018].

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{низ.}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{\text{низ.}} + 142,243; \\ x_k &= 0,8174x_{k-1} + 1,1214T_{\text{низ.}} + 11,523; \\ \Delta x_k &= 0,0062\Delta x_{k-1} + 1,6224\Delta U_k + 0,1338 + 1,2290\omega_k; \\ \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,1530\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \tag{3.22}$$

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{низ.}}; T_{\text{верх.}}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned}
\hat{U}_{k/k-1} &= 0,8612U_{k-1} + 0,6062T_{низ.} - 0,0748T_{верх.} + 68,848; \\
\hat{x}_{k/k-1} &= 0,6555x_{k-1} + 1,0275T_{низ.} + 13,2756T_{верх.} - 31,219; \\
\Delta x_k &= 0,3803\Delta x_{k-1} + 1,0213\Delta U_k + 4,205 + 1,8630\omega_k; \\
\omega_k &= 0,4404\omega_{k-1} - 0,1255\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.23}$$

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{низ.}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{низ.} + 142,243; \\
\hat{x}_{k/k-1} &= 0,2950x_{k-1} + 0,4362x_{k-2} + 1,6151T_{низ.} + 13,027; \\
\Delta x_k &= 0,0355\Delta x_{k-1} + 1,5566\Delta U_k - 0,128 + 1,2592\omega_k; \\
\omega_k &= 0,4418\omega_{k-1} + 0,1490\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.24}$$

Модель $\Delta x(\Delta U_k; T_{верх.}; x_0; U_0)$

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,7764U_{k-1} + 3,0060T_{верх.} + 100,260; \\
x_k &= 0,5322x_{k-1} + 20,7204T_{верх.} - 45,273; \\
\Delta x_k &= 0,3808\Delta x_{k-1} + 1,0372\Delta U_k - 2,957 + 1,9418\omega_k; \\
\omega_k &= 0,5736\omega_{k-1} - 0,2255\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.25}$$

В табл. 3.4 представлены результаты прогнозирования с использованием модели (3.23) и графики (рис. 3.4, а, б, в) измеренных и прогнозных перемещений тела плотины на этапах эксплуатации 2008-2009, 2009-2010 и 2010-2011 годов.

Отметим при этом следующее. Анализ графиков изменения температуры $T_{низ.}$ и УВБ показали их различие по запаздыванию от величины перемещения в 2009-2010 гг. в сравнении с близкими между собой графиками запаздывания в периоды эксплуатации 2007-2008 гг. (период основания прогноза, на котором строилась модель) и 2008-2009 гг. При чем это отличие проявляется примерно к концу января и продолжается до конца сработки водохранилища. Именно в эти

месяцы наблюдаются большие расхождения в прогнозных значениях в ветви сработки 2009-2010 гг. Подобное запаздывание наблюдается и по ветви нагружения 2008-2009 гг. в сравнении с ветвью нагружения 2007-2008 гг. Это проявляется с конца июня и продолжается до конца октября. Дополнительный учет изменения температуры в верхней базовой точке $T_{\text{верх}}$ несколько улучшило прогноз-ные значения перемещений плотины. В тоже время, использование такого мето-дического приема как введение транспортного запаздывания при прогнозировании – оказывает дополнительный положительный эффект для корректировки окончательных прогнозных значений.

Кроме того, нужно отметить еще одно обстоятельство, а именно, что возврат плотины в исходное состояние (на момент сработки водохранилища) отличается от прогнозных значений на величину порядка 7-8 мм. Данное отклонение нам пока необъяснимо, но так как за 3 прошедшие года эксплуатации плотины 2009-2010, 2010-2011 и 2011-2012 годов эта величина изменилась и составила вели-чины соответственно 69,13 мм, 70,36 мм и 72 мм, то данный факт требует допол-нительных исследований.

Таблица 3.4

Результаты прогнозирования по модели (3.23) методом инверсной верификации

Дискретность модели	Этап 2008-2009 гг.			Этап 2009-2010 гг.			Этап 2010-2011 гг.		
	Результаты прогноза, мм								
	Дата прогноза	Ошибка прогноза	Конечная ошибка	Дата прогноза	Ошибка прогноза	Конечная ошибка	Дата прогноза	Ошибка прогноза	Конечная ошибка
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
15.05.08				5.05.09	+0.8	+0.8	13.05.10	+7.2	+6.7
30.05.08	30.05.08	-3.8	+1.6	30.05.09	-0.1	-0.1	23.05.10	+1.9	
15.06.08				03.06.09	-0.4	-0.4	10.06.10	+3.4	+1.6
30.06.08	30.06.08	-9.4	-2.3				30.06.10	+6.1	+2.8
15.07.08				1.07.09	-1.4	-1.4	09.07.10	+9.2	+3.3

Окончание табл. 3.4

30.07.08				27.07.09	+3.8	+3.8			
15.08.08				17.08.09 - авария					
30.08.08				27.08.09	+3.5	+3.5	30.08.10	+1.3	+1.3
15.09.08	11.09.08	-9.1	+1.5				9.09.10	+3.1	+3.1
30.09.08				25.09.09	+1.9	+1.9			
15.10.08	07.10.08	-4.2	+3.2				14.10.10	+0.8	+0.8
30.10.08				29.10.09	-1.2	-1.2	28.10.10	+4.6	+3.1
15.11.08	13.11.08	-1.6	-1.6	13.11.09	-1.7	-1.7			
30.11.08	26.11.08	-0.5	-0.5						
15.12.08				11.12.09	-0.7	-0.7	14.12.10	+7.7	+1.9
30.12.08	27.12.08	+1.9	+1.9						
15.01.09	11.01.09	+1.2	+1.2	12.01.10	+0,9	+0,9	11.01.11	-1.8	-1.8
30.01.09									
15.02.09	13.02.09	+0.1	+0.1	11.02.10	+4.3	+2.1	11.02.11	-0.15	-0.15
28.02.09				25.02.10	+6.2	+1.3			
15.03.09	13.03.09	-0.4	-0.4	11.03.10	+4.5	+1.4	11.03.11	+2.8	+2.8
30.03.09				30.03.10	+3.3	-3.1			
15.04.09							13.04.11	+2.4	+2.4
30.04.09	28.04.09	-1.7	-1.7	28.04.10	+1.5	+2.0			
15.05.09	5.05.09	+0.8	+0.8	13.05.10	+7.2	+6.7	12.05.11	+8.3	+8.3

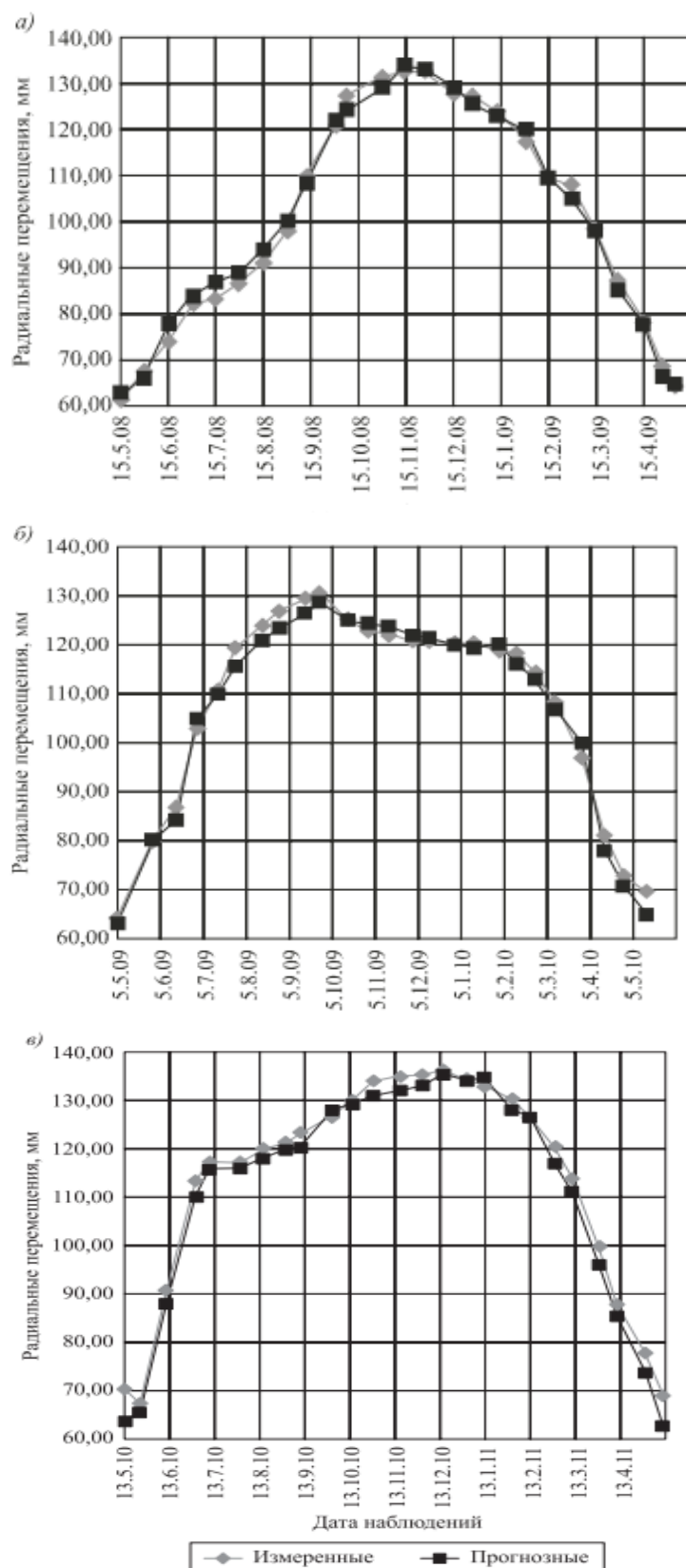


Рис.3.4. Графики изменения измеренных и прогнозных перемещений плотины на этапах эксплуатации 2008-2009 гг. (а), 2009-2010 гг. (б) и 2010-2011 гг. (в)

3.1.3.2. Прогнозные математические модели на основе рекуррентных уравнений 2 типа 1-го и 2-го порядков и 3 типа 1-го порядка

С целью выбора наиболее корректной математической модели для изучения поведения плотины СШ ГЭС после аварии 2009 года были построены различные варианты математических прогнозных моделей на основе рекуррентных уравнений разных типов 1-го и 2-го порядков с различными входными воздействиями (U_k – гидростатическое давление УВБ; $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$ – 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). Период основания прогноза для всех строящихся моделей составил: с 30 апреля 2007 по 15 мая 2008 гг. (см. рис. 3.3). **Этот выбор** так же был обоснован тем (как и ранее в разделе 3.1.3.1), что данный временной интервал входит в период, когда плотина СШ ГЭС сохраняла монолитность после ремонта (1995-2003 гг.), воспринимая при этом расчетный напор [Вульфович, 2013], а также тем, что данный временной период является **предшествующим** аварии 19 сентября 2009 года. В качестве исходных данных и последующей верификации результатов перемещений использовались данные из работ [Гордон, Скворцова, Стефаненко, 2011; Храпков, Скворцова, Костылев, Щерба, 2011; Вульфович, 2013; Гордон, Скворцова, 2013; Костылев, 2013] и которые постоянно корректировались, уточнялись по мере дополнительных публикаций, как в сети Internet, так и в научных журналах. Для построения всех возможных вариантов математических моделей были использованы ранее рассмотренные типы рекуррентных уравнений, представленные в разделах 2.1-2.4.

Динамическая модель 2-го типа 1-го порядка с двумя входными воздействиями $x(U_k; T_k)$:

$$x_k = \varphi x_{k-1} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k.$$

Динамическая модель 2-го типа *2-го порядка* с двумя входными воздействиями $x(U_k; T_k)$:

$$x_k = \varphi_1 x_{k-1} + \varphi_2 x_{k-2} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k.$$

Динамическая модель 3-го типа (декорреляция входных факторов) с двумя входными воздействиями $\Delta x(\Delta U_k; T_k)$:

$$\begin{aligned} U_k &= \varphi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_k + U_0; \\ x_k &= \varphi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k + x_0; \\ \Delta x_k &= \varphi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k. \end{aligned}$$

Процедура построения динамических моделей и оценивания параметров по результатам наблюдений за входом U_k и выходом x_k осуществлялась в соответствии с процедурами, представленными в разделах 2.2-2.4.

В табл. 3.5 для сравнения представлены значения остаточных ошибок ε_k , полученные при построении различных типов математических моделей. Сравнительный анализ величин значений остаточных ошибок с использованием стандарта σ_k (как показателя рассеяния) дает возможность утверждать следующее [Хорошилов, Кобелева, Гуляев, 2017]:

- из моделей с одним и двумя входными воздействиями следует отдавать предпочтение моделям с двумя входными воздействиями, которые более корректно описывают процесс перемещений (столбцы 3 и 4);
- для моделей одного и того же типа дискретность исходных данных в 15 дней оказалась предпочтительней в сравнении с 30 днями (столбцы 4 и 5);
- для моделей одного и того же типа введение транспортного запаздывания предпочтительнее при его введении при прогнозировании процесса перемещений, а не при конструировании самой модели (столбцы 5 и 6);

– 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 5 и 7);

– модели 3-го типа более корректно описывают процесс перемещений в сравнении со всеми другими моделями (столбцы 8 и 9);

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

Построенные в дальнейшем графики автокорреляционной функции (рис. 3.4) для произвольно выбранных всех трех типов математических моделей свидетельствуют о том, что описание процесса шума для всех моделей следует производить моделью авторегрессии 2-го порядка.

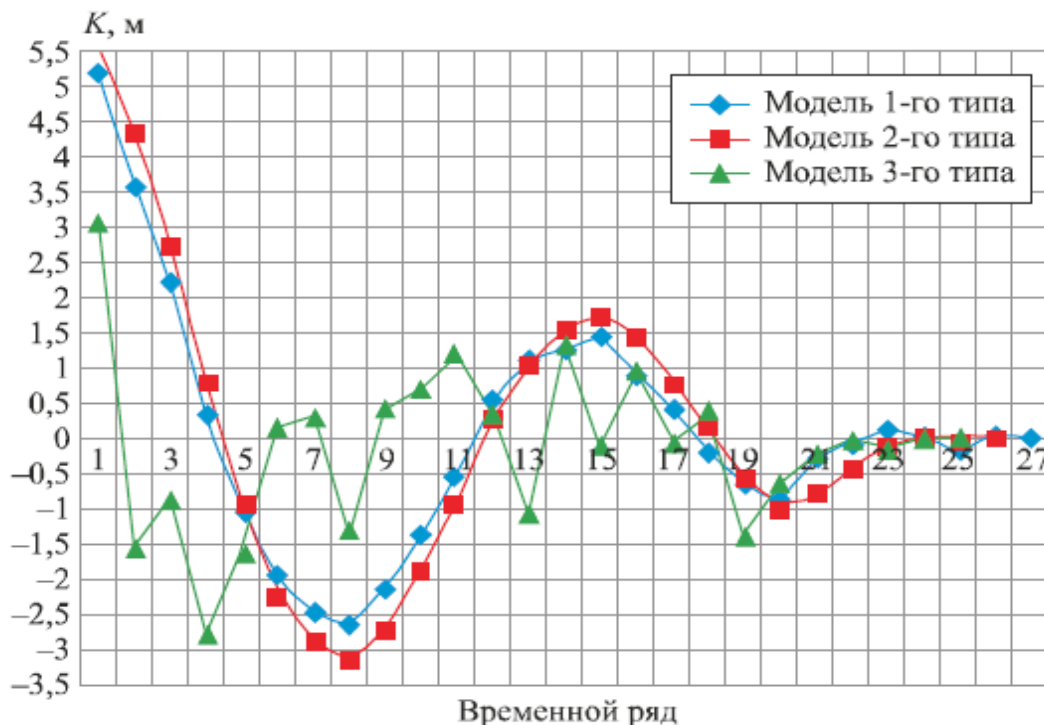


Рис. 3.4. Графики автокорреляционной функции для моделей 1-го и 2-го типов и модели 3-го типа с декорреляцией входных воздействий

В результате последующих вычислений были получены все оценки параметров для всех строящихся прогнозных моделей; общее число построенных моделей составило более 20-ти. Ниже представлены некоторые из построенных моделей, которые заслуживают наибольший интерес с точки зрения прогнозирования [Khoroshilov V. S., 2018].

Модель 2-го типа (1-го порядка) вида $x(U_k; T_{\text{нuz.}}; x_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1843x_{k-1} + 1,7858U_k - 1,3775T_{\text{нuz.}} - 839,408 + 0,8279\omega_k, \\ \omega_k &= 1,4969\omega_{k-1} - 0,7452\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.26)$$

Модель 2-го типа (1-го порядка) вида $x(U_k; T_{\text{нuz.}}; x_0; D15; Z2.0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,3218x_{k-1} + 0,5927U_k + 1,6304T_{\text{нuz.}} - 249,804 + 1,7192\omega_k, \\ \omega_k &= 0,8682\omega_{k-1} - 0,1992\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Модель 2-го типа (2-го порядка) вида $x(U_k; T_{\text{нuz.}}; x_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,1117x_{k-1} + 0,0652x_{k-2} + 1,8371U_k - 1,3854T_{\text{нuz.}} - 852,804 + \\ &+ 0,7576\omega_k, \\ \omega_k &= 1,5204\omega_{k-1} - 0,7637\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.28)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) вида $\Delta x(\Delta U_k; T_{\text{нuz.}}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7180U_{k-1} + 0,7754T_{\text{нuz.}} + 142,243; \\ x_k &= 0,8174x_{k-1} + 1,1214T_{\text{нuz.}} + 11,523; \\ \Delta x_k &= 0,0062\Delta x_{k-1} + 1,6224\Delta U_k + 0,1338 + 1,2290\omega_k; \\ \omega_k &= 0,3790\omega_{k-1} + 0,1530\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.29)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) вида $\Delta x(\Delta U_k; T_{низ.}; T_{верх.}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,8612U_{k-1} + 0,6062T_{низ.} - 0,0748T_{верх.} + 68,848; \\ x_k &= 0,6555x_{k-1} + 1,0275T_{низ.} + 13,2756T_{верх.} - 31,219; \\ \Delta x_k &= 0,3803\Delta x_{k-1} + 1,0213\Delta U_k + 4,205 + 1,8630\omega_k; \\ \omega_k &= 0,4404\omega_{k-1} - 0,1255\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.30)$$

Модель 3-го типа (1-го порядка) вида $\Delta x(\Delta U_k; T_{верх.}; x_0; U_0; D15; Z0)$:

$$\begin{aligned} U_k &= 0,7764U_{k-1} + 3,0060T_{верх.} + 100,260; \\ x_k &= 0,5322x_{k-1} + 20,7204T_{верх.} - 45,273; \\ \Delta x_k &= 0,3808\Delta x_{k-1} + 1,0372\Delta U_k - 2,957 + 1,9418\omega_k; \\ \omega_k &= 0,5736\omega_{k-1} - 0,2255\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.31)$$

Таблица 3.5

Значения остаточных ошибок для различных типов моделей

№№ пп	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)	Модель 3-го типа (D15;Z0)	Модель 3-го типа (D15;Z0)
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2007 Май 15			3,089	-3,361	1,039		
2	Май 30			0,477	-0,250	-2,502	-0,865	-1,935
3	Июнь 15	1,029	-2,736	-2,945	4,161	-2,628	-1,449	1,221
4	Июнь 30			-3,409	3,037	-6,555	-0,091	0,134
5	Июль 15	-7,122	-6,026	-6,858	-4,111	-4,834	-5,631	-5,010
6	Июль 30			-4,428	-3,633	-2,287	-2,316	-2,031
7	Август 15	-6,037	-2,102	-2,032	-2,029	-1,442	-0,338	1,562
8	Август 30			-1,298	-1,751	-1,600	-0,056	1,706
9	Сентябрь 15	-5,169	-1,154	-1,389	-5,027	2,109	-1,751	-1,069
10	Сентябрь 30			2,573	-3,029	3,566	2,666	4,517
11	Октябрь 15	2,149	3,934	3,738	-1,914	3,702	2,302	2,219
12	Октябрь 30			3,944	0,240	4,062	1,708	3,352
13	Ноябрь 15	4,540	4,138	4,352	1,127	3,187	1,870	2,094
14	Ноябрь 30			3,472	1,336	2,517	0,756	0,680
15	Декабрь 15	4,564	2,221	2,926	3,534	0,996	0,712	-1,855
16	Декабрь 30			1,285	3,144	-0,160	-0,578	-6,227
17	2008 Январь 15	3,634	-0,825	0,275	4,885	-2,033	0,303	-0,564
18	Январь 30			-1,807	4,675	-2,881	-0,393	0,530
19	Февраль 15	3,616	-3,817	-2,606	5,689	-4,651	0,007	4,716
20	Февраль 29			-4,585	3,063	-2,688	-2,117	2,102
21	Март 15	0,773	-1,829	-2,621	1,593	-0,510	-0,825	0,308
22	Март 30			-0,516	0,629	0,638	-0,454	0,210
23	Апрель 15	-1,071	0,766	0,551	0,399	3,553	-0,256	0,026
24	Апрель 30			3,156	-1,039	2,135	1,464	0,738
25	2008 Май 15	-2,247	2,859	1,716	-5,319	1,039	-2,061	-3,140
26	σ_k	4,020	3,064	3,052	3,208	2,926	1,746	2,595

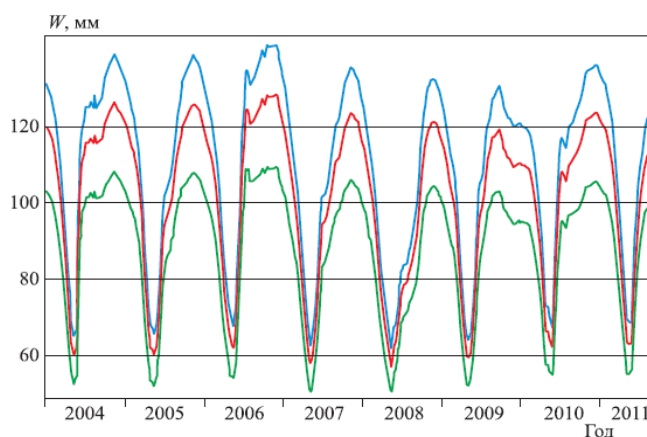
В табл. 3.6 представлены результаты прогнозирования перемещений плотины по модели (3.28) методом инверсной верификации (красным цветом выделены исходные данные: из натурных наблюдений; синим – полученные с графиков; фиолетовым – результаты прогноза с учетом транспортного запаздывания) как на известные даты натурных наблюдений на отдельные перемещения из работ [Поведение Саяно-Шушенской плотины..., 2010; Храпков, 2011; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Евстифеев, Костылев, Храпков, 2012; Вульфович, 2013; Юсупов, Решетникова, Александров, 2013; Вульфович, Потехин, 2017], так и на полученные с графиков перемещения с использованием специальной программы считывания данных с графиков, например, с рис. 3.5 – перемещения гребня ключевой секции 33 плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапах эксплуатации 2009-2010, 2010-2011 и 2011-2012 гг.

Таблица 3.6.

Результаты прогнозирования с использованием прогнозной модели (3.28)

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
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
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	

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
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	
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	



-- отметка 542 м; -- отметка 521 м; -- отметка 494 м;

Рис. 3.5. Хронограммы радиальных перемещений гребня плотины (секция 33) во времени (2004–2011 гг.)

Отметим следующие особенности. Каждый цикл эксплуатации плотины имеет две ветви: ветвь нагружения (наполнение водохранилища) и ветвь разгрузки (сработка водохранилища). При этом перемещения контролируемой базовой точки в обеих ветвях цикла происходят по различным криволинейным траекториям в течение всего цикла эксплуатации плотины в зависимости от воздействующих факторов. Представляется разумным выделить *«штатное»* поведение плотины и *«нестатное»*, например, такие как: избыточная приточность для периода эксплуатации 2006-2007 гг.; период эксплуатации 2009-2010 гг. – авария 2009 года и аномально холодная зима; 2010-2011 гг. – перенесение начала наполнения водохранилища до конца мая с целью дополнительного прогрева низовой грани плотины. Подобные ситуации приводят к дополнительному воздействию на перемещение плотины изменений температуры в нижней $T_{низ.}$ и в верхней базовых точках $T_{верх.}$, и одна и та же прогнозная модель, например, достаточно хорошо описывающая ветвь нагружения, оказывается мало применимой к описанию ветви разгрузки и наоборот. Отметим при этом, что при охлаждении бетона в нижней базовой точке на 1° прогиб гребня плотины секции 33 увеличивается на 2,4 мм, а при охлаждении бетона в верхней базовой точке $T_{верх.}$ на 1° прогиб гребня уменьшается на 2,2 мм [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012]. Так, например, анализ исходных данных показал [Гордон, Скворцова, Стефаненко, 2011; Вульфович, 2013], что причиной более высокого роста значений максимальных радиальных перемещений явилось заметное изменение температуры тела бетона плотины вблизи верховой грани, что хорошо просматривается на графике (рис. 3.3), при этом разница в колебаниях температуры $T_{верх.}$ при *«штатном»* и *«нестатном»* поведении плотины составляет величину до $2,5-3^\circ$. В тоже время аномально холодная зима 2009-2010 гг. за счет дополнительного охлаждения низовой грани $T_{низ.}$ привела к большим, чем при *«штатном»* поведении, прогибам секции плотины. Представляется, что для корректного прогнозирования в строящиеся модели необходимо поэтапно вводить воз-

действия колебаний температуры $T_{низ.}$ и $T_{верх.}$ для корректного отражения различных ситуаций поведения плотины. Поэтому правильный выбор математической модели – это своеобразное искусство подбора различных математических моделей и их сочетаний для описания поведения плотины: ветви нагружения и ветви разгрузки.

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы.

1. Построенные математические модели с различной точностью описывают процесс поведения плотины. При этом возможно подобрать те математические модели, которые достаточно корректно подходят к описанию процесса перемещения выбранной контролируемой базовой точки, например, выражение (3.28), результаты прогнозирования по которому представлены в таблице 3.6. Модель достаточно корректно описывает ветвь разгрузки 2008-2009 гг., а также ветви нагружения и ветви разгрузки 2009-2010 гг. за исключением двух месяцев: февраль-март – «штатное» поведение плотины), и не точно описывает ветви нагружения на этапах эксплуатации 2008-2009 и 2010-2011 гг. – («штатное» поведение). Это можно объяснить различной скоростью наполнения водохранилища, когда за короткое время в силу инерционного запаздывания плотина не успевает «отработать» перемещения вследствие быстрого наполнения водохранилища, как это было, например, на этапе нагружения 2010-2011 гг. Кроме того, нужно отметить еще одно обстоятельство, а именно, что возврат плотины в исходное состояние (на момент сработки водохранилища) отличается от прогнозных значений на величину порядка 7-8 мм. Данное отклонение нам пока необъяснимо, но так как за 3 прошедшие года эксплуатации плотины 2009-2010, 2010-2011 и 2011-2012 гг. эта величина изменилась и составила величины соответственно 69,13 мм, 70,36 мм и 72 мм, то данный факт требует дополнительных исследований и не принимается во внимание.

2. Анализ графиков изменения температуры в нижней базовой точке $T_{низ.}$ и УВБ показал их отличие по запаздыванию от величины перемещения в 2009-2010 гг. в сравнении с близкими между собой графиками запаздывания в периоды эксплуатации 2007-2008 гг. (на котором строилась модель) и 2008-2009 гг. Причем это отличие проявилось примерно к концу января и продолжалось до

конца сработки водохранилища. Именно в эти месяцы наблюдались большие расхождения в прогнозных значениях в ветви сработки 2009-2010 гг. Подобное запаздывание наблюдалось и по ветви нагружения 2008-2009 гг. в сравнении с ветвью нагружения 2007-2008 гг. Это проявилось с конца июня и продолжалось до конца октября. Поэтому использование такого методического приема как введение транспортного запаздывания при прогнозировании – оказало положительный эффект для корректировки прогнозных значений.

3. Корректное введение транспортного запаздывания по УВБ по отношению к перемещению позволило получить также достаточно хорошие прогнозных значения и с использованием моделей (3.26) и (3.29). Отметим при этом, что в ряде случаев оказался необходимым дополнительный учет колебаний температуры $T_{верх}$ для получения более качественных результатов прогнозирования при «*нестандартном*» поведении плотины – модель (3.30). В этом случае целесообразно совместное использование различных математических моделей.

На рис. 3.6–3.8 показаны изменения радиальных перемещений плотины и их прогнозных значений с использованием прогнозной модели (3.28) на этапах эксплуатации: 2008-2009 гг.; 2009-2010 гг.; 2010-2011 гг.

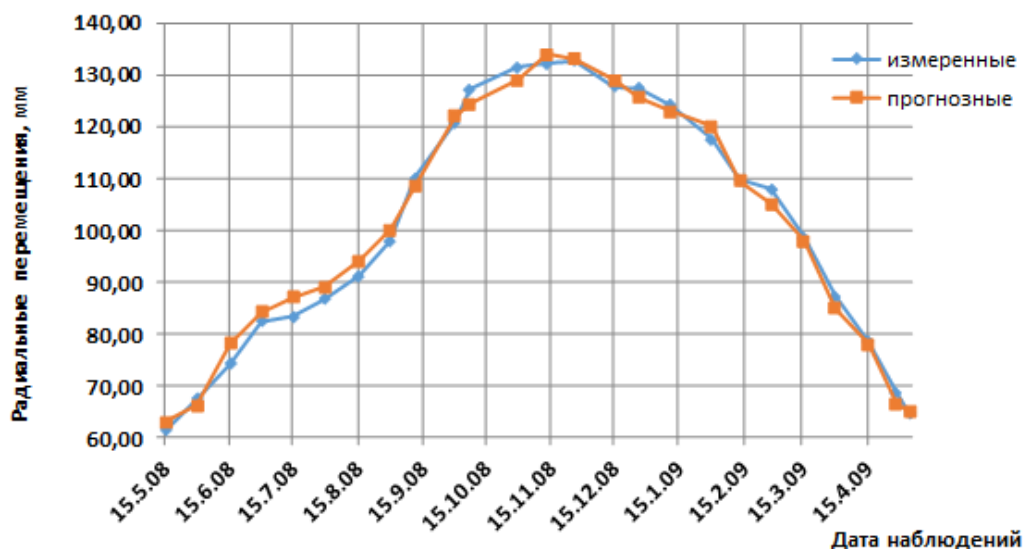


Рис. 3.6. Изменения радиальных перемещений плотины и ее прогнозных значений с использованием модели (3.28) на этапе эксплуатации: 2008-2009 гг.

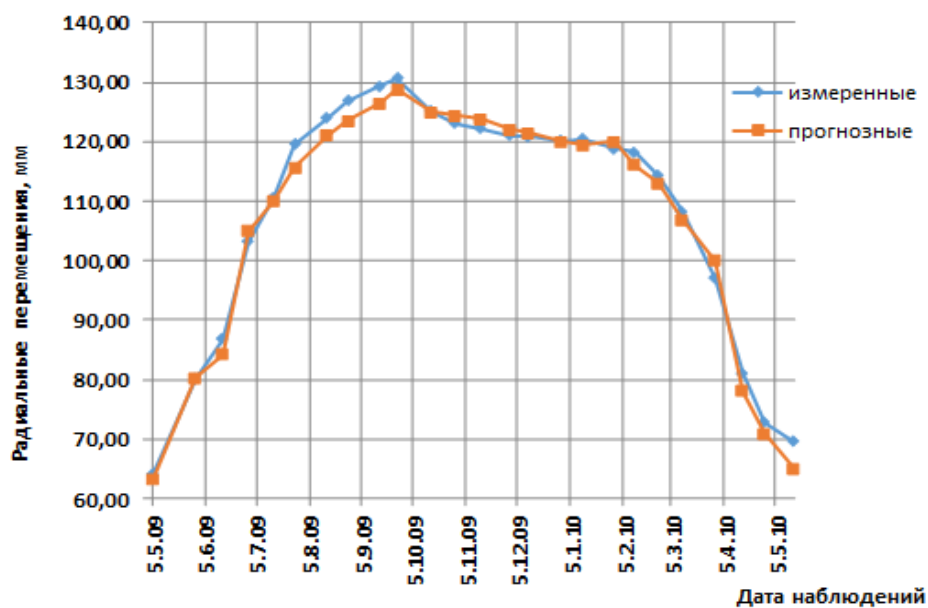


Рис. 3.7. Изменения радиальных перемещений плотины и ее прогнозных значений с использованием модели (3.28) на этапе эксплуатации: 2009-2010 гг.

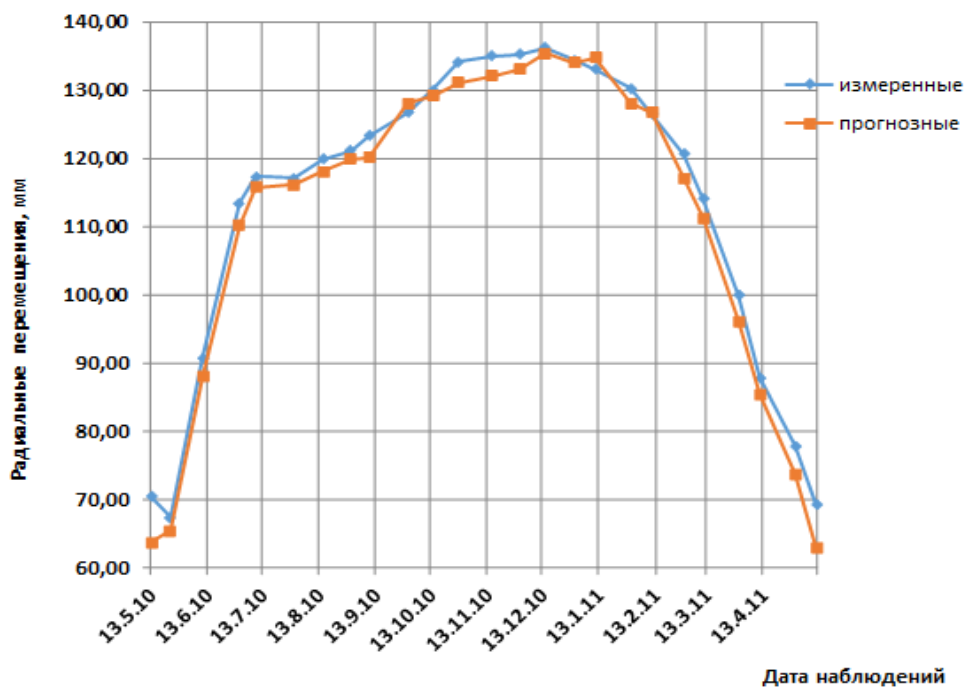


Рис.3.8. Изменения радиальных перемещений плотины и ее прогнозных значений с использованием модели (3.28) на этапе эксплуатации: 2010-2011 гг.

3.1.4. Примеры построения прогнозных математических моделей с использованием возможностей для численных расчетов прикладной программы MS EXCEL

Возможности прикладной программы MS Excel использовались для автоматизации следующих численных расчетов при построении прогнозных моделей: вычисления коэффициентов системы нормальных уравнений, вычисления автокорреляционной функции, вычисления остаточных ошибок и прогнозных значений радиальных перемещений контрольных базовых точек тела плотины (секция 33), считывания координат точек с графиков натуральных наблюдений.

На рис. 3.9 представлен фрагмент вычисления коэффициентов для решения системы нормальных уравнений с использованием исходных данных: изменение диагностического показателя (X – радиального перемещения гребня плотины – секция 33) и параметров-аргументов: U – уровень верхнего бьефа (УВБ) и температуры бетона в базовой точке $T_{низ}$ во времени.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
3	2	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	3	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	4	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	5	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	6	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	7	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	8	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	9	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	10	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	11	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	12	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	13	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	14	133,65	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	15	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	16	126,22	21,9915	4,04	-2,6558	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	17	121,95	17,7215	2,16	-4,5358	314,0529	20,5732	200,9895	-114,9378	-80,3838	526,82	4,0012	-18,1483	9,4129	16,0092	17,446	70,9066	
19	18	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	19	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	-14,1779	
21	20	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	21	91,48	-12,7485	-0,45	-7,1458	162,5233	51,0620	296,7646	76,8193	91,0976	511,88	-10,9388	78,1665	204,9806	119,6584	-10,128	139,4535	
23	22	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	23	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	24	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	25	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	26																	
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							U							
31						x_{k-1}^2	T_K^2	$\hat{x}_{k-1} x_K$	$\hat{x}_{k-1} T_K$	$\hat{x}_K T_K$			$T_K u_k$	$\hat{x}_{k-1} u_k$	u_K^2	$\hat{x}_K / k - 1$	$\hat{x}_K u_k$	
32																		

Рис. 3.9. Фрагмент вычисления коэффициентов для решения системы нормальных уравнений

ции для модели шумовой компоненты авторегрессии 2-го порядка.

ГНОЗНЫХ значений радиальных перемещений.

[illegible]

Рис. 3.10. Фрагмент вычисления автокорреляционной функции

ПРИМЕР Вычисление прогнозов для 2008-2009 годов [Режим совместимости] - Microsoft Excel

	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
	62,68	500,14	2,75		1,52		0,67		-0,45		-1,48				
3,0890	66,1	500,24	4,16	64,996	2,75	66,939	1,52	68,633	0,67	69,804	-0,45	71,347		5,5851	май15-08
0,4774	75,35	507,03	6,34	69,612	4,39	72,299	2,75	74,558	1,52	76,252	0,67	77,423		-1,9173	май30-08
-2,9449	91,83	516,61	9,48	82,256	6,34	86,581	4,39	89,267	2,75	91,526	1,52	93,221		-5,7542	июн15-08
-3,4087	101,83	520,48	10,69	91,199	9,48	92,866	6,34	97,191	4,39	99,877	2,75	102,136		-3,5124	июн30-08
-6,8576	102,68	522,58	12,45	87,864	10,69	90,289	9,48	91,956	6,34	96,281	4,39	98,967		-9,3309	июл15-08
-4,4277	107,32	525,78	13,8	98,782	12,45	100,642	10,69	103,066	9,48	104,733	6,34	109,058		-1,8329	июл30-08
-2,0321	114,27	527,27	14,41	103,659	13,8	104,499	12,45	106,359	10,69	108,783	9,48	110,450		0,3113	авг15-08
-1,2979	120	528,44	14,33	106,228	14,41	106,118	13,8	106,958	12,45	108,818	10,69	111,242		-0,5176	авг30-08
-1,3887	121,95	530,31	13,69	110,126	14,33	109,244	14,41	109,134	13,8	109,974	12,45	111,834		-1,3426	сен15-08
2,5729	127,8	534,37	12,61	125,939	13,69	124,452	14,33	123,570	14,41	123,460	13,8	124,300		5,9019	сен30-08
3,7377	131,95	535,67	11,37	129,525	12,61	127,817	13,69	126,330	14,33	125,448	14,41	125,338		4,4421	окт15-08
3,9436	134,39	536,56	10,2	132,616	11,01	131,500	12,61	129,296	13,69	127,809	14,33	126,927		3,7659	окт30-08
4,3524	135,48	536,17	9,23	133,915	10,2	132,579	11,01	131,463	12,61	129,259	13,69	127,772		4,3198	ноя15-08
3,4718	133,65	535,2	8	131,917	9,14	130,347	10,2	128,887	11,01	127,771	12,61	125,567		2,3596	ноя30-08
2,9261	131,7	533,28	6,49	130,049	7,61	128,506	9,14	126,398	10,2	124,938	11,01	123,822		2,1657	дек15-08
1,2854	126,22	530,58	4,76	124,551	6,49	122,168	7,61	120,625	9,14	118,517	10,2	117,057		-0,3097	дек30-08
0,2752	121,95	527,34	2,05	121,421	3,95	118,804	6,49	115,305	7,61	113,762	9,14	111,655		-0,6594	янв15-09
-1,8072	115,57	524,14	0,74	113,971	2,05	112,167	3,95	109,549	6,49	106,050	7,61	104,508		-3,5153	янв30-09
-2,6056	110,37	520,5	-1,1	109,404	0,74	106,869	2,05	105,065	3,95	102,447	6,49	98,949		-3,0843	фев15-09
-4,5855	101,86	518,83	-1,3	102,760	0,15	100,762	0,74	99,950	2,05	98,145	3,95	95,528		-5,9456	ф

радиальных перемещений

На рис. 3.12 представлен фрагмент работы автоматизированной программы для считывания координат точек с графиков исходных данных.

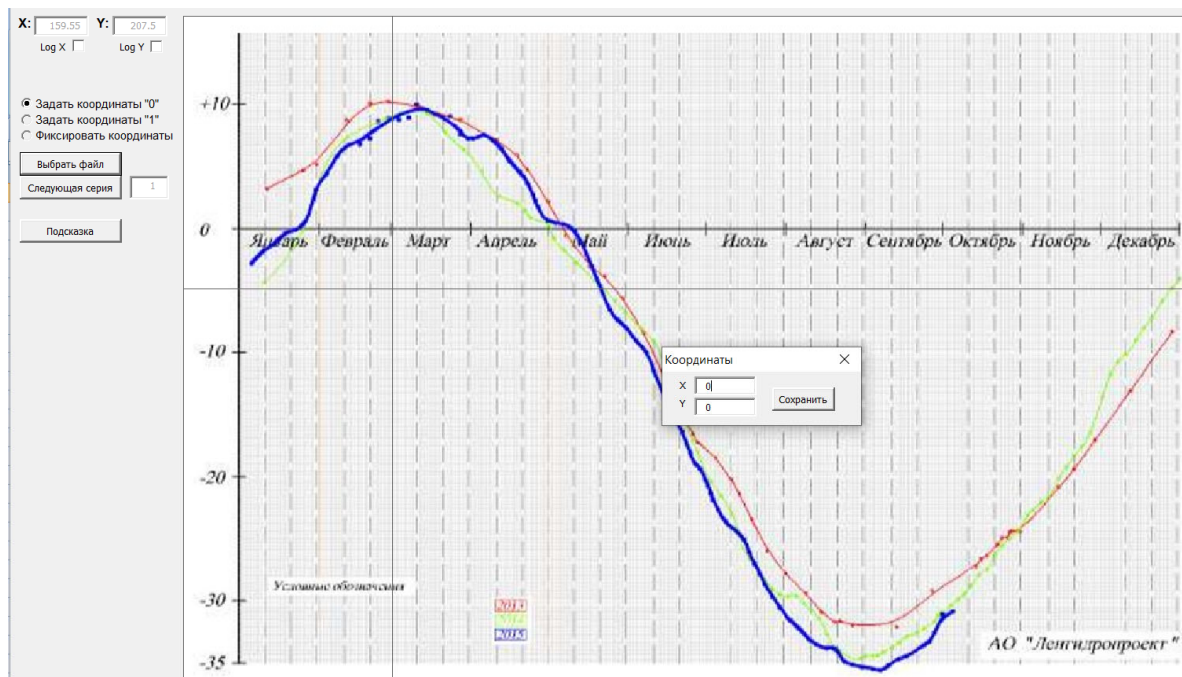


Рис. 3.12. Фрагмент работы автоматизированной программы для считывания координат точек с графиков

3.1.5. 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 [Кобелева, 2017]. 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 [Дурчева, Пучкова, Загрядский, 2000; Методика определения критериев..., 2001; Гордон, Затеев, Стефаненко, 2005; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Гордон, Скворцова, 2013].

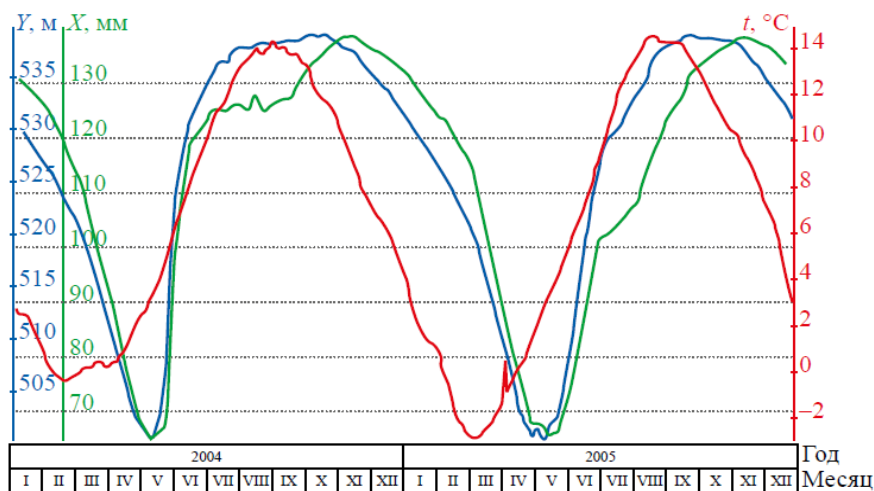
Процесс построения прогнозных моделей для изучения процесса перемещений высоких плотин, таких как Саяно-Шушенская ГЭС, необходимо начинать с тщательного изучения природы и структуры объекта исследования, чтобы правильно сориентироваться в характере проявления причинно-следственных связей, которые присущи 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 [Ивашиных, Соколов, Шульман, Юделевич, 2001; Толошинов, 2006; Léger P., Leclerc M., 2007; Александров, 2008; Khrapkov A. A., Tseitlin B. M., Scvortsova A. E., Vasilyev A., 2008; Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Костылев, 2013; Орехов, 2014; Кобелева, Хорошилов, 2015, 2016; Хорошилов, 2017, 2018], эксплуатация которых проходит как в **нормальных**, так и в **нестандартных** 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.

1. 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 фак-

торов (рис. 3.13) с целью изучения цикличности процесса, величин изменения воздействующих факторов и выходных параметров, монотонности и однородности исследуемого процесса и транспортного запаздывания.

2. Именно анализ графиков, которые характеризуют прогнозный фон [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Léger P., Leclerc M., 2007; Гуляев, Хорошилов, 2012, 2014; Гуляев, Хорошилов, Лисицкий, 2014] позволяет 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.



--- верхний бьеф; --- температура бетона (секция 33); --- радиальные перемещения

Рис. 3.13. Изменение во времени диагностического показателя (радиального перемещения гребня плотины) и параметров-аргументов: УВБ и температура бетона в базовой точке $T_{низ}$.

3. 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 натурных наблюдений (до 15 дней) в отличие от месячной цикличности. Ранее в таблице (3.5) были представлены результаты анализа значений остаточных ошибок для построенных моделей для одних и тех же основных воздействующих факторов, перемещений, одинакового периода основания прогноза и периода упреждения, но для различной дискретности натурных наблюдений.

4. 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.

5. 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 гармониче-

ский характер изменений, например, с использованием рисунка (3.13). 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 (рис. 3.13) изменений основных воздействующих факторов и перемещений гребня плотины свидетельствуют о том, что величина инерционного запаздывания не превышает 2-х месяцев. В тоже время анализ технической литературы позволил выявить, что прогнозную модель на основе звена 2-го порядка рекомендуется строить в тех случаях, когда инерционное запаздывание сезонных процессов превышает 3 месяца, вводя при необходимости транспортное запаздывание [Гуляев, Хорошилов, 2012, 2014; Кобелева, Хорошилов, 2015, 2016; Хорошилов, 2017, 2018].

6. 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» [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Léger P., Leclerc M., 2007; Александров, 2008; Вульфович, 2013; Вульфович, Потехин, 2017]. Имеются также и другие подобные связи между основными воздействующими факторами [Perner F., Obernhuber P., 2010; Храпков, Скворцова, Костылев, Щерба, 2011; Kostylev V.S., 2013; Mata, J., 2014], 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 по-

казано в работах авторов для декоррелирующей модели 1-го порядка [Кобелева, Хорошилов, 2015, 2016]. 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.

7. Окончательный этап разработки прогнозной модели заключается в анализе 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, возможному транспортному запаздыванию и выбору периода основания прогноза, которые наиболее адекватно описывают исследуемый деформационный процесс.

8. Отметим, что количество циклов наблюдений N , выполненных на периоде основания прогноза, достаточно свести при необходимости к минимуму, достаточному для решения системы [Гуляев, Хорошилов, 2014]; 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 [Гуляев, 2008].

3.2. Прогнозные математические модели для плотины СШ ГЭС на этапах эксплуатации 2008–2009, 2009–2010, 2010–2011, 2011–2012 и 2013–2016 гг.

В процессе эксплуатации плотины Саяно-Шушенской ГЭС воздействие температурного фактора является вторым по значимости после гидростатического давления; при этом его воздействие на сооружение носит разнонаправленный характер. В зимнее время года в результате этого воздействия плотина

наклоняется в сторону нижнего бьефа, т.е. в ту же сторону, как и от воздействия гидростатической нагрузки, что не ведет к ухудшению напряженного состояния тела плотины вследствие зимней «сработки» водохранилища [Вульфович, Гордон, Стефаненко, 2012; Gaziev E.G., 2012; Savich A.I., Il'in M.M., Elkin V.P., Rechiyskii V.I., Basova A.B., 2013; Kostylev V.S., 2013]. И, наоборот, в летний период за счет прогрева низовой грани плотина наклоняется в направлении противоположном действию гидростатической нагрузки. А это уже несет определенную опасность для отремонтированных зон плотины в результате нарушения установленного определенного баланса соответствующих значений температурной и гидростатической составляющих перемещений в периоды заполнения водохранилища (май-сентябрь) и его начальной сработки (вторая половина сентября-октября). Выявить составляющие этих перемещений возможно расчетным путем, например, на основе конечно-элементного анализа состояния сооружения с использованием программного комплекса «Ansys» в процессе построения температурного поля плотины. Так, в работе [Вульфович, Потехин, 2017] на основе подобного анализа за периоды работы плотины с 2004 по 2015 годы были выделены: *благоприятный* (теплый) в температурном отношении год; *средний* и *неблагоприятный* (холодный) года. Следует отметить при этом, что величины перемещений для температурных составляющих могут достигать относительно средних значений до 5 мм для холодного года и до 3,5 мм для теплого года, а это эквивалентно изменению величины гидростатического напора на 1,5 и 1,0 м соответственно. Вследствие вышесказанного имеет смысл с целью устранения угрозы нарушения целостности отремонтированных зон тела плотины и возможности появления новых трещин снижать уровень гидростатического напора в зимний период, и допускать его повышение в летний период работы сооружения, при этом тщательно контролируя величину перемещения гребня плотины. Подобные рекомендации были положены в основу регулирования диспетчерского графика работы водохранилища при разработке Правил Использования Водных Ресурсов (ПИВР) Саяно-Шушенской ГЭС [Вульфович Н. А., Поте-

хин Л. П., 2017]. Ранее в работах [Кобелева, Хорошилов, 2015, 2016] мы интерпретировали данное обстоятельство как работу сооружения в *штатном* (средний в температурном отношении год) и *нештатном* режимах работы (теплый и холодный годы). Это позволяло нам при прогнозировании перемещений тела плотины вводить поправку в виде транспортного запаздывания в конечные результаты прогнозирования.

В работах [Хорошилов, Кобелева, Гуляев, 2017; Khoroshilov V. S., 2018] нами было доказано, что наиболее удачными для прогнозирования оказались математические модели с двумя входными воздействующими факторами 2-го типа (1-го и 2-го порядка) и модель 3-го типа с декорреляцией этих воздействий с последующим введением транспортного запаздывания на этапе окончательного прогнозирования. Ряд этих прогнозных математических моделей дают неплохие результаты прогнозирования. Однако, корректное прогнозирование перемещений контролируемых точек тела плотины при различных неблагоприятных температурных условиях эксплуатации сооружения (теплый и аномально холодный в температурном отношении годы), а также в условиях аварийных ситуаций существенно затруднено в силу того, что на величину перемещения оказывают дополнительное воздействие факторы, учесть которые затруднительно. Кроме того, влияние температурного фактора на перемещение плотины является нелинейным и носит эффект запаздывания, в то же время влияние мультиколлинеарности между воздействующими факторами (изменение гидростатического давления и изменение температуры бетона тела плотины) дополнительно вносит определенные неясности и трудности в окончательные результаты прогнозирования. Поэтому дальнейшее совершенствование прогнозных математических моделей в целях обеспечения надежности и безопасности функционирования крупных плотин является одной из важных задач мониторинга для выявления аномальных результатов в значениях наиболее значимого, с точки зрения безопасности эксплуатации плотины, диагностируемого параметра – ее радиального перемещения. Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд следующих поставленных задач:

а) исключить влияние корреляционной зависимости между входными воздействующими факторами путем раздельного ввода их в модель;

б) учесть продолжительность инерционного запаздывания реакции плотины на воздействующие факторы в результате введения поправки в виде транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования;

в) существенно повысить точность прогнозирования.

Математические модели с двумя входными воздействующими факторами 2-го типа (1-го и 2-го порядка) и модель 3-го типа с декорреляцией этих воздействий для последующих исследований представлены ниже [Хорошилов, Кобелева, Гуляев, 2017; Khoroshilov V. S., 2018].

Динамические модели 2-го типа с двумя входными воздействующими факторами имеют вид $x(U_k, T_k)$:

1-го порядка

$$x_k = \phi x_{k-1} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k; \quad (3.32)$$

2-го порядка

$$x_k = \phi_1 x_{k-1} + \phi_2 x_{k-2} + \beta_1 U_k + \beta_2 T_k + \gamma \omega_k. \quad (3.33)$$

Динамическая модель 3-го типа с декорреляцией входных воздействующих факторов имеют вид $\Delta x(\Delta U_k, T_k)$:

$$\begin{aligned} U_k &= \phi_1 U_{k-1} + \beta_1 T_k + U_0, \\ x_k &= \phi_2 x_{k-1} + \beta_2 T_k + x_0, \\ \Delta x_k &= \phi_3 \Delta x_{k-1} + \beta_3 \Delta U_k + \Delta x_0 + \gamma w_k. \end{aligned} \quad (3.34)$$

Отметим, что на этапе структурной идентификации модели существенное влияние оказывает выбор входных воздействий, дискретность наблюдений и как результат этого влияния – это величины значений остаточных ошибок шумовой

компоненты между результатами измеренных и аппроксимированных по модели значений перемещений. По ним оценивается их разброс с использованием средней квадратической ошибки m , а в последующем строятся графики автокорреляционной функции. В процессе выполненных исследований для построения всех типов вышеуказанных математических моделей были использованы входные воздействия в следующих сочетаниях:

- U_k (гидростатическое давление) и $T_{низ.}$ (температура бетона тела плотины в нижней базовой точке), как результаты натурных наблюдений;
- U_k и $\Delta T_{расч.}$ (температурная составляющая перемещений, полученная на основе конечно-элементной модели);
- $\Delta U_{расч.}$ (гидростатическая составляющая перемещений) и $\Delta T_{расч.}$, полученные на основе конечно-элементной модели.

Выбранный нами 2013 год для построения прогнозных математических моделей в качестве периода основания прогноза характеризуется как «*средний*» в температурном отношении год.

Ниже представлена первая группа математических моделей 2-го типа *1-го* порядка с двумя входными воздействиями $x(U_k, T_k)$ и дискретностью наблюдений каждые 3 дня:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,3241x_{k-1} + 1,7679U_k - 1,9296T_{низ.} - 836,837 + 0,6864\omega_k; \\ \omega_k &= 0,6651\omega_{k-1} + 0,0779\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,7100x_{k-1} + 0,7504U_k + 0,2769\Delta T_{расч.} - 357,832 + 0,4969\omega_k; \\ \omega_k &= 1,1820\omega_{k-1} - 0,2777\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,2028x_{k-1} + 0,8036\Delta U_{расч.} + 0,7710\Delta T_{расч.} - 3,628 + 0,1431\omega_k; \\ \omega_k &= 1,8780\omega_{k-1} - 0,8926\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.37)$$

Представленные графики автокорреляционной функции, построенные по рассчитанным значениям коэффициентов корреляции на основании анализа временных рядов, позволяют на данном этапе сделать следующие предварительные выводы.

Во-первых, вид автокорреляционной функции для моделей (3.35) и (3.36) свидетельствует о том (рис. 3.14), что выбор сочетаний входных воздействий в виде сочетания воздействующих факторов $(U_k, T_{низ.})$ и $(U_k, \Delta T_{расч.})$ позволил осуществить качественную структурную идентификацию строящихся моделей; при этом сочетание натурных наблюдений гидростатического давления с расчетными значениями температурной составляющей перемещений не ухудшили существенно качество построенной модели. Выбор в качестве одного из входных воздействий расчетных значений температурной составляющей перемещений свидетельствует о том, что каких-либо значимых дополнительных воздействий на данный входной параметр при построении модели не наблюдается.

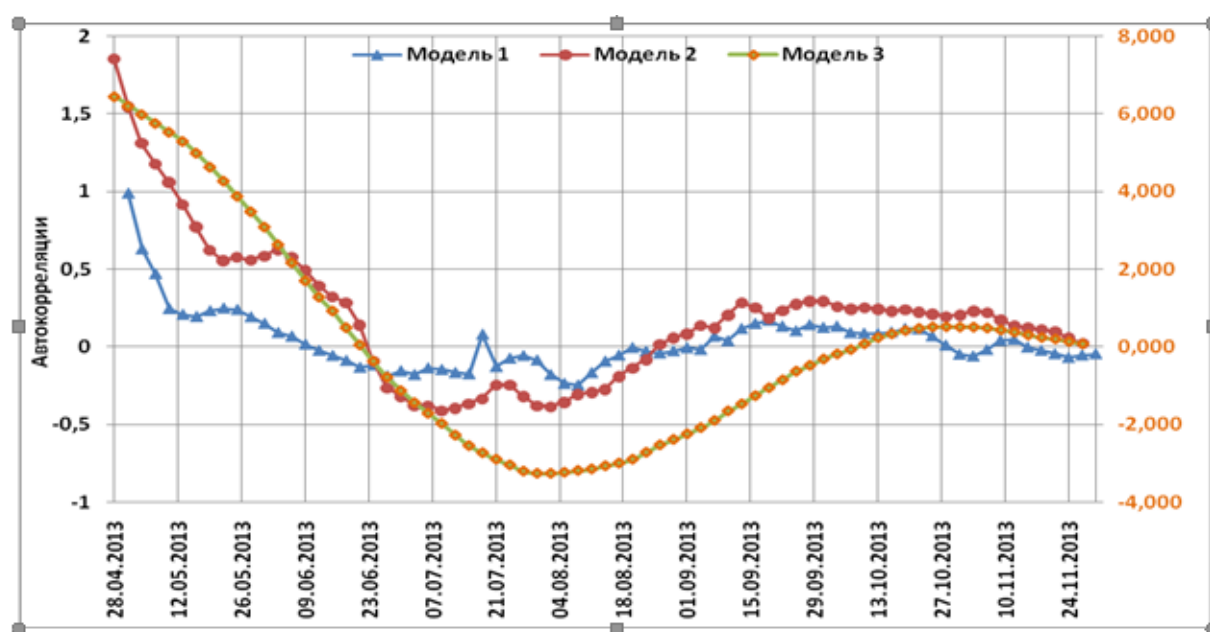


Рис. 3.14. Вид автокорреляционных функций для первой группы моделей (модель 2-го типа; 1-го порядка)

Во-вторых, выбор сочетаний входных воздействующих факторов в виде расчетных значений гидростатической и температурной составляющих $(\Delta U_{расч.}, \Delta T_{расч.})$ существенно ухудшило качество построенной модели (3.37). Это свидетельствует о том, что входной параметр – расчетные значения гидростатической составляющей – является в определенной степени зависимым параметром для данного типа математической модели, т.е. на него оказывают дополнительное влияние воздействия, связанные с напряженно-деформированным состоянием тела плотины, и которые с помощью данной модели возможно учесть в последующем лишь частично за счет введения в прогнозную модель шумовой компоненты.

Вторая группа математических моделей 2-го типа с двумя входными воздействиями 2-го порядка $x(U_k, T_k)$ получила следующий вид:

$$\begin{aligned} x_k &= 0,4305x_{k-1} - 0,0808x_{k-2} + 1,7081U_k - 1,8268T_{низ.} - \\ &- 809,273 + 0,5720\omega_k; \\ \omega_k &= 0,7447\omega_{k-1} + 0,0366\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.38)$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,9990x_{k-1} - 0,2428x_{k-2} + 0,6419U_k + 0,2313\Delta T_{расч.} - \\ &- 791,491 + 0,5950\omega_k; \\ \omega_k &= 0,7210\omega_{k-1} + 0,1450\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} x_k &= 0,8758x_{k-1} - 0,2096x_{k-2} + 0,3693\Delta U_{расч.} + 0,4367\Delta T_{расч.} + \\ &+ 21,823 + 0,7439\omega_k; \\ \omega_k &= 0,8496\omega_{k-1} + 0,0486\omega_{k-2} + \xi_k. \end{aligned} \quad (3.40)$$

В отношении данной группы моделей можно констатировать следующее. Во-первых, качество структурной идентификации для всех построенных моделей улучшилось в сравнении с первой группой математических моделей, о чем

свидетельствуют рассчитанные значения средних квадратических ошибок по остаточным ошибкам моделирования и графики автокорреляционных функций (рис. 3.15), но при этом несколько возросла сложность их построения.

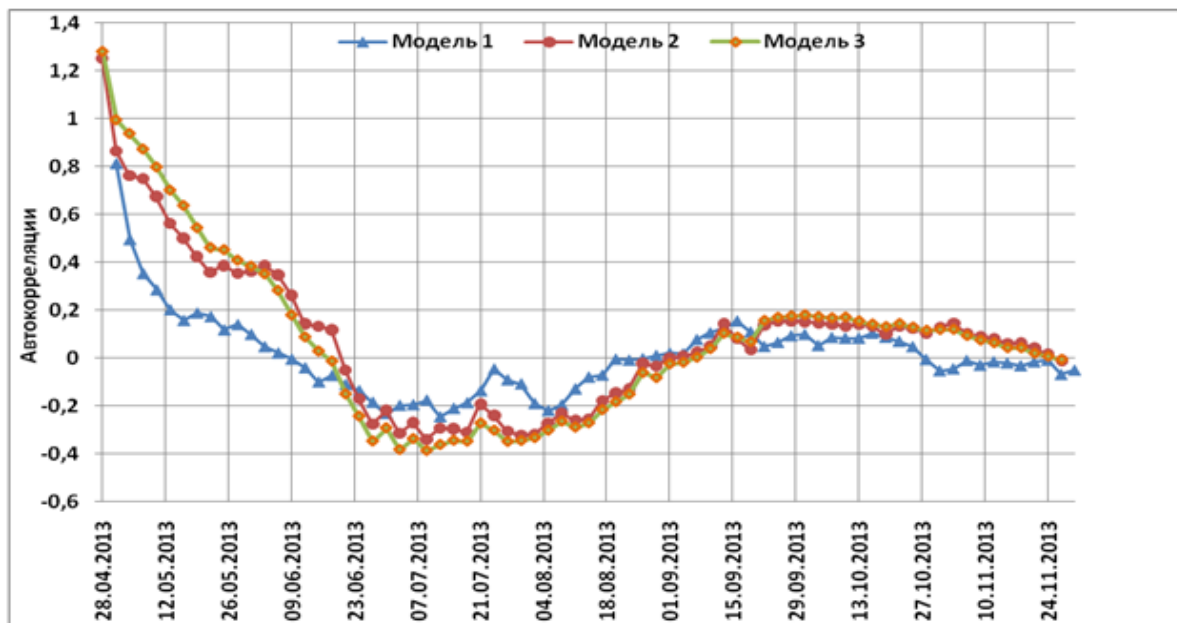


Рис. 3.15. Вид автокорреляционных функций для второй группы моделей (модель 2-го типа; 2-го порядка)

Во-вторых, тот же самый выбор сочетания натуральных наблюдений гидростатического давления с расчетными значениями температурной составляющей перемещений ($U_k, \Delta T_{расч.}$) повысил качество построенной модели (3.39) в сравнении с моделями первой группы (3.35-3.37). И, наконец, в-третьих, сочетание входных воздействий в виде расчетных значений гидростатической и температурной составляющих перемещений ($\Delta U_{расч.}, \Delta T_{расч.}$) понизило качество построенной модели (3.40) в сравнении с моделями (3.38) и (3.39).

Построенные математические модели 3-го типа с декорреляцией входных воздействий $\Delta x(\Delta U_k, T_k)$ путем их последовательного ввода в модель и дискретностью наблюдений через каждые 3 дня представлены ниже:

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,8974U_{k-1} + 0,1578T_{\text{ннз.}} + 52,747; \\
x_k &= 0,9342x_{k-1} + 0,1323T_{\text{ннз.}} + 6,432; \\
\Delta x_k &= 0,4210\Delta x_{k-1} + 1,2924\Delta U_k - 0,059 + 0,6197\omega_k; \\
\omega_k &= 0,1428\omega_{k-1} + 0,2383\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.41}$$

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,8866U_{k-1} - 0,0581\Delta T_{\text{расч.}} + 61,299; \\
x_k &= 0,9142x_{k-1} - 0,0812\Delta T_{\text{расч.}} + 8,552; \\
\Delta x_k &= 0,4238\Delta x_{k-1} + 1,3320\Delta U_k - 0,087 + 0,6190\omega_k; \\
\omega_k &= 0,1421\omega_{k-1} + 0,2471\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.42}$$

$$\begin{aligned}
U_k &= 0,8822U_{k-1(\text{расч.})} - 0,1993\Delta T_{\text{расч.}} + 4,476; \\
x_k &= 0,9140x_{k-1} - 0,0808\Delta T_{\text{расч.}} + 2,553; \\
\Delta x_k &= 0,4772\Delta x_{k-1} + 0,4033\Delta U_{k(\text{расч.})} + 0,024 + 0,4826\omega_k; \\
\omega_k &= 0,5286\omega_{k-1} + 0,0910\omega_{k-2} + \xi_k.
\end{aligned} \tag{3.43}$$

Для данной группы математических моделей можно констатировать следующее. Качество структурной идентификации для всех построенных моделей данной группы существенно улучшилось в сравнении с первой и второй группами математических моделей, о чем свидетельствует вид автокорреляционных функций, построенных по остаточным ошибкам моделирования (рис. 3.16). В тоже время на графике автокорреляционных функций видно резкое падение коррелограммы на начальной стадии и постепенное уменьшение коэффициентов корреляции в виде асимптотического приближения к нулю без каких-либо выраженных локальных трендов, что свидетельствует о снижении эффекта мультиколлениарности между входными воздействующими факторами. На наш взгляд это вызвано тем, что на этапе структурной идентификации модели был осуществлен корректный выбор типа математической модели, входных воздействующих факторов и дискретности результатов наблюдений через каждые 3 дня

с возможностью последовательно ввода основных входных воздействующих факторов в модель. Данное обстоятельство дает возможность использования математической модели (3.41) для прогнозирования перемещений тела плотины по результатам натурных наблюдений при штатных ситуациях работы плотины (средний в температурном отношении год). В тоже время имеется возможность применения прогнозной модели (3.42) для прогнозирования при нештатных ситуациях (холодный и теплый годы) с использованием результатов натурных наблюдений и расчетных значений составляющих перемещений или же модели (3.43) с использованием расчетных значений составляющих перемещений (гидростатической и температурной).

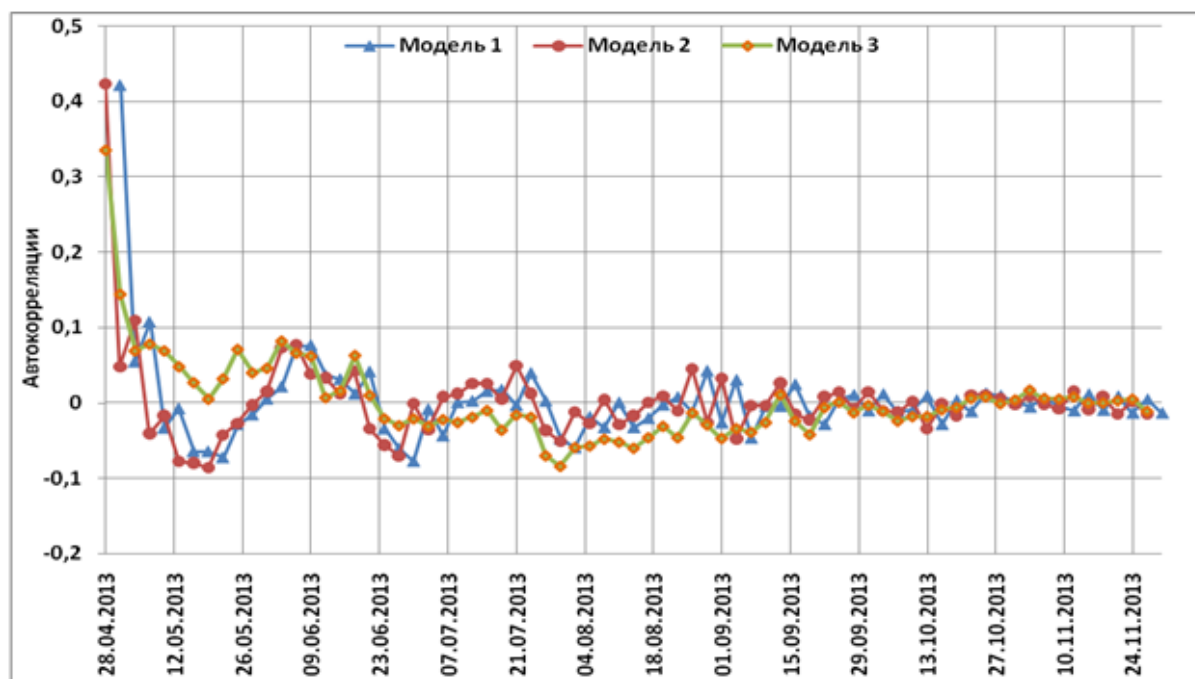


Рис. 3.16. Вид автокорреляционных функций для третьей группы моделей (модель 3-го типа; декорреляция входных воздействий)

В табл. 3.7 представлены результаты значений средних квадратических ошибок m , рассчитанных по результатам разброса между измеренными и ап-

проксимированными перемещениями по всем типам построенных моделям. Их значения явно свидетельствуют о преимуществе математических моделей с декорреляцией входных воздействующих факторов для последующего прогнозирования.

Таблица 3.7

Средние квадратические ошибки моделирования

Тип модели	2-го типа; 1-го порядка $x(U_k, T_k)$			2-го типа; 2-го порядка: $x(U_k, T_k)$			3-го типа; с декорреляцией $\Delta x(\Delta U_k, \Delta T_k)$		
m , мм	0,99	1,36	2,55	0,90	1,12	1,13	0,61	0,65	0,58

Порядок модели авторегрессии для описания шумовой компоненты был определен на основе анализа построенных графиков автокорреляционных функций для всех строящихся моделей. Все графики, представленные на рис. 3.14–3.16, свидетельствует о том, что описание процесса шума следует производить моделями авторегрессии 2-го порядка.

Для последующего прогнозирования поведения плотины СШГЭС была использована построенная прогнозная модель 3-го типа с декорреляцией входных воздействий (3.42) с дискретностью наблюдений через каждые 3 дня, которая имеет вид:

$$\begin{aligned}
 U_k &= 0,8866U_{k-1} - 0,0581\Delta T_{расч.} + 61,299; \\
 x_k &= 0,9142x_{k-1} - 0,0812\Delta T_{расч.} + 8,552; \\
 \Delta x_k &= 0,4238\Delta x_{k-1} + 1,3320\Delta U_k - 0,087 + 0,6190\omega_k; \\
 \omega_k &= 0,1421\omega_{k-1} + 0,2471\omega_{k-2} + \xi_k.
 \end{aligned}$$

В качестве входных воздействующих факторов были использованы: U_k – гидростатическое давление (уровень верхнего бьефа, как результаты натурных

наблюдений) и $\Delta T_{расч.}$ – температурная составляющая перемещений (полученная на основе конечно-элементной модели).

Было выполнено прогнозирование для различных временных этапов эксплуатации плотины с 2008 по 2012 годы.

Отметим при этом следующее. Выполненные ранее расчеты по прогнозированию перемещений контролируемых точек плотины СШГЭС после аварии 2009 года с применением прогнозных моделей [Хорошилов, Кобелева, Гуляев, 2017; Khoroshilov V.S., 2018] позволили получить неплохие результаты прогнозирования. Однако при этом пришлось строить достаточно сложные по своей структуре математические модели. При этом, такой воздействующий фактор как температура тела бетона в верхней базовой точке практически учитывался только при расчетах по моделям, а ввести его в качестве поправки в окончательные результаты прогнозирования в виде транспортного запаздывания не представлялось возможным. Это объяснялось тем, что данный фактор по отношению к другому температурному фактору (температура бетона тела плотины в нижней базовой точке) имеет короткопериодический характер.

В процессе выполненных настоящих исследований при выборе в качестве входных воздействий результатов натурных наблюдений (гидростатическое давление) и расчетных значений температурной составляющей перемещений ($U_k, \Delta T_{расч.}$) с дискретностью данных через каждые 3 дня удалось на данном этапе исследований построить более качественные прогнозные модели, а результаты прогнозирования с использованием модели (3.42) в сравнении с результатами предыдущих исследований [Хорошилов, Кобелева, Гуляев, 2017; Khoroshilov V.S., 2018] при изучении поведения плотины до и после аварии 2009 года, а именно, в 2008-2009, 2009-2010, 2010-2011, 2011-2012 годы, обеспечили получение более точных результатов прогнозирования с ошибкой 1,4-1,8 мм (табл. 3.8), что также отражено на графиках (рис. 3.17–3.20).

Средние квадратические ошибки прогнозирования на 2008-2012 годы
с использованием математической модели (3.42)

Год прогноза	2008-2009	2009-2010	2010-2011	2011-2012
m , мм	1,40	1,54	1,80	1,68

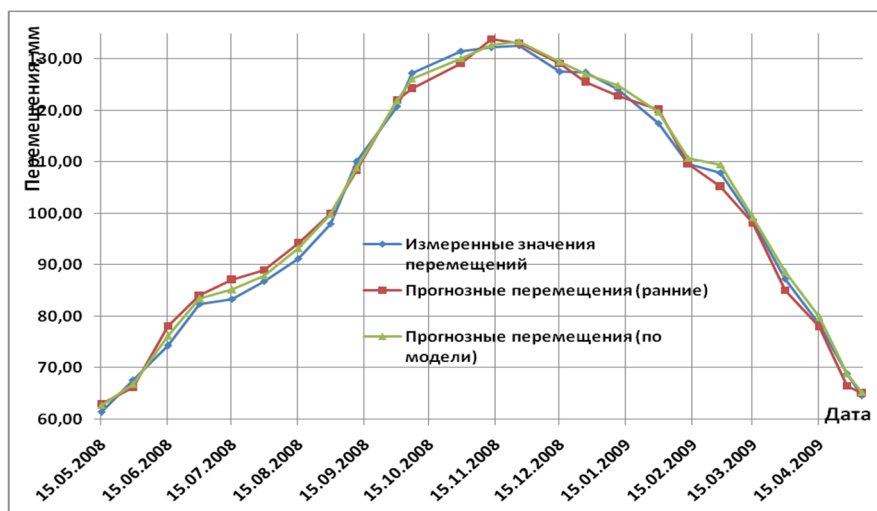


Рис. 3.17. График изменения радиальных перемещений и их прогнозных значений по модели (3.42) и ранее известных результатов прогнозирования для этапа эксплуатации плотины за 2008-2009 годы

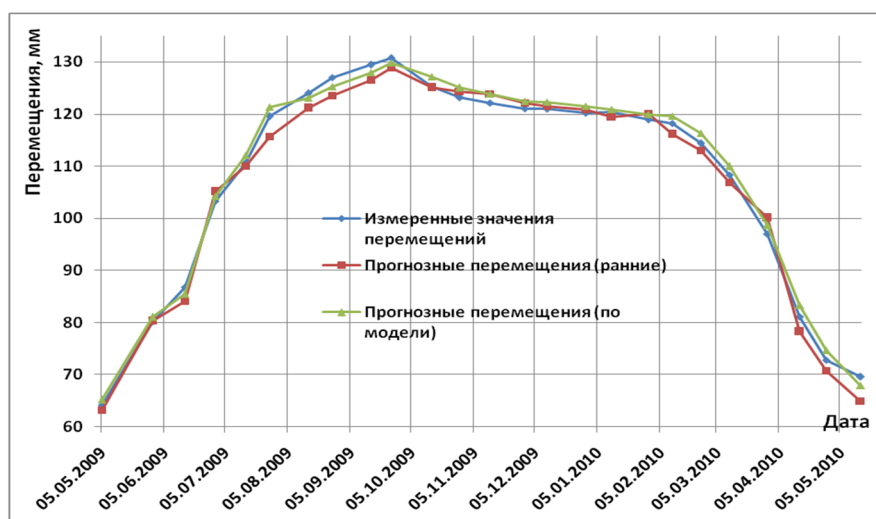


Рис.3.18. График изменения радиальных перемещений и их прогнозных значений по модели (3.42) и ранее известных результатов прогнозирования для этапа эксплуатации плотины за 2009-2010 годы

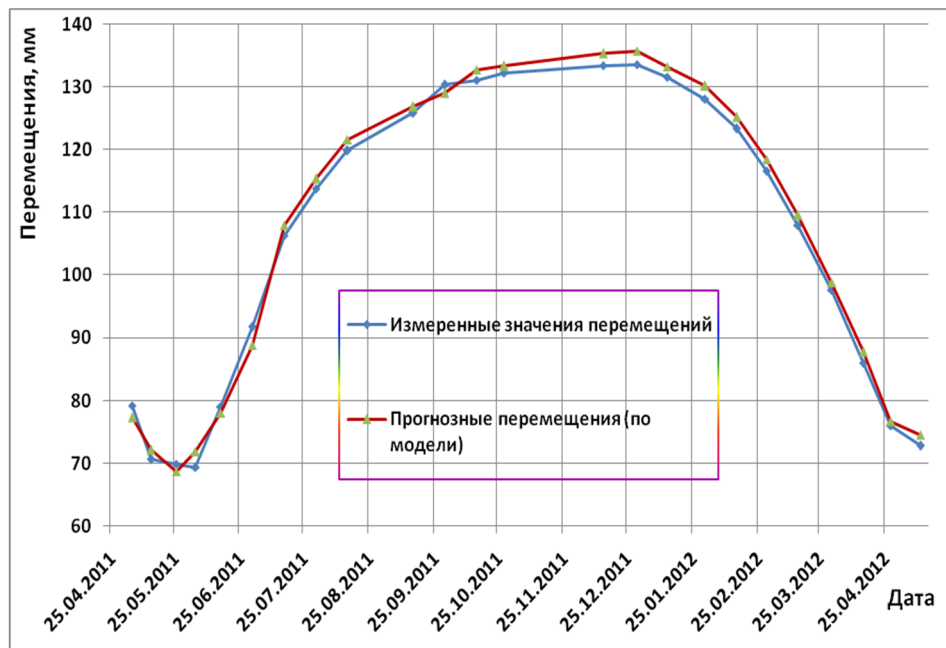


Рис. 3.19. График изменения радиальных перемещений и их прогнозных значений по модели (3.42) для этапа эксплуатации плотины за 2010-2011 годы

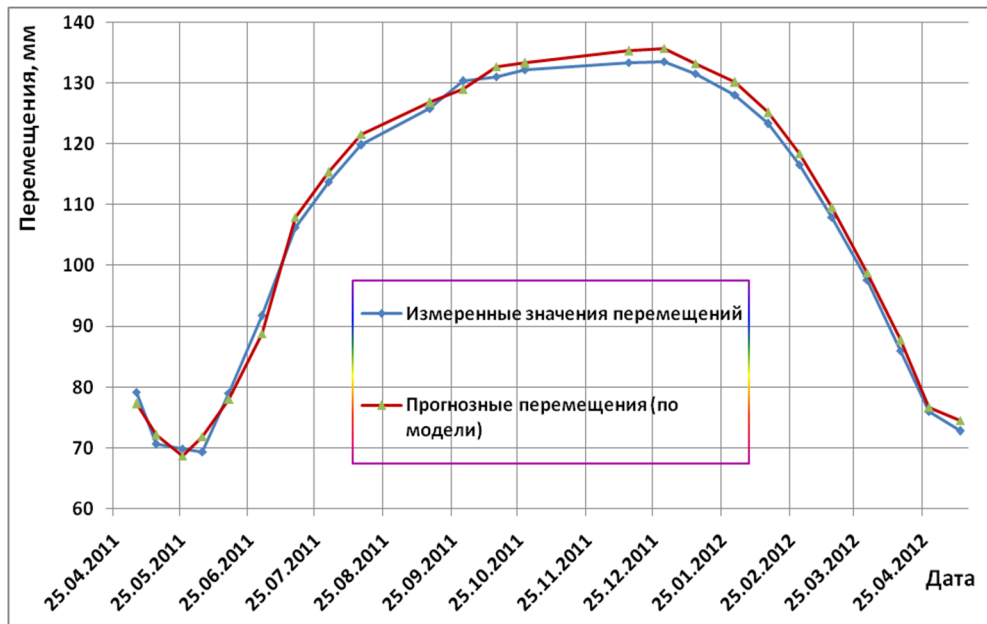


Рис. 3.20. График изменения радиальных перемещений и их прогнозных значений по модели (3.42) для этапа эксплуатации плотины за 2011-2012 годы

Представленные данные в табл. 3.8 свидетельствуют о том, что для выбранных сочетаний входных воздействующих факторов построенные прогнозные модели третьей группы с декорреляцией входных воздействий можно применять для прогнозирования перемещений плотины практически при всех возможных штатных и нештатных ситуациях (теплого, среднего и холодного годов), а также в условиях аварийных ситуаций. Очевидно это можно объяснить тем, что входное воздействие в виде расчетных значений температурной составляющей перемещений в достаточно полной мере отражает изменение температуры по всему телу плотины, включая и ее изменения в нижней и верхней базовых точках. А применение такого методического приема как введение транспортного запаздывания [Khoroshilov V.S., 2018] в окончательные результаты прогнозирования позволило получить более точные окончательные результаты.

Отметим также, что такой важный параметр как дискретность математической модели через каждые 3 дня, который характеризует цикличность натурных наблюдений, при условии охвата основных закономерностей развития исследуемого процесса деформации плотины и изменений основных воздействующих факторов, позволил построить достаточно корректные с точки зрения структурной идентификации прогнозные математические модели.

На рисунке 3.21 представлен график результатов измеренных и прогнозных значений составляющих радиальных перемещений контролируемых точек плотины по модели (3.42) для периода эксплуатации в 2016 году. Здесь же представлен график прогнозных значений составляющих радиальных перемещений, рассчитанных по гидростатической и температурной составляющим перемещений на основе регрессионной модели по данным из работы [Вульфович, Потехин, 2017]. Вычисленная средняя квадратическая погрешность, полученная по разностям между прогнозными (по модели 3.42) и измеренными значениями перемещений составила величину 1,5 мм. Достаточно очевидно преимущество применения для целей прогнозирования построенной математической модели.

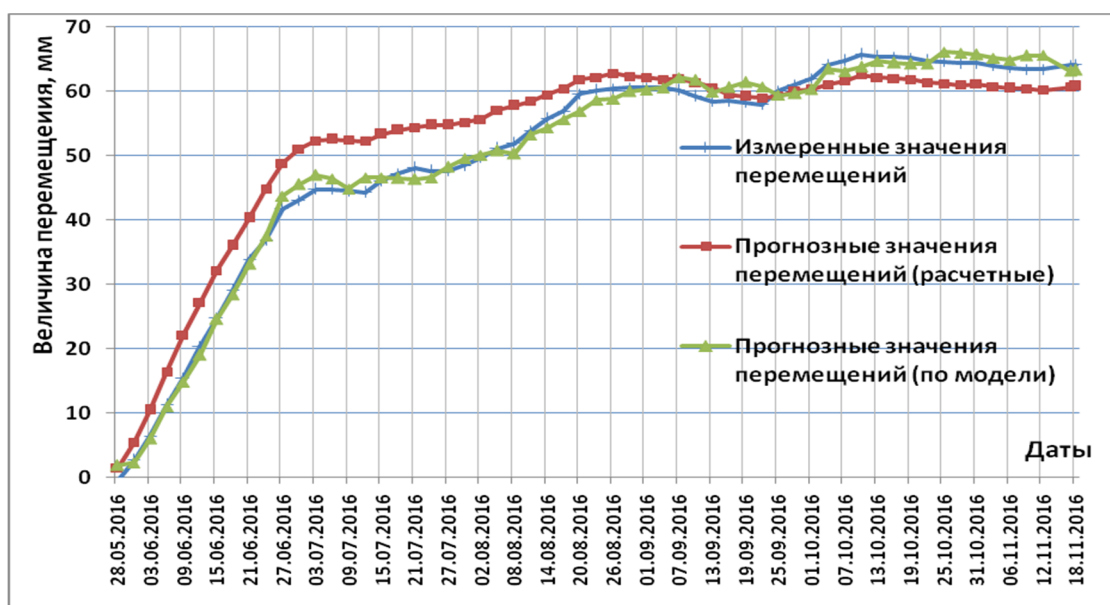


Рис. 3.21. График изменения измеренных составляющих перемещений и их прогнозных значений, рассчитанных для этапа эксплуатации плотины в 2016 году по модели (3.42)

Представленные результаты исследований свидетельствуют о том, что все типы представленных моделей можно использовать для прогнозирования перемещений плотины. При этом важное значение имеет как выбор исходных данных в качестве воздействующих факторов, так и тип математической модели. Наиболее удачной (с точки зрения точности прогнозирования) в этом плане оказалась модель с декорреляцией входных воздействующих факторов, которую можно применять для прогнозирования перемещений плотины практически при всех возможных штатных и нештатных ситуациях (теплого, среднего и холодного годов), а также в условиях аварийных ситуаций. Очевидно при этом предположить, что входное воздействие в виде расчетных значений температурной составляющей перемещений в достаточно полной мере отражает изменение температуры по всему телу плотины, включая и ее изменения в нижней и верхней базовых точках. А возможность применение такого методического приема как введение транспортного запаздывания на заключительном этапе прогнозирования позволило получить более точные окончательные результаты, что и представлено на рис. 3.17–3.20.

Отметим следующее.

1. Выполненный анализ величин значений остаточных ошибок с использованием для оценивания средней квадратической ошибки m при построении математических моделей различных типов позволил выявить наиболее качественно сконструированные математические модели; ими оказались математические модели третьей группы с декорреляцией входных воздействующих факторов.

2. Корректный выбор входных воздействующих факторов и типа математической модели на этапе структурной идентификации обеспечил для данной группы математических моделей возможность их применения для прогнозирования при различных температурных условиях работы сооружения (средний, теплый и холодный в температурном отношении годы), включая и условия аварийных ситуаций.

3. Средняя квадратическая ошибка прогнозирования на 20016 год на основе прогнозной математической модели (3.42) с введением транспортного запаздывания в окончательные результаты прогнозирования при сравнении с результатами измеренных радиальных перемещений составила 1,5 мм, что свидетельствует о высокой точности прогноза. Имеется реальная возможность обеспечить безопасность эксплуатации плотины на более высоком уровне.

4. Выполненные расчеты на основе прогнозной модели (3.42) с использованием ранее использованных данных о воздействующих факторах за 2008-2012 годы позволили выполнить прогнозирование на эти годы и сравнить полученные данные с результатами ранее выполненного прогнозирования. В итоге результаты вновь выполненного прогнозирования с использованием модели (3.42) показали более высокую точность с ранее известными, что свидетельствует о возможности более широкого применения разработанных прогнозных моделей при исследованиях состояния высоконапорных плотин в процессе их эксплуатации и предотвращения аварийных ситуаций.

5. Кроме того, на основе представленных прогнозных математических моделей возможно решение и обратной задачи. Перемещение плотины по отноше-

нию к входным воздействующим факторам имеет эффект запаздывания (от нескольких дней до месяца и более); в силу этого по измеренным значениям температуры и радиального перемещения на реальный момент времени можно выполнить краткосрочный прогноз для выбора наиболее безопасного уровня гидростатического давления при допустимом радиальном перемещении плотины (в данных условий эксплуатации), и что и планируется представить в дальнейших исследованиях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В представленной монографии изложены основные принципы и методика прогнозирования наблюдаемых геодезическими методами процессов горизонтальных перемещений деформационных знаков, заложенных в сооружения ГЭС. Основные положения методики прогнозирования основываются на положениях прогностики, на теории динамических систем, теории случайных функций, теории статистического оценивания.

Выявление степени влияния различных воздействующих факторов на перемещения контролируемых точек тела плотины можно осуществить только по результатам натурных наблюдений, которые должны охватывать как периоды строительства, так и наполнения водохранилища и последующей эксплуатации. Эти результаты натурных наблюдений могут включать в себя геодезические данные о горизонтальных перемещениях, количественные данные о величине возрастающей нагрузки на основание, об изменении напора воды, температурных и др. условий, что позволяет строить на основе геодезических данных достаточно полные и содержательные динамические модели.

Предварительный анализ действующих на плотину сил, построенных графиков изменения температуры, гидростатического давления воды служит, по существу, этапом структурной идентификации для построения прогнозных математических моделей. При этом в процессе построения моделей и последующем прогнозировании используются значения входных воздействий, осредненные между циклами геодезических наблюдений; а в необходимых случаях данное осреднение осуществляется с учетом транспортного запаздывания.

В целях повышения доступности излагаемого материала даются необходимые исходные понятия и пояснения используемой терминологии. В этих же целях математические модели демонстрируются в общей и наиболее понятной

форме, а технология оценивания параметров моделей и прогнозирование осуществляется на примере наиболее простых моделей.

Основные результаты выполненных исследований представлены ниже:

- 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 до и 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 для описания процесса перемещений плотины СШГЭС после аварии 2009 года;

- теоретически и практически обоснована возможность построения прогнозных математических моделей динамического типа на основе рекуррентных уравнений 1-го и 2-го порядков с целью дальнейшего их совершенствования в теорию и практику их конструирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. 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.
2. Aleksandrov Y.N. Temperature conditions in the first column of the Sayano-Shushenskaya HPP dam from field observation data // Power Technology and Engineering. 2016. T. 50. N. 2. C.130-141.
3. 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.
4. 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.
5. Александровская, Э. К. Прогнозирование перемещений гравитационных плотин на скальных основаниях [Текст] / Э. К. Александровская, В. П. Урахчин // Гидротехническое строительство. – 1974. – № 5. – С. 19–24.
6. Беллендир Е.Н., Гордон Л.А., Храпков А.А., Скворцова А.Е. Применение математического моделирования в системах оперативной оценки напряженно-деформированного состояния арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС// Гидротехническое строительство, 2016. №8. С.51-55.
7. Бокс, Дж. Анализ временных рядов. Прогноз и управление [Текст] / Дж. Бокс, Г. Дженкинс. – М. : Мир, 1974. – Вып. 1. – 405 с.; вып. 2. – 197 с.
8. 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.

9. Броншейн, В. И. Численное моделирование напряженно-деформированного состояния высоких плотин [Текст] / В. И. Броншейн, М. Е. Грошев // Гидротехническое строительство. – 2002. – № 6. – С. 2–11
10. 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.
11. 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.
12. Вульфович Н.А., Потехин Л.П. Об ограничениях интенсивности наполнения и опорожнения водохранилища бетонных плотин (на примере арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС) // Гидротехническое строительство, № 12, 2017, с.11-19.
13. Видуев Н.Г., Староверов В.С. Расчет необходимой точности наблюдений за осадками инженерных сооружений // Инженерная геодезия. – Киев: КИСИ, 1972. – Вып. 12. – С. 3–12
14. 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.
15. 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.
16. 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.

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

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

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

20. 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.

21. 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.

22. 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.

23. 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.

24. 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.

25. 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.

26. Гордон, Л. А. Оценка безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС (по данным натурных перемещений) [Текст] / Л. А. Гордон, В. Б. Затеев, Н. И. Стефаненко // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2005. – Т. 244. – С. 55–64.

27. 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.

28. 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.

29. 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.

30. ГОСТ 7.32-2017. Система стандартов по информации, библиотечному и издательскому делу. Отчет о научно-исследовательской работе. Общие требования и правила оформления. – М. Стандартинформ. – 2017. – 28 с.

31. Ганьшин В.Н., Нестеренок М.С. К вопросу о виде функций осадки сооружений // Сборник статей по геодезии и аэрофототопографии. – Минск: БПИ. 1973. – Вып. 1. – С. 57–59.

32. Рабочая книга по прогнозированию / Под ред. И.В. Бестужев-Лада – М.: Мысль, 1982. – 430 с.

33. Гридчин А.Н. Выбор оптимального метода подбора уравнений осадок при прогнозировании // Методы инженерной геодезии в ирригационном и гидротехническом строительстве. – Ростов-на-Дону: РИСИ, 1973. – С. 8–18.

34. 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.
35. 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.
36. Гуляев, Ю. П. Математическое моделирование. Прогнозирование деформаций сооружений гидроузлов по геодезическим данным [Текст] / Ю. П. Гуляев, В. С. Хорошилов. – Новосибирск : СГГА, 2014. – 78 с.
37. 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.
38. 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.
39. Гуляев, Ю. П. Прогнозирование деформации сооружений на основе результатов геодезических наблюдений [Текст] / Ю. П. Гуляев. – Новосибирск : СГГА, 2008. – 256 с.
40. Гуляев, Ю. П. 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.
41. Дергачева, А. А. Сейсмические наблюдения на геодинамическом полигоне Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. А. Дергачева, А. Ф. Еманов, А. В. Толошинов // Гидротехническое строительство. – 2007. – № 7. – С. 42–52.
42. Добрецова, И. В. Методика оценки параметров эксплуатационного состояния гравитационных бетонных плотин на скальных основаниях с помощью иден-

тифицированных 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.

43. 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.

44. Дурчева, В. Н. Учет сезонных изменений схемы работы бетонных плотин при анализе данных натурных 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.

45. 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.

46. Евланов Л.Г. Контроль динамических систем. – М.: Наука, 1979. – 432 с.

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

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

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

50. Заде Л., Дезоер Ч. Теория линейных систем. – М.: Наука, 1970. – 704 с.

51. 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.

52. 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.

53. 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.

54. Ивашинцов Д.А., Соколов А.С., Шульман С.Г., Юделевич А.М. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений // СПб.: Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева», 2001. – 432 с.

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

56. Карпенко Б.И. Развитие идей и категорий математической статистики. – М.: Наука, 1979. – 376 с.

57. 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.

58. 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.

59. 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.

60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.

67. 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.

68. 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.

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

70. 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.

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

72. 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.

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

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

75. О построении математической модели арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. А. Храпков, А. Е. Скворцова, В. С. Косты-

лев, Д. В. Щерба // Изв. Всерос. научно-исследовательского ин-та гидротехники им. Б. Е. Веденеева. – 2011. – Т. 264. – С. 56–69.

76. 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.

77. 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.

78. 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.

79. 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.

80. **Оценка устойчивости бетонной плотины** на сдвиг с учетом натурных 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.

81. **Павловская, Л. Н.** Оценка фильтрационных воздействий в системе плотина – 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.

82. Панкрушин, В. К. Математическое моделирование и идентификация геодинамических систем [Текст] : монография / В. К. Панкрушин. – Новосибирск: СГГА, 2002. – 424 с.
83. Пособие к «Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений, РД 153-34.2-21.342-00. – М., 2006. – 28 с.
84. Параметрическая идентификация расчетных моделей гидротехнических сооружений / Д. А. Ивашинцов, А. С. Соколов, С. Г. Шульман, А. М. Юделевич. – СПб. : Изд-во ОАО «ВНИИГ им. Б. Е. Веденеева», 2001. – 432 с.
85. Перельмутер, А. В. Расчетные модели сооружений и возможность их анализа [Текст] / А. В. Перельмутер, В. И. Сливкер. – М., 2011.
86. Пермякова, Л. С. Формирование напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС при наполнении водохранилища в 2010 году [Текст] / Л. С. Пермякова, А. П. Елифанов // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 4. – С. 2–6.
87. 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.
88. Попов, В. Я. Гидротехнические сооружения [Текст] / В. Я. Попов, М. Л. Беликов. – М. : Стройиздат, 1973. – 328 с.
89. Правила технической эксплуатации электрических станций и сетей Российской Федерации. СО 153-34.20.501-2003. – 2003.
90. 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.
91. 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.

92. Рекомендации по определению предельно допустимых значений показателей состояния и работы гидротехнических сооружений. Гидропроект им. С.Я. Жука Минэнерго СССР. - П-836-85. – 14 с.
93. Реальный сектор на пороге эпохи больших данных. – Рациональное управление предприятием. – 2014. – № 1. – С.34–49.
94. Савич, А. И. Напряженное состояние массива пород в основании плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / А. И. Савич, А. М. Замахеев, К. О. Пудов // Гидротехническое строительство. – 2012. – № 3. – С. 11–24.
95. 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.
96. 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.
97. 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.
98. Сейдж Э.П., Мелса Дж.Л. Идентификация систем управления в пространстве состояний. – М.: Наука, 1974. – 248 с.
99. 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.
100. СНиП 2.02.02-85. Основания гидротехнических сооружений / Госстрой СССР. - М.; ЦИТП Госстроя СССР. - 1986.
101. 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.

102. 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.

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

104. 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.

105. 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.

106. 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. 9-16.

107. 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.

108. 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.

109. Хорошилов, В. С. Прогнозирование процесса перемещений высоконапорной плотины Саяно-Шушенской ГЭС на этапе эксплуатации после аварии

2009 г. [Текст] / В. С. Хорошилов, А.Г. Барлиани, П. Н. Губонин // Изв. вузов. Строительство. – 2018. – № 6 (714). – С. 48–62

110. Хорошилов В.С., Квашенко И.Ю., Носков М.Ф. Особенности выбора деформационных марок для построения кинематической модели при изучении деформаций сооружений / М.: Изв. вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка». – М.: - 2013. – № 4С. – С.58–61.

111. Khoroshilov V.S., Kobeleva N.N., Noskov M.F. Analysis of possibilities to use predictive mathematical models for studying the dam deformation state. Journal of Applied and Computational Mechanics. Vol. 8, No. 2, (2022), 733-744. Doi: 10.22055/JACM.2022.38005.3129

112. Khoroshilov V.S. Mathematical Modelling of Sayano-Shushenskaya Dam Displacement Process after 2009 Accident // International Journal of Engineering Research in Africa. ISSN: 1663-4144, Vol. 39, 2018. pp 47-59. Doi.10.4028/www.scientific.net/JERA.39.47.

113. Khoroshilov V.S., Mazurov B. T., Antonovich K. M., Kalentsky A. I., Kolmogorov V. G. Prediction of the movement process of the high-head dam of Sayano-Shushenskaya hydroelectric power plant during operation after the accident in 2009 // International Journal of Advanced Biotechnology and Research (IJBR). ISSN 0976-2612, Online ISSN 2278–599X, Vol-8, Issue-4, 2017, pp1096-1106.

114. 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.

115. Храпков А.А., Скворцова А.Е., Костылев В.С., Щерба Д.В. О построении математической модели арочно-гравитационной плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Известия Всероссийского научно-исследовательского института гидротехники им. Б.Е. Веденеева, 2011. Т.264. С. 56-69.

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

117. 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.
118. Якубсон, В. М. Анализ напряженно-деформированного состояния плотины Саяно-Шушенской ГЭС [Текст] / В. М. Якубсон // Инженерно-строительный журнал. – 2012. – Т. 27. – № 1. – С. 2.
119. Ardito R., Maier G., Massalongo G. Diagnostic analysis of concrete dams based on seasonal hydrostatic loading. *Engineering Structures*. 2008; N 30. P.3176–3185. Doi.10.1016/j.engstruct.2008.04.008.
120. Bin Li, Jie Yang, Dexiu Hu. Dam monitoring data analysis methods: A literature review. *Structural Control Health Monitoring*. 2019; e2501. Doi.org/10.1002/stc.2501
121. Chen JY. The nonlinear parameter estimation of aging deformation of concrete dam. *Dam Observation and Geotechnical Testing*. 1980; 3-13.
122. Cheng L, Zheng D. Two online dam safety monitoring models based on the process of extracting environmental effect. *Advances in Engineering Software*. 2013; 57:48-56. Doi.org/10.1016/j.advengsoft.2012.11.015.
123. Dai B, Gu C, Zhao E, Qin X. Statistical model optimized random forest regression model for concrete dam deformation monitoring. *Structural Control Health Monitoring*. 2018; 25(6):e2170. Doi.10.1002/stc.2170
124. De Granrut M, Simon A, Dias D. Artificial neural networks for the interpretation of piezometric levels at the rock-concrete interface of arch dams. *Engineering Structures*. 2019; 178:616-634. Doi.org/10.1016/j.engstruct. 2018.10.033
125. Fan L.F., Yi X.W., Ma G.W. Numerical manifold method (NMM) simulation of stress wave propagation through fractured rock mass. *International Journal of Applied Mechanics*. 2013; 5 (2), 1350022. Doi.org/10.1142/S175882511350022.
126. Gaziev E.G. Inclines of horizontal sections of Sayano-Shushenskaya arch-gravity dam. *Power Technology and Engineering*. 2012; T.46. N3. C.181-184. Doi.10.1007/s10749-012-0328-7

127. 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. – T. 47. – № 2. – Pp. 89–101.

128. 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.

129. Häfner H. Bauzeitliche Setzungsmessungen in Steinschüttdämmen und ihre Auswertung. – Vermessungstechnik, 1974, 22, № 6. P. 205–207.

130. 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.

131. Jafari M. Deformation modelling of structures enriched by inter-element continuity condition based on multi-sensor data fusion. Applied Mathematical Modelling. 2016; Volume 40. P.9316-9326. Doi.10.1016/j.apm.2016.06.010

132. Kang F, Liu J, Li J, Li S. Concrete dam deformation prediction model for health monitoring based on extreme learning machine. Structural Control Health Monitoring. 2017; 24(10):e1997. Doi.org/10.1002/stc.1997

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

134. 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. Scvortsova // International symposium on dams for a changing world. Kyoto, Япония. June 5, 2012. Pp. 261–265.

135. Khrapkov A.A., Tseitlin B.M., Scvortsova A.E., Vasilyev A. Mathematical model for rock foundation and concrete dam of Bureiskaya HPP dynamic interaction

// Ninth International benchmark workshop on numerical analysis of dams. St. Petersburg, Russia, June 22-23. 2007. Proceedings, St. Petersburg, 2008. Pp. 216-236.

136. 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. Power Technology and Engineering. 2013; T. 47. N 3. C.191-199. Doi:10.1007/s10749-013-0421-6

137. Lan S.Y., Fang C. Application of least square method based logistic regression model to settlement prediction of earth-rock fill dam. Water Resources and Hydropower Engineering. 2012; 43:16-18. Doi.10.13928/j.cnki.wrahe.2012.03.011

138. Léger P., Leclerc M. Hydrostatic, temperature, time-displacement model for concrete dams. Journal of Engineering Mechanics. 2007; 133(3):267-277.

139. Lombardi G, Amberg F, Darbre G. Algorithm for the prediction of functional delays in the behaviour of concrete dams. The International Journal on Hydropower & Dams. 2008; 15(3):111-116.

140. Li L.H., Peng S.J., Jiang Z.X. Prediction model of concrete dam deformation based on adaptive unscented Kalman Filter and BP neural net-work. Applied Mechanics and Materials. 2014; 513:4076-4079. Doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.513-517.4076

141. Li F., Wang Zh., Liu G., Fu C., Wang J. Hydrostatic seasonal state model for monitoring data analysis of concrete dams / Structure and Infrastructure Engineering. 2015. Volume 11. Issue 12. P.1616-1631.

142. Liu W., Pan J., Ren Y., Wu Z., Wang J. Coupling prediction model for long-term displacements of arch dams based on long short-term memory network. Structural Control Health Monitoring. 2020; e2548. [Doi.org/10.1002/stc.2548](https://doi.org/10.1002/stc.2548)

143. Mata J., Tavares de Castro A., Sá da Costa J. Constructing statistical models for arch dam deformation. Structural Control Health Monitoring. 2013; 21:423-437. Doi.10.1002/stc.1575.

144. 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.

145. 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. – T. 11. – № 1. – Pp. 42–53.
146. Mathematical model for rock foundation and concrete dam of Bureiskaya HPP dynamic interaction [Text] / A. Khrapkov, B. Tseitlin, A. Scvortsova, 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.
147. Marazio A. Analisi statistiche sul comportamento di una grande diga nei primi anni di esercizio. – L' Energia Elettrica, 1965, № 4. – P. 225–235.
148. Motta A., Russo F. Deductions tirees des resultats des mesures du deplacement executees sur quelques Barrages pendant la periode d'exploitation. C.R. IX Congres des Grands Barrages, Stambul, 1967, Vol. III Q.34, R. 46. P. 765–785.
149. Marcello C. Methodes et instruments pour la mesure de deformation des Grands Barrages. – VI Congres des Grands Barrages, New York, 1958, R-66.
150. Pelzer H. Nachweis von Staumauerdeformationen unter Anwendung statistischer Methoden. – Z. Vermessungsw., 1972, 97, № 12. P. 561–562.
151. 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.
152. Rankovic V., Novakovic A., Grujovic N., Divac D., Milivojevic N. Predicting piezometric water level in dams via artificial neural networks. Neural Computing and Applications. 2013; 24(5):1115-1121.
153. Rico J, Barateiro J, Mata J, Antunes A, Cardoso E. Applying advanced data analytics and machine learning to enhance the safety control of dams. Machine Learning Paradigms. 2019, P. 315-350.
154. 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.

155. Shao CF, Gu CS, Yang M, Xu YX, Su HZ. A novel model of dam displacement based on panel data. *Structural Control Health Monitoring*. 2018; e2037. Doi.org/10.1002/stc.2037
156. Salazar F., Morán R., Toledo M.A., Oñate E. Data-based models for the prediction of dam behaviour: a review and some methodological considerations. *Archives of Computational Methods in Engineering*. 2015; 24(1):1-21. Doi.org/10.1007/s11831-015-9157-9
157. Savich A.I., Il'in M.M., Elkin V.P., Rechiyskii V.I., Basova A.B. Geologic-engineering and geomechanical models of rock mass in the bed of the dam Sayano-Shushenskaya HPP. *Power Technology and Engineering*. 2013; T. 47. N 3. C.89-101. Doi.10.1007/s10749-013-0404-7
158. Savich A.I., Bronshtein V.I., Groshev M.E., Gaziev E.G., Lliyn M.M., Rechitski V.I., Rechifski V.V. Studies on the static and dynamic behaviour of the Sayano-SHusnenskaya arch gravity dam [Text] / // *International Journal on Hydropower and Dams*. – 2013. – T. 20. – № 6. – Pp. 53–58.
159. Sani A.A., Lofti V. Dynamic analysis of concrete arch dams by ideal-coupled modal approach. *Engineering Structures*. 2010; Volume 32. Issue 5. P/1377-1383. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2010.01.016
160. Shen WW, Ren JM. Multiple stepwise regression analysis crack open degree data in gravity dam. *Applied Mechanics and Materials*. 2014; 477:888-891. Doi.10.4028/www.scientific.net/AMM.477-478.888
161. Schnitter N. Statistische Sicohernoit der Falgperren. – *Wasser, Energie, Luft*, 1976, Bd. 68, № 5, 6. – S. 126–129.
162. 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.
163. Stephan P., Salin J.. Aging management of concrete structure: assessment of EDF methodology in comparison with SHM and AIEA guides. *Construction and Building Materials*. 37 (2012) 924–933. Doi.10.1016/j.conbuildmat.2012.05.030

164. Tatin M, Briffaut M, Dufour F, Simon A, Fabre JP. Statistical modelling of thermal displacements for concrete dams: influence of water temperature profile and dam thickness profile. *Engineering Structures*. 2018; 165:63-75. Doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.03.010.
165. Yang J, Hu DX, Wu ZR. Research on factor correlation and uncertainty of dam safety monitoring model. *J Hydraul Eng*. 2004; 12:99-105.
166. Xi GY, Yue JP, Zhou BX, Tang P. Application of an artificial immune algorithm on a statistical model of dam displacement. *Computers & Mathematics with Applications*. 2011; 62:3980-3986. Doi.org/10.1016/j.camwa.2011.09.057
167. Wu ZR, Shen CS, Ruan HX. Factor selection of statistical model for concrete dam deformation. *Journal of Hohai University*. 1988; 16(6):1-9.
168. Wang S, Gu C, Bao T. Observed displacement data-based identification method of deformation time-varying effect of high concrete dams. *Science China Technological Sciences*. 2018; 61(6):906-915.
169. Wei B.W., Yuan D., Xu Z., Li L. Modified hybrid forecast model considering chaotic residual errors for dam deformation. *Structural Control Health Monitoring*. 2018; 25(8):e2188. Doi.org/10.1002/stc.2188
170. Zhao E, Wu Ch., Wang Sh., Hu J., Wang W. Seepage dissolution effect prediction on aging deformation of concrete dams by coupled chemo-mechanical model. *Construction and Building Materials*. 237 (2020) 117603. Doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2119.117603

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ТЕРМИНЫ

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
1	Объект прогнозирования	В качестве объектов прогнозирования могут выступать процессы, явления, события, на которые направлена познавательная и практическая деятельность человека с целью получения научно обоснованных оценок состояния объекта в будущем
2	Прогнозная экстраполяция	Метод прогнозирования, основанный на математической экстраполяции, при котором выбор аппроксимирующей функции осуществляется с учетом условий и ограничений развития объекта прогнозирования
3	Эндогенная переменная	Количественная характеристика объекта прогнозирования, являющаяся изменяемой, принимаемая для описания объекта и отражающая его собственные свойства
4	Динамический ряд	Временная последовательность наблюдавшихся значений переменной объекта прогнозирования
5	Выходная переменная динамической модели процесса деформации сооружения	Количественная характеристика собственных свойств объекта прогнозирования в виде наблюдаемого процесса перемещения или зависящего от него другого наблюдаемого процесса, возникающего под влиянием входных воздействий (см. 10); между входными воздействиями и выходной переменной в динамической модели устанавливается оператор связи. Можно называть просто «выход»
6	Экзогенная переменная	Количественная характеристика объекта прогнозирования, принимаемая для его описания, связанная со свойствами прогнозного фона, служащая в модели аргументом
7	Прогнозный фон	Совокупность внешних по отношению к объекту прогнозирования условий, существенных для решения задачи прогноза
8	Период основания прогноза	Промежуток времени, на базе которого строится математическая модель
9	Период упреждения	Промежуток времени, на который разрабатывается прогноз
10	Входные воздействия динамической модели процесса	Количественные характеристики основных факторов силового и не силового характера, вызывающих механическое движение сооружения в целом и его частей. Можно называть просто «вход»
11	Принцип непрерывности прогнозирования	Принцип прогнозирования, требующий корректировки прогнозов по мере поступления новых данных об объекте прогнозирования
12	Дисконтирование информации об объекте прогнозирования	Уменьшение информативности значений переменной объекта прогнозирования по мере удаления моментов их измерений в прошлое

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
13	Ошибка прогноза	Апостериорная величина отклонения прогноза от действительного состояния объекта
14	Контрольный период	Период упреждения прогноза, на котором измерены действительные значения процесса перемещения; создается для контроля первичного построения модели за счет не включения последних циклов наблюдений в период основания прогноза
15	Поисковый прогноз	Прогноз, содержанием которого является определение возможных состояний объекта прогнозирования в будущем
16	Нормативный прогноз	Прогноз, содержанием которого является определение путей и сроков достижения возможных состояний объекта прогнозирования в будущем, принимаемых в качестве цели
17	Интервальный прогноз	Прогноз, результат которого представлен в виде доверительного интервала характеристики объекта прогнозирования для заданной вероятности осуществления прогноза
18	Точечный прогноз	Прогноз, результат которого представлен в виде единственного значения характеристики объекта прогнозирования без указания доверительного интервала
19	Оперативный прогноз	Прогноз с периодом упреждения до 1 месяца
20	Краткосрочный прогноз	Прогноз с периодом упреждения от 1 месяца до 1 года
21	Среднесрочный прогноз	Прогноз, с периодом упреждения от 1 года до 5 лет
22	Долгосрочный прогноз	Прогноз с периодом упреждения от 5 до 15 лет
23	Дальнесрочный прогноз	Прогноз с периодом упреждения свыше 15 лет
24	Моделирование	Метод исследования процессов и явлений путем построения их моделей и экспериментирования на моделях. В содержание математического моделирования входит прогнозирование, в том числе по результатам «игры с моделью»
25	Прогнозная модель	Модель объекта прогнозирования, исследование которой позволяет получить информацию о возможных состояниях объекта в будущем или путях и сроках их осуществления. По математической модели объекта не всегда можно получить непосредственно информацию в нужной форме, поэтому требуется переход к прогнозной модели. Например, от эмпирического закона распределения случайного процесса приходится переходить к его характеристикам в виде условных моментных функций (см. 26)

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
26	Две первые условные моментные функции случайного процесса	Условное математическое ожидание и условная корреляционная функция случайного процесса, используемые в виде прогнозной модели, позволяющие находить оптимальные прогнозы конкретных реализаций процесса и предвычислять точность прогнозов (см. 27). В динамической модели условные моментные функции определяются по ее решению
27	Точность прогноза	Оценка доверительного интервала прогноза для заданной вероятности его осуществления
28	Инерционное запаздывание	Запаздывание реакции сооружения на входные воздействия. Учитывается динамической моделью
29	Транспортное запаздывание	Здесь понимается как постоянный интервал времени, вводимый в динамическую модель за счет части инерционного запаздывания. Для этого при подготовке исходных данных к построению модели приводятся в соответствие значения входных воздействий и выходной переменной, удаленные друг от друга по времени на величину выбранного интервала транспортного запаздывания
30	Тренд	Аналитическое представление изменения переменной во времени (а в динамической модели — и под влиянием входных воздействий), полученное в результате выделения детерминированной составляющей процесса из динамического ряда
31	Верификация прогноза	Оценка достоверности и точности или обоснованности прогноза
32	Достоверность прогноза	Оценка вероятности осуществления прогноза для заданного доверительного интервала
33	Коридор погрешностей	Изменение во времени предвычисленной по модели точности прогнозирования в виде одинарного или удвоенного среднего квадратического отклонения
34	Нормальный процесс	Случайный процесс, подчиняющийся нормальному закону распределения
35	Нормализованный процесс	Случайный процесс, не имеющий нормального распределения, но получивший его, например, после логарифмического или экспоненциального преобразования значений реализаций процесса в каждом сечении
36	Инверсная верификация	Верификация прогноза путем проверки адекватности прогнозной модели на периоде времени, имеющем выполненные наблюдения за объектом
37	Линейность	Понятию линейности можно придавать различное толкование при рассмотрении кинематических и динамических моделей. В кинематических моделях под линейностью обычно понимается линейная функциональная зависимость величины перемещения от времени, т. е. линейность тренда.

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
		В динамических моделях линейность означает соблюдение принципов пропорциональности и суперпозиции между входом и выходом, устанавливаемых с помощью линейного оператора, что позволяет описывать тренды нелинейной формы, возникающие под действием входа. Простейшим линейным оператором служит экспонента и с этой точки зрения кинематическая модель с нелинейным трендом в виде экспоненты является линейной в смысле линейного оператора. Кроме того, кинематические модели могут быть нелинейными по параметрам, если их оценки находятся из решения системы линейных уравнений; примером такой модели служит полиномиальная зависимость, а экспоненциальная зависимость является нелинейной по параметрам
38	Нелинейность	С учетом 37 следует говорить о нелинейности динамических моделей, которая означает, что связь между входом и выходом нельзя представить при помощи одной прямой линии. При этом приращение выхода зависит не только от приращения входа, но и от других условий, таких, как начальный уровень входа или величина его приращения, нарушения в структуре системы «сооружение - среда» (см. 40) и т.п.
39	Центрированный процесс	Центрированным случайным процессом $\dot{x}(t)$ называется отклонение случайного процесса $x(t)$ от математического ожидания $m_x(t)$, т. е. $\dot{x}(t) = x(t) - m_x(t)$, где $x(t)$ представляет n реализаций процесса. Центрирование процесса может производиться за счет исключения из него аппроксимированного тренда
40	Система «сооружение - среда»	Состоит из трех основных подсистем: сооружения, грунтового основания, внешней среды, в результате взаимодействия которых возникает процесс деформации сооружения. Динамическая модель процесса деформации является также системой, представляющей в упрощенной открытой форме результаты взаимодействия подсистем в системе сооружение - среда
41	Динамическая модель «вход – выход»	Дифференциальное или рекуррентное уравнение, определяющее соотношение между изменениями входных и выходных физических величин. Например, стационарная (см. 45) детерминированная модель линейной системы, связывающая вход $u(t)$ с выходом $x(t)$, задается дифференциальным уравнением n-го порядка: $\sum_{j=0}^n \alpha_j \frac{d^j x(t)}{dt^j} = \sum_{j=0}^m b_j \frac{d^j u(t)}{dt^j}, \text{ где } \alpha_i - \text{коэффициенты,}$ отражающие динамические свойства системы; b_i -

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
		коэффициенты, характеризующие степень влияния входных воздействий
42	Представление динамической модели в пространстве состояний	Переход от модели типа «вход - выход» (см. 41) к модели в пространстве состояний выполняется путем преобразования дифференциального уравнения n -го порядка в систему дифференциальных уравнений 1-го порядка, выраженную в матричной форме. Система из n уравнений 1-го порядка определяется полностью, когда заданы все коэффициенты и известны n начальных условий. Начальные условия образуют n -мерный вектор, называемый вектором состояний системы в начальный момент t_0 . Дальнейшее изменение состояний системы задается значениями входа в произвольный момент t . В моделях процессов деформации сооружений переменными состояниями являются наблюдаемые геодезическими методами перемещения и их производные
43	Рекуррентное выражение	Формула, выражающая любой член последовательности от некоторого начального члена через предшествующие члены
44	Переходные характеристики динамической системы	Показывают, как выход системы изменяется во времени под действием входа. В линейных системах используются характеристики в виде переходной функции, передаточной функции и частотной характеристики. Реакция системы на импульсное воздействие является импульсной переходной функцией. Оператор, преобразующий воздействие на входе в реакцию системы на выходе, представляет передаточную функцию. Частотная характеристика отражает относительную реакцию системы на гармонические воздействия
45	Стационарная модель	Динамическая модель, имеющая постоянные параметры на исследуемом интервале времени
46	Устойчивая модель	Модель, у которой постепенно стабилизируется коридор погрешностей. Например, модель в виде инерционного звена 1-го порядка теряет устойчивость, когда коэффициент динамики $\phi > 1$; в общем случае условием устойчивости системы является отрицательность действительной части всех корней характеристического уравнения
47	Функционал	Закон, по которому каждой функции из определенного класса числовых функций соответствует значение некоторого числового параметра. Понятие функционала совпадает с понятием функции, если класс функций состоит из констант, т. е. закон приводит в соответствие числа, выражающие значения аргумента и функции. В результате минимизации функционала находятся оптимальные оценки параметров модели при заданном условии

№№ п.п.	Термин	Определение или упрощенное описание
1	2	3
48	Последовательный симплексный метод (ПСМ)	Используется для оценивания параметров моделей в случаях, когда минимизируемые функционалы оказываются сложными, имеют нелинейный, случайный характер. Сущность ПСМ заключается в формировании в пространстве оцениваемых параметров многогранника, в вершинах которого вычисляются значения функционала. Уточнение значений функционала производится путем «отражения» наихудшей вершины многогранника относительно противоположной грани. Полученная совокупность вершин рассматривается как исходная для следующего шага оптимизации
49	Конструктивное применение вероятностно-статистического аппарата	Процесс деформации любого сооружения имеет преобладающую детерминированную основу, обусловленную упорядоченной структурой системы сооружение - среда и жесткими связями в ней. Это позволяет конструктивно использовать вероятностно-статистический аппарат для описания процессов деформаций, т.е. не соблюдать критериев в отношении объема выборок при обязательном обеспечении статистической однородности моделируемых процессов, при правильности размещения деформационных знаков и назначений циклов наблюдений

ВЫЧИСЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ДЛЯ РЕШЕНИЯ СИСТЕМЫ НОРМАЛЬНЫХ УРАВНЕНИЙ

180

Вычисление центр. значений-1 этап [Режим совместимости] - Excel

ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД

Буфер обмена Гл Шрифт Гл Выравнивание Гл Число Гл Стили

Условное форматирование Форматировать как таблицу Стили

Вставить Удалить Формат Ячейки

Сортировка Найти и фильтр выделить Редактирование

	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	
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	17,227	224,6049	248,7414	371,7594	105,7360	23
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	19,334	262,8309	314,0529	491,2683	91,5181	24
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	21,473	355,9574	555,6174	710,9539	82,8358	34
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	24,165	415,3006	768,4837	866,3407	52,5110	35
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	26,466	438,282	909,7184	887,3989	6,4615	34
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	27,193	419,1192	976,6587	858,5278	-40,8073	30
15	133,65	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	26,235	337,499	865,6269	647,0249	-78,1368	19
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	24,953	266,5056	754,6854	486,8379	-124,6046	10
17	126,22	21,9915	4,04	-2,6558	483,6278	7,0531	389,7239	-99,7485	-58,4045	529,53	6,7112	-17,8233	87,9915	45,0396	20,991	147,5886	483,6278	249,4179	-142,6320	3
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	17,874	70,9066	314,0529	108,8375	-138,6847	-4
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	13,363	6,024102	128,6305	-26,8620	-92,7258	-6
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	9,009	-14,1799	37,7185	-78,2952	-43,8860	-6
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	2,269	13,4975	5,6096	55,1341	14,2718	3
22	91,48	-12,7485	-0,45	-7,1458	162,5233	51,0620	296,7646	76,8193	91,0976	511,88	-10,9388	78,1665	204,9806	119,6584	-10,072	139,4535	162,5233	394,5453	65,9831	24
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	-22,779	374,2908	541,8868	870,5786	91,8514	52
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	-31,595	595,1032	957,8073	1292,9791	62,6944	68
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	-40,958	843,6661	1398,6449	0,0000	0,0000	
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	-43,916	921,5847	1745,4398	0,0000	0,0000	
27																				
28	104,2285	0,0000	6,6958	0,0000	13729,5337	688,9088	11551,5490	415,2739	1109,4101	522,8188	0,0000	1108,3986	5300,2050	3806,7126	0,000	6307,961	15455,8083	10151,2455	-288,1835	396
29																				
30	Перемещ.		Тем-ра		$\dot{x}_{k-1}^2$	T_k^2	$\dot{x}_{k-1}\dot{x}_k$	$\dot{x}_{k-1}T_k$	$\dot{x}_kT_k$	Бьеф		$T_k\dot{u}_k$	$\dot{x}_{k-1}\dot{u}_k$	$\dot{u}_k^2$	$\hat{x}_{k/k-1}$	$\dot{x}_k\dot{u}_k$	$\dot{x}_{k-2}^2$	$\dot{x}_{k-2}\dot{x}_k$	$\dot{x}_{k-2}T_k$	$\dot{x}_k$
31																				

Лист1 Лист2 Лист3

ГОТОВО

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ С ВВЕДЕНИЕМ ТРАНСПОРТНОГО ЗАПАЗДЫВАНИЯ

181

<

ГОТОВО

75%

ВЫЧИСЛЕНИЕ ПРОГНОЗНЫХ ЗНАЧЕНИЙ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ ДЛЯ ЗАПАЗДЫВАНИЯ (0,5; 1.0; 1.5; 2.0 МЕСЯЦ)

Вычисление прогнозов [Режим совместимости] - Excel																		
ФАЙЛ ГЛАВНАЯ ВСТАВКА РАЗМЕТКА СТРАНИЦЫ ФОРМУЛЫ ДАННЫЕ РЕЦЕНЗИРОВАНИЕ ВИД																		
Буфер обмена Шрифт Выравнивание Число Стили Ячейки Редактирование																		
N38																		
11	127,8	23,5715	13,4	6,7042	537,92	15,1012	20,999	2,5729	127,8	534,37	12,61	125,939	13,69	124,452	14,33	123,570	14,41	123,460
12	131,95	27,7215	11,86	5,1642	537,8	14,9812	23,984	3,7377	131,95	536,02	11,01	130,646	12,61	128,442	13,69	126,955	14,33	126,073
13	134,39	30,1615	10,21	3,5142	537,35	14,5312	26,218	3,9436	134,39	536,56	10,2	132,616	11,01	131,500	12,61	129,296	13,69	127,809
14	135,48	31,2515	8,59	1,8942	536,23	13,4112	26,899	4,3524	135,48	536,02	9,14	133,772	10,2	132,311	11,01	131,196	12,61	128,992
15	133,65	29,4215	6,91	0,2142	534,29	11,4712	25,950	3,4718	133,65	534,95	7,61	132,008	9,14	129,901	10,2	128,440	11,01	127,325
16	131,7	27,4715	5,39	-1,3058	532,52	9,7012	24,545	2,9261	131,7	533,28	6,49	130,049	7,61	128,506	9,14	126,398	10,2	124,938
17	126,22	21,9915	4,04	-2,6558	529,53	6,7112	20,706	1,2854	126,22	529,69	3,95	124,077	6,49	120,578	7,61	119,036	9,14	116,928
18	121,95	17,7215	2,16	-4,5358	526,82	4,0012	17,446	0,2752	121,95	527,34	2,05	121,421	3,95	118,804	6,49	115,305	7,61	113,762
19	115,57	11,3415	0,21	-6,4858	523,35	0,5312	13,149	-1,8072	115,57	524,14	0,74	113,971	2,05	112,167	3,95	109,549	6,49	106,050
20	110,37	6,1415	-1,13	-7,8258	520,51	-2,3088	8,747	-2,6056	110,37	521,72	0,15	109,861	0,74	109,048	2,05	107,243	3,95	104,626
21	101,86	-2,3685	-1,48	-8,1758	517,12	-5,6988	2,217	-4,5855	101,86	518,83	-1,3	102,760	0,15	100,762	0,74	99,950	2,05	98,145
22	91,48	-12,7485	-0,45	-7,1458	511,88	-10,9388	-10,128	-2,6207	91,48	515,08	-1,6	98,980	-1,3	98,567	0,15	96,569	0,74	95,757
23	80,95	-23,2785	0,67	-6,0258	506,74	-16,0788	-22,763	-0,5158	80,95	507,11	-0,63	83,157	-1,6	84,493	-1,3	84,080	0,15	82,082
24	73,28	-30,9485	1,52	-5,1758	503,59	-19,2288	-31,499	0,5510	73,28	502,81	0,8	72,123	-0,63	74,093	-1,6	75,429	-1,3	75,016
25	66,83	-37,3985	2,75	-3,9458	500,26	-22,5588	-40,554	3,1556	66,83	500	2,61	66,527	0,8	69,020	-0,63	70,990	-1,6	72,326
26	62,45	-41,7785	4,67	-2,0258	500,76	-22,0588	-43,495	1,7163	62,45	503,43	4,4	65,283	2,61	67,749	0,8	70,242	-0,63	72,212
27																		
28	104,2285	0,0000	6,6958	0,0000	522,8188	0,0000		ε_k	X	U	T	0 мес.		0,5 мес.		1 мес.		1,5 мес.
29	X		T		U							$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$
30					$x_k = 0,1843x_{k-1} + 1,7858u_k - 1,3775T_k - 839,408 + 0,8279\omega_k$							$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$		$\hat{x}_{k/k-1}$
31					$\omega_k = 1,4969\omega_{k-1} - 0,7452\omega_{k-2} + \xi_k$													
32																		
33																		
Лист1 Лист2 Лист3																		
ГОТОВО																		

Научное издание

Хорошилов Валерий Степанович

Кобелева Наталья Николаевна

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ДЕФОРМАЦИОННЫХ ПРОЦЕССОВ
НА ОБЪЕКТАХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ
СООРУЖЕНИЙ**

Издается в авторской редакции

Компьютерная верстка *О. И. Голиков*

Изд. лиц. ЛР № 020461 от 04.03.1997.

Подписано в печать 10.04.2023. Формат 60 × 84 1/16.

Усл. печ. л. 10,69. Тираж 500 экз. Заказ 43.

Гигиеническое заключение

№ 54.НК.05.953.П.000147.12.02. от 10.12.2002.

Редакционно-издательский отдел СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 10.

Отпечатано в картопечатной лаборатории СГУГиТ
630108, Новосибирск, ул. Плахотного, 8.