

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН**
САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ им. МИРЗО УЛУГБЕКА

*На правах рукописи
УДК 528.482*

Аминжанова Малика Бахтиёровна

**Комплексное исследование
осадок инженерных сооружений**

5А311502 «Геодезия и картография»

ДИССЕРТАЦИЯ
на соискание академической степени магистра

Научный руководитель
д.т.н., профессор А.С.Суюнов

С а м а р к а н д – 2013 г.

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РЕСПУБЛИКИ УЗБЕКИСТАН
САМАРКАНДСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АРХИТЕКТУРНО-
СТРОИТЕЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ им. М.УЛУГБЕКА**

Факультет: МКК

Кафедра: Геодезия, картография и кадастр

Год обучения: 2012-2013

Студентка магистратуры: Аминжанова М.Б.

Научный руководитель: Суюнов А.С.

Специальность: Геодезия и картография

**АННОТАЦИЯ ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ СТЕПЕНИ
МАГИСТРА**

Ключевые слова: деформации, осадки, инженерные сооружения, наблюдения, прогнозирование, моделирование, стабилизация, периодичность, грунт, дисперсия, полином, осадочные марки.

Объект исследования: Комплексные и статистические исследования осадок инженерных сооружений.

Цель работы. Диссертационная работа имеет своей целью

1. Изучить вопросы комплексного исследования осадок инженерных сооружений;
2. Рассмотреть статистические исследования результатов геодезических наблюдений за деформациями сооружений;
3. Произвести моделирование и прогнозирование деформационных процессов, апостериорную корректировку методики наблюдений по данным уже проведенных циклов и определение деформаций по значениям, близким к предельным.

Методика исследований. Решение поставленных задач выполнено путём теоретических и экспериментальных исследований с последующей всесторонней проверкой на основании специальных экспериментальных и производственных наблюдений.

Полученные результаты и их новизна заключаются в том, что:

- идеи проведенных статистических исследований могут быть применены и к плановым смещениям;
- произведено моделирование и прогнозирование осадки по результатам геодезических наблюдений;
- доказана необходимость построения модели в виде экспоненты, а не полинома

Практическая значимость работы заключается в повышении срока службы и качества сооружений, точности производимых геодезических исследований сооружений на осадку.

Степень внедрения и экономическая эффективность: Результаты исследований могут быть использованы на геодезических предприятиях Республика Узбекистан при производстве геодезических наблюдений за деформациями и дадут экономический эффект.

Область применения: производство моделирования и прогнозирования осадок инженерных сооружений.

Научный руководитель
д.т.н., профессор А.С.Суюнов

Студентка магистратуры
М.Б.Аминжанова

**THE MINISTRY OF HIGHER AND SECONDARY SPECIAL
EDUCATION OF REPUBLIC OF UZBEKISTAN
SAMARKAND STATE INSTITUTE OF ARCHITECTURE AND
CONSTRUCTION IN THE NAME OF MIRZA ULUGHBEK**

Faculty: Construction of engineering services (CES)

Chair: Geodesy, cartography and cadastre

Academic year: 2012-2013

Holder of master's degree: Aminjanova M.B.

Research supervisor: Suyunov A.S.

Profession: Geodesy and cartography

ANNOTATION OF MASTER'S THESIS

Keywords: deformations, deposits, engineering constructions, supervision, forecasting, modelling, stabilisation, periodicity, a ground, a dispersion, a polynom, sedimentary marks.

Object of research: Complex and statistical researches a deposit of engineering constructions.

The work purpose. Dissertational work has the purpose

1. To study questions of complex research a deposit of engineering constructions;
2. To consider statistical researches of results of geodetic supervision over deformations of constructions;
3. To make modelling and forecasting of deformation processes, a priori updating of a technique of supervision according to already spent cycles and definition of deformations on the values close to the limiting.

Technique of researches. The decision of tasks in view is executed by theoretical and experimental researches with the subsequent all-round check on the basis of special experimental and industrial supervision.

The received results and their novelty consist that:

- Ideas of the spent statistical researches can be applied and to planned displacement;
- Modelling and forecasting deposits by results of geodetic supervision is made;

- Necessity of construction of model for a kind exhibitors, instead of a polynom is proved.

The practical importance of work consists in increase of service life and quality of constructions, accuracy of made geodetic researches of constructions on a deposit.

Degree of introduction and economic efficiency: Results of researches can be used at the geodetic enterprises Republic Uzbekistan by manufacture of geodetic supervision over deformations and will give economic benefit.

Scope: manufacture of modelling and forecasting a deposit of engineering constructions.

Scientific supervisor doctor of technical Sciences,
professor A.S.Suyunov

Master's degree student
M.B.Aminjanova

О Г Л А В Л Е Н И Е

Введение	2
Глава I. Общие сведения	
1. Виды деформаций сооружений и причины их возникновения	9
2. Методы математической обработки результатов на наблюдений за деформациями сооружений	14
3. Понятие об оптимальном эксперименте	16
Выводы по главе I	21
Глава II. Моделирование и прогнозирование осадок инженерных сооружений	
1. Постановка задачи	22
2. Оценка расчетных методов прогноза осадки сооружений	24
3. Прогнозирование осадки в период строительство	28
4. Моделирование и прогнозирование осадки по результатам геодезических наблюдений	31
5. Определение периода стабилизации осадок инженерных сооружений	51
Выводы по главе II	54
Глава III. Теория обоснования точности и периодичности наблюдений за осадками сооружений	
1. Принцип и методология	56
2. Обоснование точности наблюдений	58
3. Обоснование периодичности наблюдений	71
4. Комплексные методы определения деформаций сооружений по данным геодезических наблюдений	75
Выводы по главе III	77
Общие выводы	78
Список литературы	81

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. В республике Узбекистан ставится задача обеспечения дальнейшего экономического прогресса общества, в основных направлениях экономического и социального развития, в глубоких качественных сдвигах в материально - технической базе на основе ускорения научно - технического прогресса, интенсификации общественного производства, повышения его эффективности. Выполнение этой задачи в немалой степени связано со строительством новых и расширением существующих различных по характеру промышленных и гражданских объектов [4].

Известно, что пространственное положение строящихся и уже построенных сооружений в основном определяется геодезическими методами, включающими в себя как составную часть наблюдения за деформациями. Следует отметить, что наблюдения за деформациями различных зданий сооружений выполняются в нашей стране и за рубежом уже около века. За эти годы геодезистами, геологами и строителями накоплен неоценимый опыт в деле постановки наблюдений, их производства и определения основных деформационных характеристик оснований сооружений по результатам геодезических наблюдений.

Анализ основных работ в области исследования.

Комплекс работ по изучению деформаций сооружений в общем виде может быть представлен схемой (рис.1).

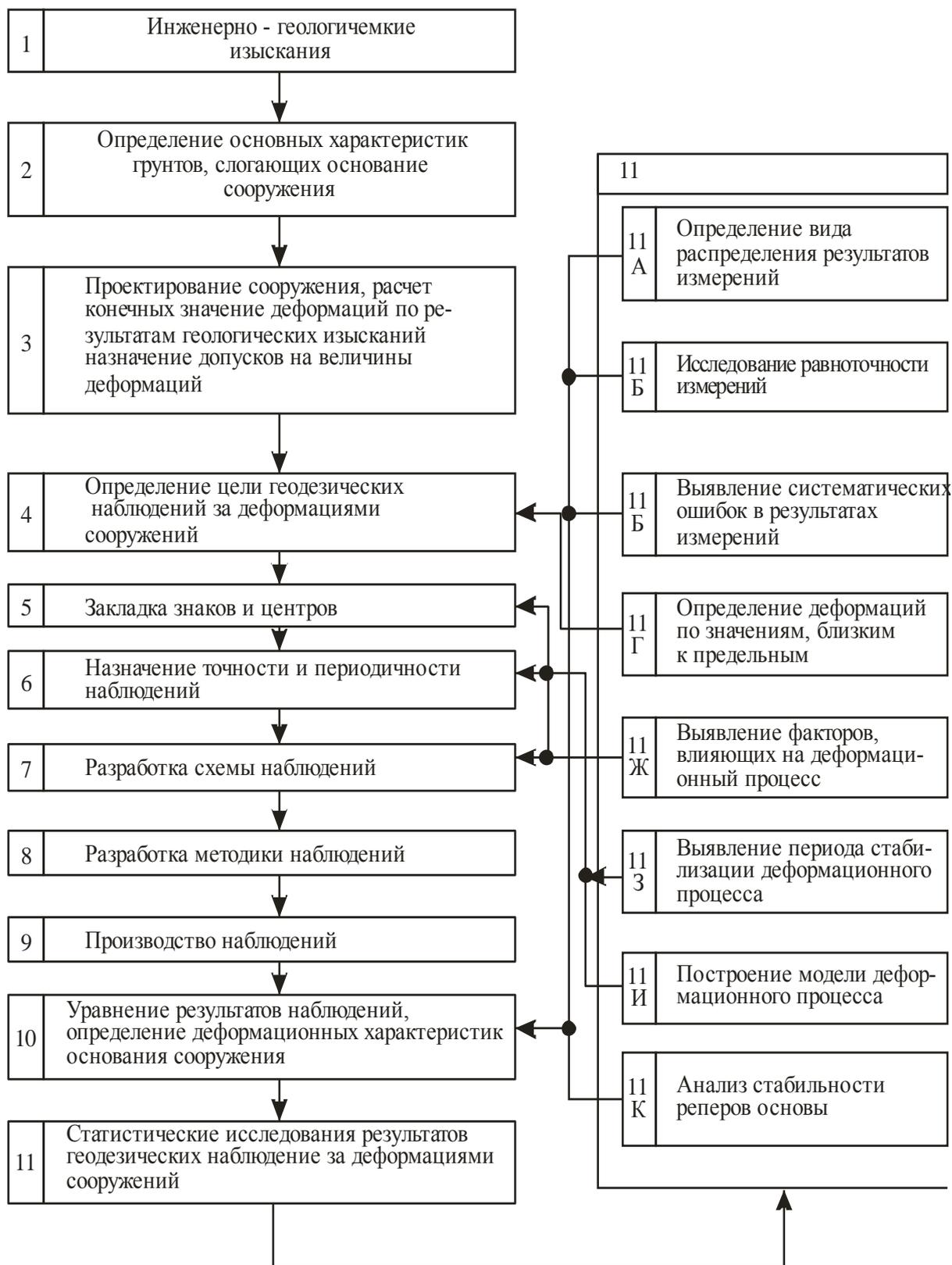


Рис. 1. Комплекс работ по изучению деформаций

Отметим, что вопросы производства геодезических наблюдений и их уравнивание, решаемые на стадиях 1-10, достаточно хорошо изучены и

изложены в трудах В.Д. Большакова [6], Ю.И. Маркузе [28], И.Ю. Васютинского [10], Д.Ш. Михелева, И.В. Рунова и А.И. Голубцова [18], П.И. Брайта [7], Х.К. Ямбаева [32], В.И. Гладкого [11], В.А. Горелова [12], М.Е. Пискунова [30] и др.

Строительство сложных в конструктивном и технологическом решении сооружений, а также систематизация накопленных результатов наблюдений за их высотным и плановым положением поставили специалистов, занимающихся этими вопросами в производстве, перед проблемой проведения специальных исследований - статистических исследований результатов наблюдений за деформациями сооружений (стадия 11).

Этой проблеме в специальной литературе уделяется большое внимание: в книгах Д.Ш. Михелева, И.В. Рунова и А.И. Голубцова [18], В.Н. Ганьшина, А.Ф. Стороженко, А.Г. Ильина, Н.А. Буденкова и В.И. Цюнько, в статьях В.Е. Новака [29], В.И. Бандурки и Н.А. Лошкарева [5], Д.А. Кулешова и Ю.П. Гуляева [17], А.Н. Гридчина [13], М.С. Нестеренок [19], Н.М. Садаковой [23] и др., в которых рассматриваются отдельные вопросы данной проблемы.

Цель работы. Мы поставили перед собой задачу – рассмотреть в работе только те вопросы статистических исследований результатов геодезических наблюдений за деформациями сооружений, которые или не освещены в ранее опубликованных трудах [11] и [18], или же требуют дальнейшего изучения с общих позиций теории математической обработки геодезических наблюдений с применением аппарата теории вероятностей и математической статистики. К таким вопросам относятся: моделирование и прогнозирование деформационных процессов, апостериорная корректировка методики наблюдений по данным уже проведенных циклов и определением деформаций по значениям, близким к предельным.

Методика исследований. Решение поставленных задач выполнено путём теоретических и экспериментальных исследований с последующей

всесторонней проверкой на основании специальных экспериментальных и производственных наблюдений.

Научная новизна работы. В свете поставленной задачи в диссертации большей частью рассматриваются вопросы изучения осадок сооружений как наиболее массовая геодезическая работа. Но основные идеи проведенных статистических исследований могут быть применены и к плановым смещениям.

Опыт строительства различных зданий и сооружений показал, что все они в той или иной мере подвергаются деформациям, которые происходят в результате перемещения частиц грунта [7].

Перемещения сооружения вниз называется осадкой, перемещение вверх – подъемом (выпучиванием) и перемещение в сторону – горизонтальным смещением.

Величина осадок выражается длиной вектора, компланарного начальной горизонтальной плоскости, образованной подошвой фундамента, причем длина измеряется расстоянием между исходной и деформированной поверхностями. Различают осадки равномерные и неравномерные, при этом, если все эти векторы равны между собой, то осадку сооружения в целом называют равномерной, в противоположном случае констатируют неравномерную осадку сооружения.

Практическая значимость результатов исследований. Неравномерные осадки в основном являются следствием различного приложенного давления частей сооружения и непостоянной сжимаемости грунтов под фундаментом, что, в свою очередь, вызывает различные перемещения и осадки в над фундаментных конструкциях сооружений.

Известно, что равномерные осадки не снижают прочности и устойчивости сооружений. Гораздо более опасными являются неравномерные осадки, причем, чем значительнее разность осадок различных частей сооружений, тем большим напряжением («перенапряжениям») подвергаются несущие конструкции.

В результате анализа многолетних наблюдений за осадками замечено, что средняя неравномерность осадков, возрастая, стремится к некоторой предельной величине, определяемой свойствами грунтов оснований, жесткостью и прочностью сооружений.

Вертикальные деформации зданий и сооружений подразделяются следующим образом [8]:

1) осадка – деформация (уплотнение грунтов под нагрузкой в связи с уменьшением их пористости), вызывающая вертикальное перемещение всего сооружения вниз под действием его массы; причем различают конечную (стабилизированную) осадку, соответствующую полному уплотнению грунта основания, и нестабилизированную осадку, изменяющуюся во времени и соответствующую незавершенному процессу уплотнения грунтов основания;

2) просадка – деформация, носящая провальный характер и вызываемая коренным изменением сложения грунта (уплотнение макропористых грунтов при их замачивании, уплотнение рыхлых песчаных грунтов сотрясением и т.п.).

Основные причины деформации, согласно [8], можно условно разделить на две группы: 1) общие причины, связанные с особенностями физико-механических свойств грунтов, слагающих основание фундамента сооружения; 2) частные причины, связанные с особенностями производства строительных работ и режима эксплуатации.

Реализация работы. Результаты исследований может быть использоваться

в геодезических предприятиях республика Узбекистан при производстве геодезических наблюдений за деформациями и даст экономический эффект. В перспективе эти способы найдут применение при производстве другие методы геодезических измерений.

Апробация работы. Основные положения и результаты , приведенные в диссертации докладывались на:

1. Научных семинарах кафедры геодезии архитектурно-строительного института (г. Самарканд). 2011-2013гг.

2. Научно-технических конференции профессорско-преподавательского состава архитектурно-строительного института (г. Самарканд). 2011-2012гг.

На защиту выносятся следующие основные положения.

В результате анализа и интерпретации результатов многолетних геодезических наблюдений была установлена определенная зависимость между осадками зданий и временем ее протекания для различных грунтов. При этом весь процесс осадки сооружений условно разделяется на два этапа: 1) осадка в стадии строительства, 2) осадка в эксплуатационный период.

В начале нагрузки сооружения (начальная стадия строительства, нагрузка $P > 0$) происходит сжатие грунтов в условиях ограниченного бокового расширения, вызванными небольшими перемещениями частиц вниз с незначительными отклонениями от вертикали; с увеличением нагрузки у краев фундамента возникают перенапряжения, которые превышают сопротивление грунтов сдвигу, в результате чего в основании происходит частичный сдвиг грунта.

При дальнейшем увеличении давления (следующая стадия строительства) область сдвига охватывания все большее число участков под фундаментом, в результате чего под ним образуется уплотненное грунтовое «ядро», которое, перемещаясь с фундаментом, отделяется от грунта поверхностью скольжения или разрыва, вследствие чего окружающий грунт начинает перемещаться в стороны и вверх, т.е. в направлении наименьшего сопротивления. При этом происходит выпирание грунта из-под фундамента, чем и создаются условия для его резкого опускания и смещения.

Публикации. Основные теоретические и практические результаты диссертационной работы освещены в двух научных статьях.

Структуры диссертации. Работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованной литературы насчитывающий 34 источника. Объем диссертации 80 стр. текста, включая 6 рис. и 15 таблиц. В введении обосновывается актуальность темы диссертации, коротко излагается современное состояние проблемы, формулируются цели исследований и приводятся основные защищаемые положения. В главе I приведены общие положения, деформаций сооружений, методики их математической обработки, а так же дано понятие об оптимальном эксперименте.

В главе II изложены основы методики моделирования и прогнозирования осадок сооружений по данным геологических и геодезических наблюдений.

Теория обоснования точности и периодичности геодезических наблюдений за осадками сооружений по данным уже проведенных циклов, а так же основные сведения о комплексных методах определения деформаций сооружений по данным геодезических наблюдений рассмотрена в главе III.

В выводах подведены общие итоги работы.

Глава I.

ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ

1. ВИДЫ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ И ПРИЧИНЫ ИХ ВОЗНИКНОВЕНИЯ

Существуют три фазы деформации грунтов под фундаментом при нагрузке возрастающими ступенями (рис.2): I – фаза уплотнения, II – фаза местных сдвигов, III – фаза выпирания.

В фазе I деформации грунта осадки носят затухающий характер; уплотнение происходит только вследствие уменьшения пористости грунта, причем зависимость между нагрузкой P и величиной осадки S близка к прямолинейной. В фазе II скорость осадки приобретает постоянный характер; осадки в общем случае становятся неравномерными и большими, чем в фазе уплотнения. В фазе III с увеличением нагрузки осадка еще более увеличивается вследствие образования поверхности скольжения в грунтах.

В период эксплуатации сооружений также происходит постепенное уплотнение грунтов и в стадии стабилизации осадка достигает своего конечного значения (см. рис.2).

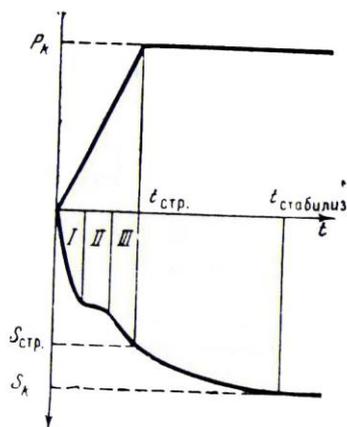


Рис. 2. Кривая нарастания осадки $S(P, t)$

На рис.2 показана обобщенная кривая нарастания осадки $S(P, t)$: в строительный период происходит возрастание давления на грунт под действием массы сооружения ($P < P_k$) с одновременным возраста

нием осадки S . К моменту завершения строительства и окончания монтажа технологического оборудования ($t=t_{\text{стр}}$) давление на грунт достигает конечного значения ($P=P_{\text{max}}$) и осадка сооружения характеризуется величиной $S_{\text{стр}}$. В период эксплуатации сооружения ($P=P_k=\text{const}$) происходит затухание процесса осадки и она достигает величины $S_k(t=t_{\text{стаблиз}})$ в стадии стабилизации.

Таким образом, протекание осадки является функционально сложным и дифференцированным во времени процессом, требующим также комплексного и дифференцированного подхода к методам его изучения.

Как известно [5] по степени чувствительности к неравномерным осадкам сооружения делятся на две категории:

I – малочувствительные, к которым относятся:

а) конструктивно абсолютно жесткие сооружения, оседающие как одно пространственное целое (т.е. равномерно), или же с креном (домны, трубы, башни) и б) конструктивно нежесткие сооружения, элементы которых слабо связаны друг с другом и взаимное перемещение которых, вследствие неравномерности осадки фундаментов, не вызывает дополнительных напряжений в элементах конструкций (отдельные колонны на отдельно несущих фундаментах и т.п.);

II – чувствительные, к которым относятся: а) вполне жесткие сооружения, состоящие из связанных между собой во всех направлениях элементов, образующих замкнутых контуры, но способные все же иметь незначительные относительные перемещения (здания с несущими кирпичными стенами, связанные между собой капитальными стенами и монолитными железобетонными перекрытиями); б) относительно жесткие сооружения, состоящие из элементов, жестко связанные между собой не по всем направлениям и представляющие собой распорные схемы, весьма чувствительные к неравномерным осадкам.

Для каждого здания или сооружения формируются предельно допустимые величины совместной деформации основания и здания – допуски \bar{S} , ΔS , \bar{k} , \bar{f} .

Данные величины устанавливаются исходя из необходимости соблюдения [2]: а) технологических или архитектурных требований к деформациям сооружений; б) требований к прочности, устойчивости и трещиностойкости конструкций.

В таб. 1 и 2 указаны предельные величины деформаций оснований различных зданий и сооружений промышленного и гражданского комплекса [2].

Таблица 1.
Допустимые максимальные и средние абсолютные осадки некоторых сооружений

<i>Наименование и конструктивные особенности сооружений</i>	<i>Предельные деформации оснований</i>	
	<i>вид</i>	<i>величина, см</i>
1. Производственные и гражданские многоэтажные здания с полным каркасом: железобетонные рамы без заполнения стальные рамы без заполнения железобетонные рамы с заполнением стальные рамы с заполнением	Максимальная осадка	8
	То же	12
	То же	8
	То же	12
2. Здания и сооружения, в конструкциях которых не возникают дополнительные усилия от неравномерных осадок		
3. Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из: крупных панелей крупных блоков и кирпичной кладки без армирования крупных блоков и кирпичной кладки с армированием или железобетонными поясами	Средняя осадка	10
	То же	10
	То же	15
	То же	15
4. Высокие жесткие сооружения. Сооружение элеваторов из железобетонных конструкций:	Средняя	40

а) рабочее здание и силосный корпус монолитной конструкции, блокированные на одной фундаментной плите б) рабочее здание и силосный корпус сборной конструкции в) отдельно стоящее рабочее здание г) отдельно стоящий силосный корпус монолитной конструкции д) отдельно стоящий силосный корпус сборной конструкции	осадка	30
	То же	25
	То же	40
	То же	30
Дымовые трубы высотой Н, м: а) $H \leq 100\text{м}$ б) $100\text{м} < H \leq 200\text{м}$ в) $200\text{м} < H \leq 300\text{м}$ г) $H > 300\text{м}$	Средняя осадка	40
	То же	30
	То же	20
	То же	10
Прочие высокие (до 100м) жесткие сооружения	Средняя осадка	20

Таблица 2.

Допустимые относительные осадки

<i>Наименование и конструктивные особенности сооружений</i>	<i>Предельные деформации оснований</i>	
	<i>вид</i>	<i>величина, см</i>
1. Производственные и гражданские многоэтажные здания с полным каркасом: железобетонные рамы без заполнения стальные рамы без заполнения железобетонные рамы с заполнением стальные рамы с заполнением	Относительная разность осадок	0,002
	то же	0,004
	то же	0,001
	то же	0,002
	то же	0,002
2. Здания и сооружения, в конструкциях которых не возникают дополнительные условия от не равномерных осадок	То же	0,006
3. Многоэтажные бескаркасные здания с несущими стенами из: крупных панелей крупных блоков и кирпичной кладки без армирования крупных блоков и кирпичной кладки с	Относительный прогиб	0,0007
	То же	0,001
	То же	0,0012
	Крен в	0,005

армирования или железобетонными поясами независимо от материала стен	поперечном направлении	
4. Высокие жесткие сооружения. Сооружения элеваторов на железобетонных конструкциях:		
а) рабочее здание и силосный корпус монолитной конструкции, сблокированные на одной фундаментальной плите	Поперечный и продольный крены То же	0,003 0,003 0,003
б) рабочее здание и силосный корпус сборной конструкции	Поперечный крен	0,004
в) отдельно стоящее рабочее здание	Поперечный и продольный крены То же	0,004
г) отдельно стоящий силосный корпус монолитной конструкции		
д) отдельно стоящий силосный сборной конструкции		
Дымовые трубы высотой:		
а) $H \leq 100\text{м}$	Крен	0,005
б) $100\text{м} < H \leq 200\text{м}$	Крен	$1/2H$
в) $200\text{м} < H \leq 300\text{м}$	Крен	$1/2H$
г) $H > 300\text{м}$	Крен	$1/2H$
Прочие высокие (до 100м) жесткие сооружения	Крен	0,004

Как видно из табл. 1, величины предельных осадок для зданий допускаются от 8 до 15 см, причем большие осадки допускаются в сооружениях, имеющих более жесткую конструкцию. Для сплошных железобетонных фундаментов таких сооружений, как доменные печи, дымовые трубы, силосные и водонапорные башни, в среднем величина предельной осадки составляет 30 см. Предельные величины деформаций, являющихся следствием неравномерности осадки (прогибы и др.), даны в таблицах в долях длины изгибаемого участка или расстояния между отдельными фундаментами (или же конструкции одного фундамента) и составляют в среднем 0,001-0,002L. Крен сплошных фундаментов, согласно данным табл. 2, не должен превышать 0,004.

Для оснований фундаментов опор мостов (железнодорожных, автодорожных и городских) предельная величина осадки (4) равна 1,5

\sqrt{L} см. (где \bar{L} – длина меньшего примыкающего к опоре пролета в метрах, принимаемая не менее 25 м.), а предельная величина неравномерности осадок опор – $0,75\sqrt{\bar{L}}$.

Современный этап развития народного хозяйства характеризуется появлением объектов, требующих высокоточного монтажа и постоянного наблюдения за стабильностью взаимного положения отдельных элементов оборудования, составляющего единую технологическую схему. Отличительная особенность этих сооружений – их высокая чувствительность к осадкам с точки зрения нормального режима технологического процесса [6].

Перечисленные допуски на осадки сооружений являются наиболее характерными как для класса промышленных и гражданских сооружений широкого назначения, так и для класса специальных сооружений. Что касается изучения характера протекания осадки сооружения, то решение этого вопроса может быть выполнено на основе исследования методов прогнозирования процесса и разработки соответствующих алгоритмов.

2. МЕТОДЫ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ РЕЗУЛЬТАТОВ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ДЕФОРМАЦИЯМИ СООРУЖЕНИЙ

Современные сооружения в большинстве своем отличаются сложным конструктивным решением – большой этажностью при относительно малой площади основания или же наличием ответственных технологических линий, располагающих на большой территории. Это приводит к тому, что для изучения деформаций отдельных элементов конструкций и технологического оборудования на них закрепляют и затем наблюдают от цикла к циклу большое количество марок. Поэтому у организации, выполняющей наблюдения, скапливается материал, содержащий большой объем ценной информации как непосредственно о созданной опорной геодезической сети (деформационной сети) и качестве

выполненных наблюдений, так и о состоянии конструкций сооружения, а целом и его элементов в отдельности.

Поэтому ограничиваться традиционной методикой [3] систематизации и анализа явно недостаточно. В этом случае необходимо применение средств и аппарата математической статистики.

Под математической обработкой результатов наблюдений за деформациями сооружений обычно понимается [18]: 1) определение конкретных деформационных характеристик сооружения в целом и его отдельных частей; 2) оценка достоверности полученных результатов наблюдений; 3) системное обобщение материалов наблюдений с целью установления количественных характеристик, описывающих основные закономерности в процессе деформаций; 4) выявление зависимости между деформациями и причинами, их обуславливающими, с целью последующего прогнозирования деформационных характеристик сооружений.

Первым этапом обработки является определение вероятнейших значений деформационных характеристик сооружений по результатам уравнивания деформационных сетей при помощи метода наименьших квадратов [6,28].

В практике наблюдений за деформациями сооружений наиболее сложным и ответственным случаем является тот, когда измерения проводятся с максимально возможной точностью и величины деформаций зачастую соразмерны с ошибками измерений (это весьма характерно, в частности, для уникальных сооружений [6]). В этом случае достоверность полученных результатов (второй этап обработки) должна быть подтверждена исследованиями по выявлению систематических погрешностей и проверкой принадлежности результатов измерений нормальному закону распределения [1].

Большой объем получаемой информации требует систематизации и соответствующих математических исследований с целью выявления

значимых (существенных) факторов, влияющих на процесс деформаций, для построения математической модели деформаций и последующего прогнозирования. Математическим аппаратом данных исследования являются дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы.

Дисперсионный анализ в нашем случае позволяет выяснить, является ли совокупность наблюдений в разных циклах набором наблюдений одной нормально распределено случайной величины (одной или нескольких деформационных характеристик сооружений) или смесью наблюдений нормально распределенных случайных величин, различающихся только средними значениями [11].

С помощью математического аппарата корреляционного анализа проводятся исследования корреляционных связей между значениями деформаций отдельных знаков, полученными в разных циклах наблюдений [15,17].

Построение модели деформационного процесса и последующее прогнозирование решается в большинстве случаев с помощью аппарата регрессионного анализа путем математических исследований оценок функции регрессии и изучения качеств этих оценок по данным последующих наблюдений [13].

3. ПОНЯТИЕ ОБ ОПТИМАЛЬНОМ ЭКСПЕРЕМЕНТЕ

При разработке методики геодезических наблюдений за деформациями сооружений возникает ряд специальных вопросов, из которых к важнейшим относится вопрос о точности и периодичности (частоте) наблюдений. Можно сказать, что на этом этапе возникает задача планирования людских ресурсов, инструментального парка и денежных средств, выделяемых на данный вид работ. При этом естественным желаемым вариантом является получение достоверных результатов в процессе наблюдений при минимальных затрат денежных средств, людских и максимальном использовании

инструментального парка.

Поставленная задача является типичной из класса задач, решаемых широко развиваемой в последнее время теорией планирования эксперимента.

Математический аппарат теории планирования эксперимента дает в руки исследователя строгие методы, позволяющие при минимальных затратах времени и средств, планировать эксперимент таким образом чтобы в результате эксперимента получать максимум требуемой информации об объекте (под объектом исследований здесь понимается процесс деформации сооружений).

Цель исследования при планировании эксперимента называется целевой функцией (параметром оптимизации).

Основополагающим в теории оптимального эксперимента является определение плана.

Непрерывным планом ε называется совокупность величин

$$\varepsilon = \left\{ \begin{array}{l} x_1, x_2, \dots, x_n \\ p_1, p_2, \dots, p_n \end{array} \right\}, \quad (1.1)$$

где $x_i \in X$ - точки спектра плана (т.е. точки, в которых производят наблюдения); p_i - веса результатов наблюдений в соответствующих точках спектра; X - пространство планирования.

Результаты наблюдений, выполняемых в точках x_i плана, служат для решения двух основных задач: 1) определения факторов, влияющих на исследуемый процесс, и отбора значимых из них; 2) определения вида математической модели процесса (задача идентификации) и прогноза ее значений (задача экстраполяции).

Для проведения экстраполяции целевой функции параметр оптимизации необходимо связать с факторами - способами воздействия на объект - некоторой функциональной зависимостью, называемой поверхностью отклика (моделью объекта исследования). Обычно в теории планирования модель ищется в виде полинома

$$S(x) = \sum_{i=0}^k a_i f_i(x) \quad (1.2)$$

где a_i – коэффициенты уравнения регрессии ($0 \leq i \leq k$); $f_i(x)$ – функции входных переменных (влияющие факторы).

В этом случае возможны три уровня, характеризующие априори степень информативности наблюдателя в виде функции (1.2):

1. Вид функции (1.2) известен и задача поиска модели сводится к определению неизвестных параметров

$$a^T = (a_1, a_2, \dots, a_k).$$

2. Наблюдателю известно, что функция (1.2) совпадает с одной из функций

$$S(x, \bar{a}) = \begin{cases} S_1(x, \bar{a}_1) \\ S_2(x, \bar{a}_2) \\ \dots \\ S_m(x, \bar{a}_m) \end{cases}$$

В этом случае задача сводится к определению, какая из функций является истинной, и нахождению неизвестных параметров.

3. Вид функции (1.2) неизвестен.

Наиболее благоприятен наблюдателю случай, когда имеется априорная информация об объекте, соответствующая первому уровню. Но, к сожалению, этот случай маловероятен по причинам, которые будут изложены в 2.1.

Второй уровень информативности соответствует тому этапу исследований, когда выполнено несколько циклов наблюдений, по результатам которых удовлетворительно подобрана модель процесса.

Третий уровень информативности наблюдателя часто встречается на практике. Методика решения задачи в этом случае – последовательное планирование по схеме: гипотеза – измерение – настройка модели – уточнение гипотезы – измерение. На практике такая постановка наблюдений предопределяет вопрос, что лучше – полный факторный эксперимент (т.е. проведение наблюдений с максимально возможной точностью и как можно чаще) или же

меньшее число опытов, в свою очередь, с известной компенсацией – ограничениями, принимаемыми априори? В качестве важнейшего ограничения принимается существование единственного оптимума и представление функции отклика в виде одного из полиномов $S(x,a) = S_i(x, \bar{a}_i)$, параметры которого оцениваются по данным геодезических наблюдений.

Разрабатываемый план наблюдений должен быть оптимальным в смысле заданного критерия.

Критерии оптимальности планов связаны с видом матрицы M называемой информационной матрицей Фишера:

$$M = F^T F, \quad (1.3)$$

где

$$F = \begin{pmatrix} f_1^T \\ f_2^T \\ \dots \\ f_n^T \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{10} & f_{11} & \dots & f_{1k} \\ f_{20} & f_{21} & \dots & f_{2k} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ f_{n0} & f_{n1} & \dots & f_{nk} \end{pmatrix}$$

- прямоугольная матрица размером $n \times (k+1)$, задающая значение функции $f_i(x)$ в формуле (1.2) при проведении n наблюдений.

A-оптимальность. План называется A-оптимальным, если он минимизирует след ковариационной матрицы

$$C = M^{-1} = (F^T F)^{-1}. \quad (1.4)$$

Отметим, что минимизация следа ковариационной матрицы (1.4) означает минимизацию средней дисперсии оценок коэффициентов

$$a^{-T} = (a_1, a_2, \dots, a_k). \quad (1.5)$$

E-оптимальность. План называется E-оптимальным, если он минимизирует максимальное собственное число соответствующее ему ковариационной матрицы оценок коэффициентов \bar{a} .

D-оптимальность. План называется D-оптимальным, если он минимизирует определитель ковариационной матрицы C или, соответственно, максимизирует определитель информационной матрицы M .

G-оптимальность. План называется G-оптимальным, если он

минимизирует по всем возможным альтернативным планам величину максимальной дисперсии прогнозируемых значений:

$$\sigma_{S(x)}^2 = \sigma^2 f^T(x) C f(x). \quad (1.6)$$

Геометрически А-оптимальный план минимизирует сумму квадратов главных полуосей эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов \bar{a} ; Е-оптимальный план минимизирует величину главной оси эллипсоида рассеяния оценок коэффициентов \bar{a} ; D-оптимальный план минимизирует объем эллипсоида рассеяния оценок \bar{a} .

Можно показать, что для непрерывных планов справедлива теорема эквивалентности, согласно которой непрерывный D-оптимальный план ε^*_D оказывается одновременно и G-оптимальным (ε^*_a), т. е. минимизирующим максимальную дисперсию предсказания регрессионной функции. Теорема имеет важное значение при построении D-оптимальных планов (или G-оптимальных), так как позволяет одновременно пользоваться свойствами тех и других, откуда можно сделать вывод о предпочтительности критерия D-оптимальности планов, так как он, минимизируя обобщенную дисперсию оценок коэффициентов \bar{a} , одновременно максимизирует точность предсказания значений функции отклика $S(x)$. D-оптимальное планирование методом «крутого восхождения» Г. Бокса и К. Уилсона использовано при разработке обобщенного алгоритма обоснования точности и периодичности наблюдений за деформациями сооружений [6].

Выводы по главе I

Резюмируя все вышесказанное в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Существуют три фазы деформации грунтов под фундаментом при нагрузке возрастающими ступенями: I-фаза уплотнения, II-фаза местных сдвигов, III – фаза выпирания, вследствие чего протекание осадки является функционально сложным и дифференцированным во времени процессом.

2. Процесс протекания осадки инженерных сооружений требует комплексного и дифференцированного подхода к методам его изучения.

3. Большой объем получаемой информации требует систематизации и соответствующих математических исследований для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на процесс деформации, с целью построения математической модели деформаций и последующего прогнозирования. Математическим аппаратом данных являются дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы.

4. Показанно, что в приведенном случае, дисперсионный анализ позволяет выяснить, являются ли совокупности наблюдений в разных циклах набором наблюдений одной нормально распределенной случайной величины или смесью наблюдений нормально распределенных случайных величин, различающихся только средними значениями.

Глава II. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДОК ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Математическое описание процесса деформации сооружения называется его моделированием. Моделирование деформации инженерного сооружения предполагает, с одной стороны, глубокое теоретическое изучение механизма сопутствующих явлений, с другой — правильно спланированный эксперимент (проведение геодезических наблюдений) для проверки гипотез относительно структуры модели осадки или планового смещения и оценки ее компонент (составляющих факторов, влияющих на данный процесс).

В этом случае целесообразно выбранный нами объект исследований представить структурной схемой (рис. 3).

Все множество параметров, определяющих состояние выбранного нами объекта, на данной схеме разбито на 6 групп:

1. Входные переменные $x = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$. В эту группу объединены контролируемые и управляемые параметры (время наблюдений, число осадочных марок и т.д.).

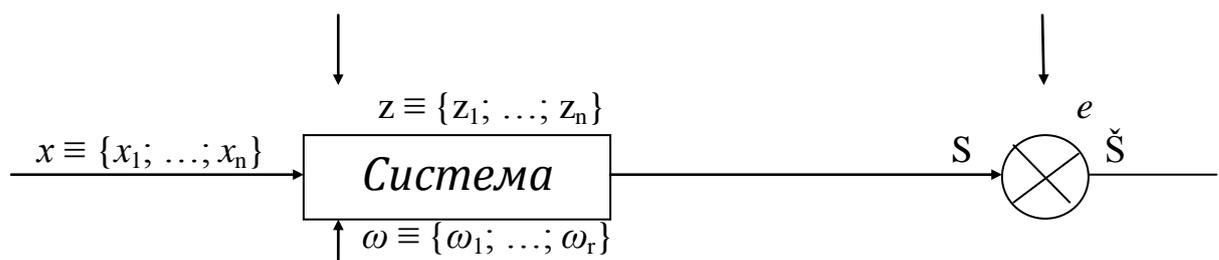


Рис. 3. Структурная схема объекта исследований

2. Контролируемые, но неуправляемые параметры $z = \{z_1; z_2; \dots; z_k\}$. В данную группу входят параметры, величины которых можно измерить, но не изменить (состояние окружающей среды и т.д.).

3. Неконтролируемые параметры $\omega = \{\omega_1; \omega_2; \dots; \omega_r\}$. В эту группу входят определенные возмущающие воздействия, имеющие

временный характер, неизвестные точки приложения и интенсивность воздействия.

4. Выходная величина S – осадка сооружения (количественная характеристика выходной переменной выбранного объекта).

5. Приложенный аддитивный шум e , отнесенный к выходу объекта [ошибки геодезических измерений $e \in N(0, \sigma^2)$].

6. \check{S} - выходная характеристика всей системы (измеряема величина осадки сооружения).

Деформации сооружений (осадки и плановые смещения) относятся к процессам динамическим, т. е. изменяющимся во времени и в выбранной системе координат. К тому же деформации сооружений — явления многофакторные, являющиеся результатами многочисленных воздействий.

В данной главе изложены вопросы построения модели осадок сооружений и прогноза ее значений во времени.

Цель моделирования — нахождение вероятностной модели динамического процесса — осадки сооружения, оптимальной в смысле заданного критерия, т. е. определения функционала (в общем виде)

$$\check{S} = S[x(t)] + F_1(z) + F_2(\omega) + e, \quad (2.1)$$

где $x(t)$ — влияние основного фактора на процесс осадки (одного или в общем случае нескольких); $F_1(z)$ — влияние контролируемых параметров; $F_2(\omega)$ — влияние неконтролируемых параметров.

Уравнение (2.1) представляет собой регрессионное уравнение для построения которого необходимо получить функциональные зависимости $S[x(t)]$, $F_1(z)$ и $F_2(\omega)$. Такое решение является общим. Для большинства же случаев фактор $x(t)$ — значимо доминирующий (например, в период строительства сооружений — приложенный вес и время; в начальный период эксплуатации — время) поэтому зачастую модель осадки может быть представлена в виде $S = S[x(t)]$,

причем в период строительства $x(t)=(P, t)$, где P — приложенная нагрузка, а в период эксплуатации $x(t)=t$. Важным в теории и практике моделирования является понятие «объем предыстории». Под объемом предыстории по отношению к $(n+1)$ -му циклу понимается вся информация об осадке, накопленная в n циклах.

Под прогнозированием понимается вероятностное определение величины осадки $S(t_{n+1})$ во время t_{n+1} (время прогноза) с помощью модели, построенной по данным уже проведенных n циклов во времени t_1, t_2, \dots, t_n .

2. ОЦЕНКА РАСЧЕТНЫХ МЕТОДОВ ПРОГНОЗА ОСАДКИ СООРУЖЕНИЙ

Как мы уже отмечали, в последнее время в геодезической литературе уделяется достаточное внимание вопросам, связанным с проблемой интерпретации осадок инженерных сооружений с помощью аппаратов математического моделирования и прогнозирования. Это связано с тем, что результаты прогноза (прогнозируемые значения осадок и предельные погрешности их определения) являются величинами, непосредственно влияющими на формируемые точность и периодичность последующих геодезических наблюдений (что будет рассмотрено ниже).

В работе [31] показано, что значения осадок инженерных сооружений различного класса в условиях упрощенной схемы равномерного распределения уплотняющих давлений по глубине можно прогнозировать с помощью выражения

$$S_{t_i} = S_K(1 - e^{-a_{cp} t_i}), \quad (2.2)$$

где S_{t_i} — значение прогнозируемой осадки во времени t_i , S_K — конечная осадка сооружения от приложенной нагрузки ($P=P_{max}$); a_{cp} — средний коэффициент относительной сжимаемости грунта.

Здесь конечная осадка S_K может теоретически определяться двумя

методами [31]:

1) методом эквивалентного слоя

$$S_K = A\omega b a_{cp}(P_H - \gamma h), \quad (2.3)$$

где $A\omega$ — коэффициент эквивалентного слоя; b — ширина фундамента сооружения; P_H — среднее давление по подошве фундамента сооружения; γ — объемная масса грунта в пределах глубины заложения фундамента h от поверхности;

2) методом послойного суммирования

$$S = 0,8 \sum_{i=1}^n h_i \frac{1}{E_{0i}} P_i, \quad (2.4)$$

где h_i — мощность i -го слоя в пределах активной зоны; E_{0i} — модуль общей деформаций i -го слоя; n — число слоев, на которые разбивается активная зона; P_i — средняя интенсивность вертикального давления в i -м слое под центром подошвы фундамента $0,8$ — коэффициент, корректирующий упрощенную схему расчета.

В случае расчета конечной осадки по методу эквивалентного слоя [формула (2.3)] выражение для прогнозируемой осадки (2.2) примет вид

$$St_i = A\omega b a_{cp} (P_H - \gamma h)(1 - e^{-a_{cp} t_i}). \quad (2.5)$$

В случае расчета величины конечной осадки по методу послойного суммирования выражение для прогнозируемой осадки представится в следующем виде:

$$St_i = 0,8 (1 - e^{-a_{cp} t_i}) \sum_{i=1}^n h_i 1/E_{0i} P_i \quad (2.6)$$

Как видно из формул (2.5) и (2.6), величины прогнозируемых осадок, кроме времени t_i , зависят и от следующих характеристик отображающих физико-механические свойства грунта: коэффициента относительной сжимаемости грунта a_{cp} ; объемной массы грунта γ ; модуля общей деформации i -го слоя E_{0i} . Отметим, что в общем случае перечисленные величины могут быть коррелированными. Для изучения степени их взаимного влияния необходимо проводить специальные исследования. В

дальнейшем априори будем их считать независимыми.

Оценим точность определения величины прогнозируемой осадки методом эквивалентного слоя, для чего дифференцируем выражение (2.5) по переменным a_{cp} и γ , предварительно преобразовав его следующим образом:

$$St_i = A\omega b a_{cp} P_H - A\omega b a_{cp} \gamma h (1 - e^{-a_{cp} t_i}) = A\omega b a_{cp} P_H - \\ - A\omega b a_{cp} P_H e^{-a_{cp} t_i} - A\omega b a_{cp} \gamma h + A\omega b a_{cp} \gamma h e^{-a_{cp} t_i}.$$

Тогда выражение дисперсии прогнозируемой осадки St_i будет иметь вид

$$\sigma_{St_i}^2 = (A\omega b P_H - A\omega b P_H e^{-a_{cp} t_i} + A\omega b a_{cp} P_H e^{-a_{cp} t_i})^2 \sigma_{a_{cp}}^2 + \\ + (A\omega b a_{cp} h e^{-a_{cp} t_i} - A\omega b a_{cp} h)^2 \sigma_{\gamma}^2 + (-A\omega b \gamma h + A\omega b \gamma h e^{-a_{cp} t_i} - A\omega b a_{cp} \gamma h t_i e^{-a_{cp} t_i})^2 \\ \sigma_{a_{cp}}^2 = \\ = A^2 \omega^2 b^2 (P_H - P_H e^{-a_{cp} t_i} + a_{cp} P_H t_i e^{-a_{cp} t_i} - \\ - \gamma h + \gamma h e^{-a_{cp} t_i} - a_{cp} \gamma h t_i e^{-a_{cp} t_i})^2 \sigma_{a_{cp}}^2 + A^2 \omega^2 b^2 (a_{cp} h e^{-a_{cp} t_i} - a_{cp} h)^2 \sigma_{\gamma}^2$$

или

$$\sigma_{St_i} = A\omega b \sqrt{(P_H - P_H e^{-a_{cp} t_i} + a_{cp} P_H t_i e^{-a_{cp} t_i} - \gamma h + \\ + \gamma h e^{-a_{cp} t_i} - a_{cp} \gamma h t_i e^{-a_{cp} t_i})^2 \sigma_{a_{cp}}^2 + a_{cp}^2 h^2 (1 - e^{-a_{cp} t_i})^2 \sigma_{\gamma}^2} \quad (2.7)$$

Для приближенной оценки двух методов прогноза проведем оценку точности прогноза осадки сооружений по методу послойного суммирования. Для этого продифференцируем выражение (2.6) по переменным a_{cp} и E_{oi} , предварительно преобразовав его с учетом того, что модуль деформации i -го слоя связан с удельной и объемной массами следующим соотношением:

$$E_{oi} = A \frac{(1 + \varepsilon_0)(P_{i+1} - P_i)}{\varepsilon_i - \varepsilon_i + I} \quad (2.8)$$

где $\varepsilon = (\gamma - \delta) / \delta$, δ - удельная масса грунта.

В.И. Гладкий в работе [11] показал, что среднее квадратическое отклонение конечной осадки (2.4) можно определить из выражения

$$\sigma_{S_k} = \frac{0.8 P_H h \sqrt{2}}{A [P_H (1 - a_{cp}) - a_{cp} P \delta]} \sqrt{[(\sigma_{\delta} / \delta)^2 + (\sigma_{\gamma} / \gamma)^2]}, \quad (2.9)$$

где P_δ - природное давление в грунте в горизонтальном сечении, расположенном на глубине ниже подошвы фундамента.

Тогда искомая величина дисперсии определения осадки сооружения по методу послойного суммирования примет вид

$$\sigma_{Sti}^2 = (1 + e^{-2a_{cp} t_i}) \sigma_{sk}^2 + S_{kt_i}^2 e^{-2a_{cp} t_i} \sigma_{acr}^2$$

или с учетом формулы (2.9)

$$\sigma_{Sti} = \sqrt{(1 + e^{-2a_{cp} t_i})^2 A^2 [P_n (1 - a_{cp}) - a_{cp} P_\delta]^2 [(\sigma_\delta/\delta)^2 + (\sigma_\gamma/\gamma)^2] + S_{kt_i}^2 e^{-2a_{cp} t_i} \sigma_{acr}^2} \quad (2.10)$$

Для сравнительной оценки точности прогноза по двум вышеизложенным способам представляется небезынтесным рассмотреть отношения σ_{Sti} / S_{t_i} (табл.3), являющиеся относительными ошибками определения прогнозируемого значения осадки.

Данные табл. 3 получены при следующих условиях:

$$\gamma h = 0,5; \quad \sigma_{acr}/a_{cp} = \sigma_\delta/\delta = \sigma_\gamma/\gamma = 1/10, \quad h=10 \text{ м.}$$

Как видно из табл. 3, стандартное отклонение величины прогнозируемой осадки только по данным геологических и гидрогеологических измерений равна в лучшем случае утроенному значению прогнозируемой осадки, что доказывает необходимость привлечения дополнительной информации (результатов геодезических наблюдений) о процессе осадки сооружения для построения математической модели осадки и последующего прогнозирования. Метод послойного суммирования, как априори наиболее точный из двух изложенных, может быть рекомендован для приближенной предварительной оценки величины конечной (стабилизированной) осадки.

Оценка точности прогноза осадки по результатам геологических изысканий

Удельное давление p_n , Па	Время наблюдений	Метод									
		эквивалентного слоя					послойного суммирования				
		Коэффициент a_{cp}									
		0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7
$1,53 \cdot 10^3$	0,2	36,7	36,9	37,0	37,0	37,1	2,3	2,6	2,9	3,1	3,2
	0,5	23,5	23,7	23,8	23,9	24,1	3,3	3,7	3,9	4,1	4,2
	1,0	16,9	17,1	17,3	17,5	17,8	4,1	4,2	4,3	4,2	4,2
	1,5	14,1	14,3	14,5	14,8	15,0	4,3	4,2	4,1	3,7	3,6
	2,0	12,3	12,6	12,9	13,2	13,4	4,3	4,0	3,7	3,3	2,9
$2,04 \cdot 10^3$	0,2	31,8	31,9	32,0	32,1	32,2	2,3	2,6	2,9	3,1	3,2
	0,5	20,4	20,4	20,6	20,7	20,8	3,3	3,7	3,9	4,1	4,2
	1,0	14,7	14,8	15,0	15,2	15,3	4,1	4,2	4,3	4,2	4,2
	1,5	12,2	12,3	12,6	12,8	12,9	4,3	4,2	4,1	3,9	3,6
	2,0	10,7	10,9	11,2	11,4	11,6	4,3	4,0	3,7	3,3	2,9
$2,55 \cdot 10^3$	0,2	28,4	28,5	28,6	28,7	28,7	2,3	2,6	2,9	3,1	3,2
	0,5	18,2	18,3	18,4	18,5	18,6	3,3	3,7	3,9	4,1	4,2
	1,0	13,1	13,2	13,4	13,5	13,7	4,1	4,2	4,3	4,2	4,2
	1,5	10,8	11,1	11,2	11,4	11,6	4,2	4,2	4,1	3,9	3,6
	2,0	9,5	9,8	10,0	10,2	10,4	4,2	4,0	3,7	3,3	2,9

3. ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДКИ В ПЕРИОД СТРОИТЕЛЬСТВА

Для объективного суждения о ходе осадки сооружения геодезические наблюдения обычно планируются таким образом, чтобы начальный цикл наблюдений выполнялся непосредственно после установки первых фундаментных блоков (начальный этап периода строительства). В дальнейшем, с целью изучения хода осадки в период строительства сооружения, геодезические наблюдения за осадками проводятся в различные стадии строительства, причем наблюдения часто состоят из последовательно выполняемых трех-четырех, а то и более циклов. В этом случае осадка сооружений является функцией в основном двух факторов – приложенной нагрузки P_i и времени t_i :

$$S = S(P, t).$$

Рассмотрим рациональный прием прогнозирования осадок с целью назначения точности и периодичности геодезических наблюдений в стадии строительства сооружений.

В работе [5] показаны принципы динамического (т. е. по результатам выполненных циклов наблюдений) прогнозирования осадок сооружения в период его строительства, сущность которого состоит в следующем. После проведения первого цикла наблюдений строится график изменения осадки во времени (рис. 4, прямая ab). Затем линейной экстраполяцией определяется ожидаемая осадка на дальнейший период (линия bb') и при некотором, заранее заданном значении времени $t_{\text{прогн}}$ определяется значение ожидаемой осадки S' .

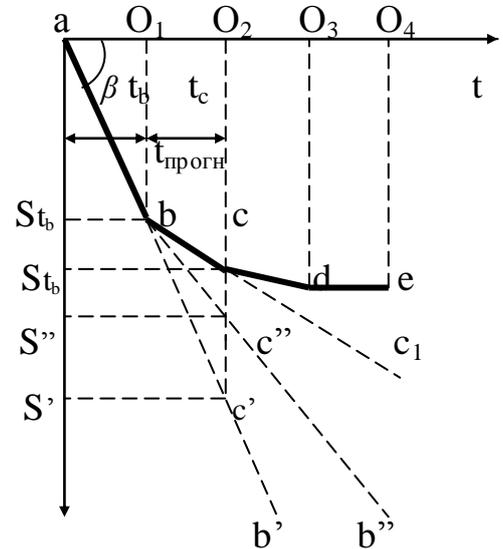


Рис. 4. График изменения осадки во времени

После выполнения наблюдений экстраполированная часть графика (линия bb') заменяется фактической (линии bc , cd , de). Затем аналогично определяются ожидаемые осадки на последующий период (линии cc') и т.д.

Как видно из рис. 4, формальное выполнение рекомендаций, изложенных в работе [5], может привести к значительной погрешности в величине прогнозируемой осадки (отрезок $\Delta S''c' — c$). На наш взгляд, это связано с тем, что в данном случае при прогнозировании не учитываются: 1) стадия строительства сооружения выраженная в данном случае отношением уже приложенной нагрузки q к проектной Q ; 2) интенсивность сжимаемости грунта выраженная коэффициентом относительной сжимаемости a_{cp}).

Для учета данных параметров представляется рациональным при использовании динамического прогнозирования экстраполировать прямую ab до c не прямой линией abb' , а изменять наклон прямой ab к оси абсцисс на величину ε :

$$\varepsilon = \frac{Q - q}{Q} \operatorname{arctg} a_{cp}, \quad (2.11)$$

и получать ломаную линию abb'' .

В этом случае прогнозируемое значение осадки будет находиться на пересечении прямых bb'' и o_2c' и погрешность прогноза будет равна отрезку $(c''c)$, меньшему, чем отрезок $c's$.

Определим функциональный вид выражения, определяющим степень уменьшения погрешности прогнозирования в связи с изменением наклона прямой на величину (2.11).

Значение прогнозируемой осадки S в случае линейной экстраполяции отрезка ab будет

$$S' = S t_b + t_{\text{прогн}} / \operatorname{ctg} \beta. \quad (2.12)$$

Значение же прогнозируемой осадки S'' в случае изменения наклона прямой на величину (2.11) будет иметь вид

$$S'' = S t_b + t_{\text{прогн}} / \operatorname{ctg}(\beta - \varepsilon). \quad (2.13)$$

Тогда, принимая $S_{i+1} \geq S_i$, погрешность прогнозирования численно уменьшится на величину

$$\Delta S' - \Delta S'' = S' - S'' = t_{\text{прогн}} / \operatorname{ctg} \beta - t_{\text{прогн}} / \operatorname{ctg}(\beta - \varepsilon) = t_{\text{прогн}} [S t_b / t_b - \operatorname{tg}(\beta - \varepsilon)]. \quad (2.14)$$

Дальнейшее (после проведения двух-трех циклов наблюдений строительный период) применение графоаналитического динамического прогнозирования, на наш взгляд, нерационально по двум причинам: 1) из-за наличия графических погрешностей и 2) не возможности использования уже имеющейся, хотя и относительно небольшой, предыстории прогноза.

После проведения трех первых циклов наблюдений и обработки их результатов появляется возможность математического моделирования хода осадки сооружения сначала в зависимости времени, а затем, после проведения еще нескольких циклов (накопления информации) и выявления значимых факторов, в зависимости и от них.

4. МОДЕЛИРОВАНИЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСАДКИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

Наблюдения за осадкой сооружения, как правило, начинают с начала его возведения и продолжают весь строительный период. Для большинства крупных инженерных сооружений наблюдение за осадками проводятся и в эксплуатационный период. Причем если наблюдения за осадкой не проводились с начала возведения фундамента сооружения, то возникает необходимость в учете при исследованиях так называемой «упрощенной осадки», методика определения которой изложена в труде А. В. Пилягина [21].

В общем виде осадка сооружения есть результат воздействия различных факторов и ее модель имеет вид

$$\check{S} = S[x(t)] + F_1(z) - F_2(\omega) + e.$$

Осадку сооружения практически всегда имеет доминирующий фактор, обозначаемый в формуле (2.1) как $x(t)$. Поэтому, прежде чем перейти к рассмотрению способов построения модели общего вида (2.1), рассмотрим построение модели осадки как следствие только влияния доминирующего фактора, в частности времени t_i .

Предположим, что рассматриваемый объект (осадка сооружения) имеет один вход — время t_i и один выход — величину осадки $S(t_i)$, аддитивно с которым приложен шум $e(t_i)$. В этом случае у наблюдателя фиксированы время t_i и $\check{S}(t_i)$ — уравненное значение осадки отдельной марки, установленной на какой-либо конструкции сооружения.

Относительно самого объекта (модель которого определяется)

предположим, что его структура (а следовательно, и характеристики) существенно не меняется в течение времени, необходимого для моделирования. Совершенно очевидно, что в такой ситуации невозможно однозначно получить детерминированную модель осадки сооружения.

Вопрос может быть поставлен только о конструировании некоторого оператора

$$S = S(t), \quad (2.15)$$

адекватно описывающего влияние времени t_i на статистические характеристики процесса $\check{S}(t)$.

Таким образом, вопрос стоит о построении некоторой стохастической модели данной динамической системы — осадки сооружения.

Известно, что наиболее распространенными моделями являются регрессионные. Перейдем к их рассмотрению.

Вопросы моделирования и прогнозирования осадки инженерных сооружений в период их эксплуатации достаточно хорошо изучены в случае производства геодезических наблюдений через равные промежутки времени в трудах А.Н.Гридина [13, 14], в которых предлагается для прогнозирования использовать степенной полином вида

$$St_{n+1} = a_0 + a_1 t_{n+1} + a_2 t_{n+1}^2 + \dots + a_k t_{n+1}^k, \quad (2.16)$$

где a_p ($0 \leq p \leq k$) — коэффициенты полинома, t_{n+1} — время прогноза

В работе [14] показано, что в случае равенства промежутков времени между циклами ($t_1 = t_2 = \dots = t_i = t$) и ограничения для целей прогнозирования параболой 8-й степени полином (2.16) представляется в виде полинома Лагранжа

$$St_i = \sum_{i=1}^8 P_i t^i \quad (2.17)$$

где P_i - коэффициенты, зависящие от величин протекающих осадок предшествующих прогнозированию, и от числа проведенных наблюдений k , причем вектор \bar{P} равен произведению матриц.

$$P = \begin{pmatrix} P_0 \\ P_1 \\ P_2 \\ P_3 \\ P_4 \\ P_5 \\ P_6 \\ P_7 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} +1 & -1 & +2 & -6 & +24 & -120 & +20 & -5040 \\ 0 & +1 & -3 & +11 & -50 & +274 & +1764 & +13068 \\ 0 & 0 & +1 & -6 & +35 & -225 & +1624 & -13132 \\ 0 & 0 & 0 & +1 & -10 & +85 & -735 & +6769 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -15 & +175 & -1960 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -21 & +322 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 & -20 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & +1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} B_0 \\ B_1 \\ B_2 \\ B_3 \\ B_4 \\ B_5 \\ B_6 \\ B_7 \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

B_i – коэффициент, определяемые из следующего соотношения

$$B_i = \frac{S_{k-1}}{k!} - \sum_{j=1}^k \frac{B_j}{(k-j)!} \quad (2.19)$$

Отметим, что предлагаемый в работе [14] метод прогнозирования базируется на построении модели (2.16), причем степень полинома k назначается на единицу меньшей числа проведенных циклов наблюдений, а именно $i = k - 1$. Коэффициенты полинома a_p ($0 \leq p \leq k$) определяются из решения системы уравнений вида

$$\bar{t}_{n+1, 1} * \bar{a}_{i+1, 1} - \check{S}_{k+1, 1} = 0 \quad (2.20)$$

где

$$t = \begin{pmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & \dots & t_0^k \\ 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & t_n^2 & \dots & t_n^k \end{pmatrix}_{n+1, k+1} \quad \text{- матрица периодов определения осадки (периодичности наблюдений),}$$

$$\bar{a} = \begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ \vdots \\ a_k \end{pmatrix}_{k+1, 1} \quad \text{- матрица коэффициентов,}$$

$$\check{S} = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}_{n+1, 1} \quad \text{- матрица осадок, полученных в результате наблюдений в узлах,}$$

$$t = \begin{pmatrix} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}_{n+1, 1}$$

Откуда искомый вектор коэффициентов \bar{a}_p

$$\bar{a} = \bar{t}^{-1} \check{S} \quad (2.21)$$

Иллюстрируем применение данной методики построением модели осадок некоторых марок Талимарджанской ГРЭС.

Значения осадок марок трубы № 1 в 16 циклах представлены в табл. 4

Выполним построение модели осадки и прогноз ее значений по методике, изложенной в работе [14]; причем объем предыстории (количество циклов, по результатам которых выполняется прогноз) будем изменять от 3 до 7 (степень полинома изменяется соответственно от 2 до 6).

Таблица 4

Значения осадок марок трубы № 1 Талимарджанской ГРЭС

Дата наблюдений	Время наблюдений t_i , год	Значение осадок S_i , мм					
		Номера марок					
		1	2	3	4	5	6
24.04.2009	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
10.07.2009	0,2	3	3	3	- 3	4	4
01.02.2010	0,7	14	8	7	10	17	18
10.07.2010	1,1	30	25	22	24	30	32
25.10.2010	1,4	34	30	27	28	33	35
24.04.2011	1,9	35	32	30	.30	34	36
17.06.2011	2,2	35	32	30	30	34	36
28.07.2011	3,1	35	30	31	35	35	37
16.08.2011	3,4	36	33	31	32	36	38
15.09.2011	4,4	39	36	34	35	40	41
12.10.2011	5,5	41	37	35	36	40	43
27.11.2011	6,5	42	38	36	38	42	44
12.06.2012	7,1	43	38	36	38	42	44
24.08.2012	8,3	43	40	38	39	44	46
28.09.2012	10,3	45	41	39	40	45	47
17.10.2012	10,5	45	41	39	40	45	47

Составляющие вектора a_k модели осадки марки № 1 при $3 \leq k \leq 7$ вынесены в табл. 5. Здесь же получены величины прогнозируемых значений осадок $S_{\text{прогн}}$ по формуле (2.16) и вычислены разности

$$\Delta = S_{\text{изм}} - S_{\text{прогн}}$$

Таблица 5

Оценка точности прогноза осадки при $p = k - 1$

Номер цикла	S_i	к	р	a_k	$S_{\text{прогн}}, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$
1	3	3	2	1,4	-	-
2	14	-	-	4,00	-	-
3	30	-	-	19,99	-	-
4	34	-	-	-	46,2	-12,
5	35	-	-	-	81,2	-46,
6	35	-	-	-	107,0	-72,
7	35					
8	36					
9	39					
10	41					
11	42					
12	43					
13	43					
14	45					
15	45					

Таблица 6

Оценка точности прогноза осадки при $p = k - 1$ ($k = 4, 5, 6, 7$)

к	р	a_k	$S_{\text{прогн}}, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$	к	р	a_k	$S_{\text{прогн}}, \text{мм}$	$\Delta, \text{мм}$	№п/п
4	3	8,8	2,2	32,8	5	4	1,5	53,3	-18,3	1
		-50,71					120,16			2
		115,825					274,165			3
		-48,4126					-184,6333			4
							40,09248			5
							481,9			6
							-446,9			7
6	5	32,1	-269,0	304,0	7	6	18,5	8,3	27,4	1
		-243,38					-132,92			2
		585,447					328,287			3
		-521,5890					-274,6723			4
		204,76543					103,51521			5
		-29,846034					-17,097456			6
							0,8918441			7
							-534,9			8
	761,3	573,9								

Как видно из табл. 5, 6, погрешность прогнозирования изменяется в большом интервале и достигает значительных величин независимо от объема предыстории. Если же еще иметь в виду большой объем вычислительных работ, то применение

данного метода на практике следует, на наш взгляд, считать проблематичным.

Как уже было отмечено выше, выражение (2.17) справедливо лишь для наблюдений, в которых соблюдается равенство времени между циклами, т.е. $t_1=t_2=t_3= \dots =t_{k-1}=t_k = t$. Поэтому представляется необходимым оценить погрешность прогнозирования осадки по формуле (2.17) с условием, что наблюдения проводились с неравномерностью во времени, равной Δt . Например, допустим, что период предыстории прогноза равен четырем циклам (рис.5) и необходимо определить значение осадки в пятом цикле S_{t_5} . Тогда выражение (2.17) примет вид

$$S_{t_5} = P_0 + 5P_1 + 25P_2 + 125P_3,$$

или, используя коэффициенты вектора P (2.18),

$$S_{t_5} = B_0 + 4B_1 + 12B_2 + 24B_3, \quad (2.22)$$

где

$$\left. \begin{aligned} B_0 &= S'_1; & B_1 &= S'_2 - S'_1; \\ B_2 &= 1/2S'_3 - S'_2 + 1/2S'_1; & B_3 &= 1/3S'_4 - \\ & & & - 1/2S'_3 + 1/6S'_1. \end{aligned} \right\} \quad (2.23)$$

Получим изменения коэффициентов (2.23) как следствие проходной неравномерности Δt , в результате которой из наблюдений получены значения осадок S'_1, S'_2, S'_3, S'_4 ,

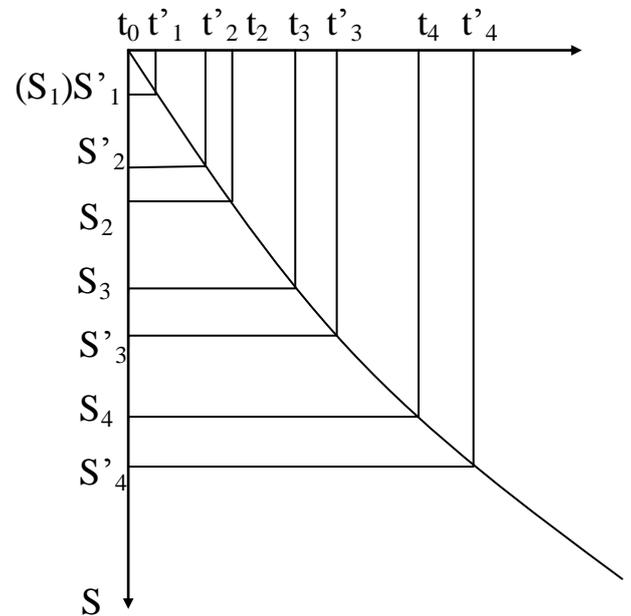


Рис. 5. График изменения осадки со временем

вместо S_1, S_2, S_3, S_4 ,

откуда

$$\Delta S'_i = S_i + \Delta S_1, \quad \Delta S! = 0. \quad (2.24)$$

С известным приближением можно считать, что приращение осадок происходят по закону

$$\Delta S_i = (S_i - S_{i-1}) \frac{t^2_i - t_i}{t^2_i - t^2_{i-1}} = \Delta t (S_i - S_{i-1})/t. \quad (2.25)$$

Тогда, с учетом формул (2.24) и (2.25), выражение (2.22) примет вид

$$S_{t5} + \Delta S_5 = B_0 + 4(B_1 + \Delta B_1) + 12(B_2 + \Delta B_2) + 24(B_3 + \Delta B_3)$$

или

$$\Delta S_5 = 4\Delta B_1 + 12\Delta B_2 + 24\Delta B_3,$$

где ΔB_i — изменение коэффициента B_i вследствие изменения величин осадок (2.24).

Нами было показано, что коэффициенты B_i претерпевают изменения на величины

$$\begin{aligned} \Delta B_1 &= \Delta S_2 \Delta t / t, & \Delta B_2 &= \Delta S_3 \Delta t / 2t - \Delta S_2 \Delta t / t, \\ \Delta B_3 &= \Delta S_4 \Delta t / 6t - \Delta S_3 \Delta t / t. \end{aligned} \quad (2.26)$$

Априори величина осадки может определяться по формуле (2.2). Раскладывая выражение (2.2) в ряд Тейлора, запишем

$$\Delta S_3 \approx \Delta S_2 (1 - a_{cp}), \quad \Delta S_4 \approx \Delta S_2 (1 - a_{cp})^2, \quad (2.27)$$

откуда искомая погрешность прогнозирования осадки вследствие исходной неравномерности наблюдений Δt будет записана в виде

$$\Delta S_5 = |S_2 (10 + 24a_{cp}^2 - 42a_{cp})| \Delta t^2 / t^2. \quad (2.28)$$

Как видно из уравнения (2.28), погрешность прогноза осадки по формуле (2.17) прямо пропорциональна квадрату неравномерности наблюдений в циклах предыстории прогноза.

Выражение (2.28) позволяет определять допустимую величину неравномерности наблюдений при прогнозировании осадок с помощью

методики, описанной в работе А. Н. Гридчина [14],

$$\Delta t = t \sqrt{\Delta S/S_2 |10 - 42a_{cp} + 24a_{cp}^2|}. \quad (2.29)$$

Из выражения (2.29) видно, что для получения 10%-ной погрешности в величине прогнозируемой осадки с помощью вышеизложенной методики необходимо проводить наблюдения с неравномерностью во времени не более 2%. Это вторая, теперь уже организационного порядка трудность, с которой приходится сталкиваться, применяя для построения модели осадки методику, изложенную в работе А. Н. Гридчина [14].

При построении и исследовании модели осадки встает вопрос — какой должен быть объем предыстории, чтобы обеспечить заданную точность прогноза?

Для определения необходимого объема предыстории прогноза проведем оценку погрешности полинома Лагранжа, принимаемого за основу модели, при экстраполяции параболы степени k на интервале $k - (k+1)$.

В работе [27] показано, что остаточный член интерполяционной формулы Лагранжа применительно к осадкам сооружений наводится на выражение

$$\Delta S = S_{t_{k+1}} - S_{t_k} = \frac{\max_{0 \leq t \leq t_k} |f^{(k+1)}(t)|}{(k+1)!} \left| \prod_{i=1}^{k-1} (t - t_i) \right|, \quad (2.30)$$

где $f^{(k+1)}$ — $(k+1)$ -я производная полинома на интервале $0 \leq t \leq t_k$.

В линейной форме полином Лагранжа примет вид [в обозначениях (2.17)]

$$S_{t_k} = P_0 + P_1 t + P_2 t^2 + \dots + P_{k-1} t^{k-1} \quad (2.31)$$

Определим $(k+1)$ -ю производную на интервале $0 \leq t \leq t_k$:

$$\begin{aligned} f'' &= P_1 + 2P_2 t + 3P_3 t^2 + \dots + (k-1)P_{k-1} t^{k-2}, \\ f''_t &= 2P_2 + 6P_3 t + \dots + (k-1)(k-2)P_{k-1} t^{k-3}, \\ f'''_t &= 6P_3 + \dots + (k-1)(k-2)(k-3)P_{k-1} t^{k-4}, \\ &\dots \\ f^{(k-1)}_t &= (k-1)(k-2) \dots (k-k+1)P_{k-1} t^{k-(k-1+1)}, \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} f_t^{(k)} &= (k-1)(k-2)\dots(k-k)P_{k-1}t^{k-(k-1+1)}=0, \\ f_t^{(k+1)} &= 0. \end{aligned}$$

Откуда максимальная производная полинома (2.31) на интервале $0 \leq t \leq t_k$ есть $(k-1)$ -я производная

$$\begin{aligned} \max_{0 \leq t \leq t_k} |f^{(k+1)}(t)| &= f_t^{(k-1)} = \\ &= (k-1)(k-2)\dots(k-k+1)P_{k-1} = \frac{k!}{k} P_{k-1} \end{aligned} \quad (2.32)$$

С учетом формулы (2.32) выражение погрешности прогнозирования (2.30) примет вид

$$\begin{aligned} \Delta S &\leq \frac{\max_{0 \leq t \leq t_k} |f^{(k+1)}(t)|}{(k+1)!} \left| \prod_{i=1}^{k-1} (t-i) \right| \leq \frac{k!}{k(k+1)!} P_{k-1} \left| \prod_{i=1}^{k-1} (t-i) \right|, \text{ т.е.} \\ \Delta S &\leq \frac{P_{k-1}}{k(k+1)} \left| \prod_{i=1}^{k-1} (t-i) \right|. \end{aligned} \quad (2.33)$$

Выражение (2.33) позволяет оценить объем предыстории k с учетом использования результатов наблюдений для целей прогнозирования осадок инженерных сооружений по заданной предельной погрешности прогноза ΔS .

При построении модели осадки по методике, описанной в работе [14], принимали исходные данные при прогнозировании осадок с помощью построенных интерполяционных полиномов (полученные из обработки результатов наблюдений значения осадок безошибочными, чего практически не бывает. Кроме того, построение аналитической модели осадки сооружения при значительном числе проведенных циклов наблюдений («узлов интерполяции») является довольно сложной вычислительной задачей.

Эти трудности до некоторой степени устраняются, если строить модель осадки сооружения с помощью аппроксимированных выражений: как степенных полиномов, так и тригонометрических рядов. Здесь и далее

под аппроксимированной моделью будем принимать среднеквадратическое приближение модели к значению осадок, полученным из обработки результатов наблюдений (приближение по МНК) .

Пусть проведены геодезические наблюдения с периодичностью

$$t = \begin{pmatrix} t_0 \\ t_1 \\ t_2 \\ \vdots \\ t_n \end{pmatrix}_{n+1,1}$$

в результате которых получены значения осадок сооружения

$$S = \begin{pmatrix} S_0 \\ S_1 \\ S_2 \\ \vdots \\ S_n \end{pmatrix}_{n+1,1}$$

со средними квадратическими погрешностями

$$m = \begin{pmatrix} m_0 \\ m_1 \\ m_2 \\ \vdots \\ m_n \end{pmatrix}_{n+1,1}$$

Тогда модель осадки, описываемая полиномом, может быть представлена в виде (2.16).

В связи с тем, что значения осадок $S t_i$ имеют погрешности m_{S_i} и предполагая, что степень полинома $k < n$, правая часть системы (2.20) всегда будет содержать некоторый вектор уклонений $V_{n+1,1}$ отличный от нуль-вектора $0_{n+1,1}$ т. е.

$$\bar{t}_{n+1, k+1} * \bar{a}_{k+1,1} - \check{S}_{n+1,1} = V_{n+1,1}. \quad (2.34)$$

Условие $V^T V = \min$ позволяет составить систему нормальных уравнений

$$\bar{t}^T \bar{t} \bar{a} - \bar{t}^T \check{S} = 0 \quad (2.35)$$

решая которую получаем вектор искомых коэффициентов a_p , необходимых для построения полинома (2.16),

$$\bar{a} = (\bar{t}^T \bar{t})^{-1} - \bar{t}^T \check{S} \quad (2.36)$$

где

$$\bar{t} = \begin{pmatrix} 1 & t_0 & t_0^2 & \dots & t_0^k \\ 1 & t_1 & t_1^2 & \dots & t_1^k \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 1 & t_n & t_n^2 & \dots & t_n^k \end{pmatrix}_{n+1, k+1} \quad \text{- матрица степеней} \\ \text{периодичности наблюдений.}$$

Оптимальная для данной модели степень полинома k определяется из сравнения значимости изменения степени полинома p за единицу с помощью F-распределения Фишера

$$F_{0.95} = \frac{[v^2]_p - [v^2]_{p+1}}{\sigma_0^2}, \quad (2.37)$$

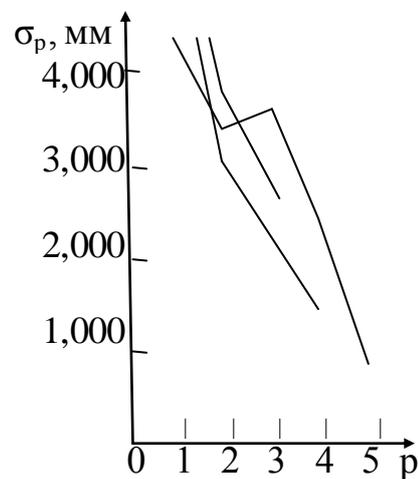


Рис.6. Графическое определение оптимальной степени полинома

где $[v^2]_p - [v^2]_{p+1}$ - разность суммы $[v^2]_p$, полученной при аппроксимации осадок полиномом степени p , и суммы $[v^2]_{p+1}$, полученной при аппроксимации осадок S_i полиномом степени $p + 1$, σ_0 — стандарт аппроксимации.

Проведем полиномиальную аппроксимацию и последующий прогноз осадки по данным табл. 4.

Полиномиальная аппроксимация значений осадок с последующей экстраполяцией проводится с различным объемом предыстории k .

На рис. 6 показано графическое определение оптимальной степени полинома в зависимости от объема предыстории. Оптимальными признаны степени (табл. 2.5) $P_5 = 3$ ($k=5$), $P_6=4$ ($k=6$), $P_7=2$ ($k=7$). Как видно из табл. 7, абсолютные ошибки, не превышающие 10 мм, характеризуют значимо больший интервал, а именно $[t_n, t_{n+2}]$.

Таблица 7

Оценки точности прогноза осадки по идентифицированной модели

№ п/п	S_i , мм	k	p	a_k	$S_{\text{прогн}}$, мм	Δ , мм
1	3	5	3	1,82	22,2 +21,5 -180,7	7,8 9,5 216,7
2	8			-2,984		
3	25			43,1493		
4	30			-17,07695		
5	32					
6	32					
7	32					
8	33					
9	36					
10	37					
11	38					
12	38					
13	40					
1		6	4	9,45	154,6 287,2	-119,6 -251,2
2				-59,281		
3				152,0701		
4				-94,67158		
5				18,276263		
6						
7						
1		7	2	-3,95		
2				35,789		
3				-7,6153		

4					29,7	6,3
5					26,1	7,9
6						
7					-37,5	78,5

Изложенная методика построения модели осадки принципиально проста. Однако с увеличением степени аппроксимирующего полинома p , во-первых, методика становится довольно громоздкой и, во-вторых, определитель матрицы нормальных уравнений (2.35) уменьшается, что сильно затрудняет решение уравнения (2.34). Например, если предположить, что значения t_i расположены приблизительно равномерно на интервале $0, 1$, то при больших n

$$- (\bar{t}^T \bar{t})r, \quad S = n \sum_{i=1}^n t_i^2 \bar{t}_r \overline{n = r + S + 1}$$

Поэтому матрица $(\bar{t}^T \bar{t})_{r,s}$ похожа на n -ю матрицу $[1/(r+S+1)]$, где $S = 0; 1; \dots; k$, которая является верхней угловой подматрицей размера $(k+1) \times (k+1)$ матрицы Гильберта

$$H = \begin{pmatrix} 1 & 1/2 & 1/3 & \dots \\ 1/2 & 1/3 & 1/4 & \dots \\ 1/3 & 1/4 & 1/5 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix}$$

Известно, что матрица H весьма плохо обусловлена. К тому же есть и более существенный недостаток, заключающийся в том что при последовательном увеличении степени аппроксимирующего полинома p на единицу необходимо определять не только еще один дополнительный коэффициент a_{p+1} но и заново вычислять другие коэффициенты полинома $a_0 - a_p$. Но эту трудность может преодолеть, используя при построении аппроксимирующей модели осадки метод ортогональных функций [27] с учетом, что обобщенный полином есть линейная комбинация определенных базисных функций

$$S(t) = b_0 \psi_0(t) + b_1 \psi_1(t) + \dots + b_k \psi_k(t) \quad (2.38)$$

Метод наименьших квадратов приводит к системе условий уравнений (2.34), но в данном случае вектор $S_{n+1, 1}$ - тот же, а вместо векторов \bar{t} и \bar{a} используются векторы \bar{X} и \bar{b} :

$$\bar{X} = \begin{pmatrix} \psi_0(t_0) & \psi_1(t_0) & \dots & \psi_k(t_0) \\ \psi_0(t_0) & \psi_1(t_0) & \dots & \psi_k(t_0) \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \psi_0(t_0) & \psi_1(t_0) & \dots & \psi_k(t_0) \end{pmatrix}_{n+1, k+1}$$

$$\bar{b} = \begin{pmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ \vdots \\ b_k \end{pmatrix}_{k+1, 1}$$

причем столбцами матрицы \bar{X} служат векторы $\psi_0(t_i); \dots; \psi_k(t_i)$, которые взаимно ортогональны. Поэтому произведение $\bar{X}^T \bar{X}$ имеет вид

$$\bar{X}^T \bar{X} = \begin{pmatrix} |\psi_0|^2 & & & & 0 \\ & |\psi_1|^2 & & & \\ & & |\psi_2|^2 & & \\ & & & \dots & \\ 0 & & & & |\psi_k|^2 \end{pmatrix}. \quad (2.39)$$

Следовательно, системе (2.35) матрица нормальных уравнений диагональна. Вектор ее свободных членов определяется обычным образом:

$$\bar{X}^T \bar{X} = \begin{pmatrix} \psi_0 & S_0 \\ \psi_1 & S_1 \\ \dots & \dots \\ \psi_k & S_k \end{pmatrix}_{k+1, 1}$$

Решение такой системы имеет вид

$$b_j = \frac{\psi_j S}{\psi_j^2} = \frac{\sum_{i=0}^n S_i \psi_j(t_i)}{\sum_{i=0}^n \psi_j^2(t_i)} \quad (j = 0, 1, 2, \dots, k). \quad (2.40)$$

Полученные коэффициенты (2.40) [коэффициенты Фурье функции $S(t)$ заданной ортогональной системы $\psi_j(t_i)$] получает построить

ортогональные полиномы П. Л. Чебышева

$$\psi_m(t) = t^m - \frac{[t^m \psi_{m-1}(t)]}{[\psi_{m-1}^2(t)]} \psi_{m-1}(t) - \frac{[t^m \psi_{m-2}(t)]}{[\psi_{m-1}^2(t)]} \psi_{m-2}(t) - \dots - \frac{[t^m \psi_0(t)]}{[\psi_0^2(t)]} \psi_0(t) \quad (m = 0, 1, 2, \dots, k) \quad (2.41)$$

Построение модели осадки с помощью ортогональных полиномов Чебышева рекомендуется производить в следующей последовательности: 1) назначается степень аппроксимирующего полинома p_1 (обычно $p_1 = 1$ или же, если использование табличных разностей или других методов позволяет выявить оптимальную степень полинома k , то $p_1 = k-1$); 2) составляются полиномы Чебышева $\psi_0(t); \psi_1(t); \dots; \psi_p(t)$; 3) по формулам (2.40) определяются коэффициенты Фурье b_0, b_1, \dots, b_p функции $S(t)$ относительно полиномов Чебышева; 4) искомым аппроксимирующим полиномом есть (2.38); 5) подсчитываются компоненты вектора уклонений V :

$$v_{i+1,1} = S_k(t_i) - S_i \quad i = 0; 1; \dots; n. \quad (2.42)$$

В дальнейшем исследование проводится по методике наименьших квадратов.

Построение модели осадки базируется на предположении, что процесс осадки сооружения в эксплуатационный период есть функция только времени t . Для статистической проверки данного предположения необходимо оценить значимость влияния на процесс осадки факторов различного характера.

Методика исследования влияния всех возможных факторов методами факторного анализа. Сейчас же рассмотрим методику построения модели осадки в том случае, если доминирующих факторов два. Здесь возможен следующий подход решения данной

задачи, основанный на использовании математического аппарата многофакторного дисперсионного анализа (1.43) — (1.48).

Пусть в период t_i получено значение осадки S_i со среднеквадратической ошибкой m_{S_i}

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_k; S_1, S_2, S_3, \dots, S_k; m_{S_1}, m_{S_2}, m_{S_3}, \dots, m_{S_k}$$

В общем случае для изучения значимости влияния различных факторов на осадку сооружения величины осадок необходимо расположить в определенной последовательности. Так, например табл. 8 построена для изучения одновременного действия на осадку двух факторов – ежегодно

Таблица 8

Двухфакторный дисперсионный анализ (общий вид)

Время года	Год наблюдений			
	1-й	2-й	...	к-й
Зима	S_{11}	S_{21}	...	S_{k1}
Весна	S_{12}	S_{22}	...	S_{k2}
Лето	S_{13}	S_{23}	...	S_{k3}
Осень	S_{14}	S_{24}	...	S_{k4}

изменения значения осадки (затухание осадки в эксплуатационный период) и изменения осадок под действием сезонного подъема уровня грунтовых вод.

Для проведения анализа необходимо определить оценки дисперсий рассматриваемых признаков и сравнить их с генеральной дисперсией с помощью F-критерия Фишера

Оценки дисперсий факторов «ежегодное изменение значения осадки» и «время года» определяются из следующих выражений:

$$m_{\text{год}}^2 = 4/(k - 1) \sum_{i=1}^2 (\check{S}_i - \bar{S})^2; \quad (2.43)$$

$$m_{\text{вр.года}}^2 = k/3 \sum_{j=1}^4 (\check{S}_j - \bar{S})^2 \quad (2.44)$$

где n - число наблюдений в год ($n=4$); $\check{S}_i = 1/4 \sum_{i=1}^4 \bar{S}_i$ — среднегодовые

значения осадок; $\check{S}_j = 1/k \sum_{j=1}^k S_j$ — средние значения осадок по строкам табл. 8; S - средние из всех значений осадок в рассматриваемый период.

Влияние факторов признается значимым, если на данном уровне значимости p выполняются неравенства

$$m_{\text{год}}^2 / m_0^2 > F_{1-p}, \quad (2.45)$$

где F - распределения Фишера берутся $f_1 = k - 1$ и $f_2 = 3(k - 1)$ степеней свободы, и

$$m_{\text{вр. года}}^2 / m_0^2 > F_{1-p}, \quad (2.46)$$

где F - распределения Фишера берутся $f_1 = 3$ и $f_2 = 3(k - 1)$ степеней свободы, а выражение для оценки генеральной дисперсии имеет вид

$$m_0^2 = 1/4k \sum_{i=1}^{4k} m_i^2 \quad i - 0; 1; \dots; k. \quad (2.47)$$

Иллюстрируем применение изложенной теории анализом материалов натуральных наблюдений, представленных в табл. 9.

Для изучения степени влияния на осадку сооружения одновременно факторов «изменение времени» и «время года» расположим значения осадок в определенной последовательности (табл. 10).

Для проведения анализа определим значение дисперсии фактора «время года»:

$$m_{\text{вр. года}}^2 = 3/3(0,0100+0,0196+0,0036+0,0225) = 0,0557$$

и дисперсионное отношение

$$\frac{m_{\text{вр. года}}^2}{m_0^2} = \frac{0,0557}{0,0210} = 2,6; \quad F_{0,95} = 4,3 \quad (f_1 = 3, f_2 = 6),$$

тогда следует, что $m_{\text{вр. года}}^2 / m_0^2 < F_{0,95}$.

Таким образом видим, что влияние сезонного изменения уровня грунтовых вод на осадку данного сооружения незначительно.

Таблица 9

Исходные данные для двухфакторного дисперсного анализа осадки сооружения

Время года	Осадки S_i , мм	Среднегодовая осадка S_{cp} , мм	Средние квадратические ошибки m_{Si} , мм	Оценки дисперсии m^2_{Si} , мм
2010 г.				
Зима	3,59	3,66	0,11	0,0121
Весна	3,46		0,17	0,0289
Лето	3,77	*	0,14	0,0196
Осень	3,81		0,19	0,0361
2011 г.				
Зима	3,73	3,84	0,14	0,0196
Весна	3,72		0,17	0,0289
Лето	3,87		0,10	0,0100
Осень	4,03		0,11	0,0121
2012 г.				
Зима	4,09	4,19	0,14	0,0196
Весна	4,11		0,15	0,0225
Лето	4,24		0,18	0,0324
Осень	4,32		0,10	0,0100

Таблица 10

Определение значимости фактора «время года» двухфакторным дисперсионным анализом

Время года	Год наблюдений			Итого
	2010	2011	2012	
Зима	3,59	3,73	4,09	3,80
Весна	3,46	3,72	4,11	3,76
Лето	3,77	3,87	4,24	3,96
Осень	3,81	4,03	4,32	4,05
Итоги	3,66	3,84	4,19	3,90

Изложенная методика построения и оценки модели позволяет определять значимость влияния на осадку сооружения различных факторов, имеющих периодический (в данном случае ежегодный характер). Поэтому в случае невыполнения неравенств (2.45) и (2.46) для построения модели осадки необходимо применить, аппарат тригонометрических рядов Фурье, причем результат тригонометрической

аппроксимации значений осадок S_i , полученных из обработки результатов натурных наблюдений за исследуемым сооружением, будет служить тригонометрический полином $S(t)$ вида

$$S(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{j=1}^{\infty} (a_j \cos jt + b_j \sin jt), \quad (2.48)$$

где $a_0, a_1, \dots, a_k, b_1, \dots, b_k$ – коэффициенты Фурье, определяемые согласно соотношениям

$$a_j = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \cos \frac{2j\pi t}{T} dt, \quad j = 0, 1; \dots$$

$$b_j = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} S(t) \sin \frac{2j\pi t}{T} dt, \quad j = 1, 2; \dots \quad (2.49)$$

Здесь T – период функции $S(t)$.

Известно, что периодические процессы рационально описывать гармонической функцией с ограниченным спектром вида

$$V_i = \sum_{k=1}^n a_k \cos kt + \sum_{k=1}^n b_k \sin kt.$$

где

$$n_{\max} = \frac{k}{2} - 1, \quad (2.50)$$

а k – объем предыстории (число уже проведенных циклов наблюдений).

Следует отметить, что при построении модели осадки с помощью тригонометрических полиномов желательно уменьшение числа n при том же k , что ведет к повышению надежности определения коэффициентов a_j и b_j . В противном случае, когда $n > \frac{k}{2} - 1$ возникает мимикрия частот и выделить их невозможно.

Определение наиболее надежных значений коэффициентов a_j и b_j выполняемое с помощью метода наименьших квадратов, представляет собой известное селективное преобразование для выделения периодической составляющей [23]. В результате определения коэффициенты a_j и b_j и их средние квадратические ошибки m_{a_j} и m_{b_j} , с помощью которых можно выделить амплитуду гармоники m_{cm} , ее

среднюю квадратическую ошибку m_{Cm} и фазу α_m

$$c_m = \sqrt{a_m^2 + b_m^2}; \quad \alpha_m = \arctg a_m/b_m;$$

$$m_{Cm} = \sqrt{\frac{a_m^2}{c_m^2} m_{am}^2 + \frac{b_m^2}{c_m^2} m_{bm}^2}. \quad (2.51)$$

После определения параметров модели необходимо перейти к их анализу с целью установления степени достоверности полученных результатов, который выполняется в следующей последовательности: 1) определяется значимость полученных амплитуд если $c_m \leq 2m_{cm}$, то данные значения амплитуд должны быть исключены из дальнейшего рассмотрения в связи с тем, что их невозможно отличить от погрешностей вычислений; 2) выявляются гармоники, описывающие процесс с данным периодом T : если

$$c_m \geq \sigma(\Delta_m) \sqrt{2/n}, \quad (2.52)$$

то данная гармоника действительно имеет период, равный T если же

$$c_m < \sigma(\Delta_m) \sqrt{2/n}, \quad (2.53)$$

то можно считать, что данная гармоника есть формальное описание аperiodического процесса.

Величина $\sigma(\Delta_m)$, входящая в выражения (2.52) и (2.53), определяется из соотношения

$$\sigma(\Delta_m) = \sqrt{\frac{\sum_{k=1}^m [c_m \sin(kt + \alpha_m)]^2}{n}}, \quad (2.54)$$

где n — число гармоник в разложении.

Построенная таким образом модель будет отражать влияние сложных периодических процессов на осадку сооружения, что позволит повысить точность прогнозирования величин ожидаемых осадок данного сооружения.

Таким образом, построение математической модели осадков (или планового смещения) — дело очень тонкое, требующее определенных навыков и знания «механики» процесса. Полиномиальная аппроксимация,

являющаяся по известной теореме Вейерштрасса базовым способом построения модели осадки, не всегда дает наилучшие результаты. Следует еще помнить и о вычислительной стороне этого дела. В идеале экспериментатору желательно иметь под рукой графики 10—15 законов (полиномы 3-7-й степени, экспонента и т. д.). В этом случае процесс построения оптимальной модели будет значительно упрощен - по виду графика подбирается модель, а затем уже, пользуясь теорией метода наименьших квадратов, определяют элементы модели. Так, например, осадки всех шести марок, установленных на трубах Талимарджанской ГРЭС, происходят по закону экспоненты

$$S(t_i) = S_k - S_k e^{-\text{act}_i}.$$

Это хорошо видно из графика, построенного по данным табл. 4. В этом случае даже матрица t имеет более простой вид (ее размерность $n \times 2$). Поэтому нет необходимости строить модель в виде полинома, а гораздо лучше ее построить в виде экспоненты.

Идеи полиномиальной аппроксимации универсальны, и их с успехом можно применять и при построении моделей иного вида. К тому же, самое главное — полиномиальная аппроксимация практически незаменима при построении модели по ограниченному объему предыстории.

5. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДА СТАБИЛИЗАЦИИ ОСАДОК ИНЖЕНЕРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

В процессе изучения осадок инженерных сооружений возникает необходимость в определении периода их стабилизации. Важность этого вопроса несомненна, так как от правильного его решения зависит и время корректировки методики наблюдений, и в конечном счете срок завершения всех геодезических наблюдений за состоянием сооружения.

Период стабилизации осадки — это на практике время t_i цикла i начиная с которого фактор времени не влияет на процесс осадки. Проверка

данного положения по существу является проверкой «нулевой гипотезы», поэтому период стабилизации осадки целесообразно определять с помощью аппарата однофакторного дисперсионного анализа, причем изучаемым фактором должно быть время t_i реализации осадки S_i .

Пусть в период времени t_i получено значение осадки S_i со средней квадратической ошибкой m_{S_i}

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_k; \quad S_1, S_2, S_3, \dots, S_k; \quad m_{S_1}, m_{S_2}, m_{S_3}, \dots, m_{S_k}.$$

Известно, что аппарат дисперсионного анализа рационально применить при неизменности генеральной дисперсии воспроизводимости σ_S^2 по всем уровням i . Поэтому перед определением периода стабилизации необходимо оценить различие между оценками дисперсии $m_{S_1}^2, m_{S_2}^2, \dots, m_{S_k}^2$ с помощью критерия Кохрана, путем сравнения на определенном уровне значимости p отношение максимальной оценки дисперсии $\max m_{S_i}^2$ к сумме всех остальных значений оценок дисперсий с табличным значением этого отношения:

$$g = \frac{\max m_{S_i}^2}{\sum_{i=1}^k m_{S_i}^2} \quad (2.55)$$

В случае значимого изменения дисперсии в процессе наблюдения ($g > g_{\text{табл}}$) необходимо ее стабилизировать с помощью соответственно подобранной преобразующей функции [22].

Преобразующую функцию нетрудно найти. Пусть отклонение результатов наблюдений за осадкой (средней квадратической ошибки определения осадки m_{S_i}) от нормального закона распределения ошибок (т. е. $g > g_{\text{табл}}$) вызваны тем, что при измерении изменяется генеральная дисперсия σ_S^2 , например, из-за оседания реперов геодезической опорной сети. По методу наименьших квадратов можно определить вид функции

$$\sigma_S(t) = \varphi(t), \quad (2.56)$$

для чего необходимо произвести замену переменной функцией

$$Z = \psi(t), \quad (2.57)$$

тогда [22]

$$\sigma_z^2 = \psi'(t) \sigma_s(t) = \psi'(t) \varphi(t) \quad (2.58)$$

Преобразующую функцию подбирают при условии постоянства дисперсии величины Z . Тогда уравнение для функции $\psi(t)$ будет иметь вид

$$\psi'(t)\varphi(t) = C, \quad \text{т. е. } \psi(t) = C \int dt / \varphi(t). \quad (2.59)$$

Полученная таким образом функция позволяет перейти к « косвенным » измерениям с постоянной дисперсией, т. е. рассматривает все наблюдения как выборку из единой генеральной совокупности.

Для подтверждения гипотезы о стабилизации осадки с помощью дисперсионного отношения необходимо получать значения двух оценок сравниваемых дисперсий — генеральной m_0^2 и фактора времени m_t^2 , определяемых соответственно из выражений

$$m_0^2 = 1/k \sum_{i=1}^n m_i^2 \quad (2.60)$$

и

$$m_t^2 = \frac{n}{k-1} \sum_{i=1}^n (\bar{S}_i - \bar{S})^2, \quad (2.61)$$

где n — число наблюдений в год; $n\bar{S}_i = \sum_{i=1}^n S_i$ — среднегодовые значения осадок;

$\bar{S} = 1/k \sum_{i=1}^k S_i$ — среднее из всех значений осадок в рассматриваемый период.

Осадку сооружения можно считать стабилизированной, если на данном уровне значимости p выполняется неравенство

$$\frac{m_t^2}{m_0^2} \leq F_{1-p}, \quad (2.62)$$

где F -распределение Фишера рассматривается с $f_1 = k - 1$ и $f_2 = k(n - 1)$ степенями свободы.

Описанный метод позволяет строго математически определять и фиксировать время стабилизации осадки сооружения.

Покажем методику исследований по формулам (2.55) — (2.62) на примере данных табл. 8.

Исследуем стабильность дисперсии с помощью критерия Кохрана (2.55)

$$g = 0,0361 : 0,2518 = 0,1434.$$

Из таблицы [22] находим, что $g_{0,95} = 0,22\ 99$ ($k=12, f=7$). Так как $g < g_{0,95}$, то различия между оценками дисперсий считаются незначимыми.

Получим значения оценок двух дисперсий — генеральной (2.60) и фактора времени (2.61): $m_0^2 = 0,0210$;

$$m_t^2 = 4/2 (0,0574 + 0,0036 + 0,0841) = 0,2902$$

и дисперсионного отношения

$$m_t^2/m_0^2 = 13,8.$$

Из таблиц находим, что

$$F_{0,95} = 4,3(f_1 = 2, f_2 = 9), \text{ т. е. } m_t^2/m_0^2 > F_{0,95}.$$

Отсюда следует вывод, что осадка данного сооружения не стабилизировалась.

Выводы по главе II.

Резюмируя все вышесказанное в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Под прогнозированием понимается вероятностное определение величины осадки $S(t_{n+1})$ во время t_{n+1} (время прогноза) с помощью модели, построенной по данным уже проведенных циклов во времени t_1, t_2, \dots, t_n .

2. Доказано, что метод послойного суммирования, как априори наиболее точный из двух (метода эквивалентного слоя и метода послойного суммирования), и может быть рекомендован для приближенной предварительной оценки величины конечной (стабилизированной) осадки.

3. Показано, что после проведения трех первых циклов наблюдений и обработки их результатов появляется возможность математического моделирования хода осадки сооружения сначала в зависимости времени, а затем, после проведения еще нескольких циклов (накопления информации) и выявления значимых факторов, в зависимости и от них.

4. По результатам математической обработки результатов экспериментальных геодезических наблюдений доказано, что осадки всех шести марок, установленных на трубах Талимарджанской ГРЭС, происходят по закону экспоненты

$$S(t_i) = S_k - S_k e^{-\text{acpt}i}.$$

5. Показано, что идеи полиномиальной аппроксимации универсальны, и их с успехом можно применять и при построении моделей отличного от приведенного в работе вида. К тому же, самое главное — полиномиальная аппроксимация практически незаменима при построении модели по ограниченному объему предыстории.

Глава III.

ТЕОРИЯ ОБОСНОВАНИЯ ТОЧНОСТИ И ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ ЗА ОСАДКАМИ СООРУЖЕНИЙ

1. ПРИНЦИП И МЕТОДОЛОГИЯ

При изучении осадок инженерных сооружений геодезическими методами возникает задача определения точности и периодичности измерений, и от правильного и своевременного ее решения одобряют выбор приборов, обоснование методики геодезических наблюдений и конечном счете, рациональное планирование денежных средств, выделяемых на выполнение работ [18]. Но, к сожалению, в настоящее время на практике точность и периодичность измерений принимаются без достаточного обоснования, поэтому часто для наблюдений, охватывающих различные по характеру периоды, или для различных по режиму объектов одного и того же сооружения принимаются одинаковые точность и периодичность наблюдений и, соответственно, методика измерений. Очевидно, это связано с тем, что пока нет строго обоснованных принципов установления точности и периодичности наблюдений за осадками инженерных сооружений.

Изложению принципиальных подходов к решению этого вопроса посвящена данная глава, но, перед тем как перейти к этому нам представляется необходимым рассмотреть положение о критерии точности и периодичности геодезических наблюдений.

Как известно, характер осадки сооружения определяется величиной и скоростью, т.е. изменением процесса за выбранный интервал времени. Необходимо назначать точность и периодичность таким образом, чтобы полученные результаты наблюдений удовлетворяли принципу практической уверенности как в самой величине осадки на момент наблюдения, так и ее интенсивности, что подразумевает обеспечение возможности суждения о неизменности процесса осадки во времени, с одной стороны, и невозможности потери момента ее изменения — с

другой. При этом величина интенсивности осадки играет более существенную роль с точки зрения суждения о происходящем процессе, чем ее абсолютная величина, что приводит к выводу о первостепенной роли величины интенсивности деформации при обосновании точности периодичности наблюдений (заметим, что этот пока априорный вывод будет строго доказан ниже). Данное условие можно записать в виде

$$\sigma T_{\beta} \leq |S_{t_{n+1}} - S_{t_n}|, \quad (3.1)$$

где S_{t_n} — величина осадки в момент времени t_n ; σ — стандарт определения осадки; T_{β} — нормированный множитель, зависящий от вида распределения ошибок и уровня доверительной вероятности [6].

В то же время, исходя из соображений, определяемых конструктивными допусками, для обеспечения нормального режима технологического процесса и обеспечения устойчивости сооружения величина суммы осадки, наблюдаемой в $(n+1)$ -м цикле, и абсолютной ошибки ее определения должна быть меньше предельной величины, т.е.

$$\bar{S}_{t_{n+1}} + \delta S_{t_{n+1}} \leq S, \quad (3.2)$$

где $\delta S_{t_{n+1}}$ — предельная ошибка истинного значения осадки $\bar{S}_{t_{n+1}}$; S — конструктивный допуск на величину осадки [2]. Очевидно, геодезические наблюдения должны нормироваться таким образом, чтобы получаемые результаты измерений отвечали требованиям (3.1) и (3.2) одновременно. Кроме того, как видно из условий (3.1), точность измерений, определяемая в данном случае стандартом σ , зависит от коэффициента T_{β} :

$$\sigma \leq \frac{S_{t_{n+1}} - S_{t_n}}{T_{\beta}}, \quad (3.3)$$

Для его определения, как это уже отмечалось в гл. 1, необходимо принять априорное решение о виде распределения ошибок наблюдений и задаться определенным уровнем доверительной вероятности β .

Известно, что закон распределения ошибок геодезических измерений близок к нормальному [6]. К тому же отметим, что для большинства

ответственных сооружений (в том числе и наблюдений за осадками сооружений) доверительная вероятность принимается в пределах $0,955 \leq \beta \leq 0,997$, что соответствует интервалу $2 \leq T_\beta \leq 3$.

При обосновании точности и периодичности геодезических измерений нет необходимости производить переход от предельных ошибок к среднеквадратическим. Тогда выражение (3.1) равносильно записать в виде

$$\delta S \leq S_{t_{n+1}} - S_{t_n} \quad (3.4)$$

Равенства (3.2) и (3.4) являются в данном случае основными на основании точности и периодичности геодезических наблюдений за осадками инженерных сооружений.

2. ОБОСНОВАНИЕ ТОЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Точность геодезических наблюдений целесообразно нормировать, исходя из двух предпосылок: 1) величина определяющих предельное состояние высотного положения исследуемого сооружения; 2) характера протекания осадки сооружения мы уже отмечали, что существуют четыре величины, определяющие деформацию изучаемого сооружения. Здесь уместно их напомнить а) средняя осадка фундамента S_{cp} ; б) разности осадков соседних фундаментов или конструкций одного фундамента ΔS_{i-j} ; в) крен фундамента k ; г) относительный прогиб фундамента f . Предельно допустимые значения данных характеристик для соответствующих сооружений представлены в книге Н. А. Цытовича [31].

Практика наблюдений за деформациями показала [18], что каждая в отдельности величина допуска не может служить состоятельной оценкой устойчивости сооружения. Поэтому для полного суждения об устойчивости сооружения методику наблюдений необходимо разрабатывать, исходя из комплексного влияния всех характеристик, имеющих предельные значения, а именно

$$\check{S}, \Delta \check{S}, \bar{k}, \bar{f} \quad (3.5)$$

Согласно допуску на величину осадки, можно записать что

$$S_{\text{ист}} + \delta S_{\text{ист}} \leq \check{S}, \quad (3.6)$$

где \check{S} — допуск на величину осадки; $S_{\text{ист}}$ — вероятней знание осадки конструкции (марки) в $(n+1)$ -м цикле наблюдений $\delta S_{\text{ист}}$ — предельная ошибка определения значения осадки $S_{\text{ист}}$ $(n+1)$ -м цикле наблюдений.

Пусть проведено n циклов геодезических наблюдений. Тогда с помощью выражений (2.34) — (2.36), (2.48) — (2.51) можно строить математическую модель осадки для экстраполяции ее значений. В случае $S \neq f(t_{\text{вр.года}})$, $S = f(t_{\text{год}})$, согласно формуле (2.32) значения осадок S_i могут быть аппроксимированы полиномом степени $p < n$:

$$S_{t_i} = \sum_{i=1}^p a_i t^i,$$

причем коэффициенты полинома a_i ($0 \leq i \leq p$) определяются по формуле (2.36). Откуда, задаваясь временем прогноз $t_{\text{прогн}}$ можно определить значение прогнозируемой осадки

$$S_{t_{\text{прогн}}} = a_0 + a_1 t_{\text{прогн}} + \dots + a_p t_{\text{прогн}}^p$$

со стандартом

$$\sigma S_{t_{\text{прогн}}} = \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}} \quad (3.7)$$

где σ_0 — стандарт аппроксимации значений осадок S_i ($0 <$) полиномом степени p ; $1/P_{t_{\text{прогн}}}$ — величина, обратная весу функции (2.16) в случае $t = t_{\text{прогн}}$, определяемая традиционными методами [28].

Доверительный интервал для истинного значения осадки $(n + 1)$ -м цикле наблюдений будет представлен в виде

$$S_{t_{\text{прогн}}} - T_{\beta} \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}} \leq S_{\text{ист}} \leq S_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta} \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}}. \quad (3.8)$$

где T_{β} — нормированный множитель; β — уровень доверительной вероятности.

Исходя из условия (3.2), для обязательного определения возможного момента превышения значения осадки ее заданной предельной величины левую часть интервала (3.8) необходимо исключить из рассмотрения и в дальнейших рассуждениях пользоваться только граничным значением ее правой части, т. е.

$$S_{\text{ист}} = S_{t_{\text{прогн}}} + \delta S_{t_{\text{прогн}}} = S_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta} \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}} \quad (3.9)$$

Откуда условие (3.6) будет записано следующим образом:

$$S_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta} \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}} + \delta S_{\text{ист}} \leq \check{S} \quad (3.10)$$

Следовательно, искомое выражение для предельной ошибки геодезических наблюдений в (n+1)-м цикле будет иметь вид

$$\delta S_{\text{ист}} \leq \check{S} - S_{t_{\text{прогн}}} - T_{\beta} \sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}} \quad (3.11)$$

Рассмотрим применение вышеизложенной теории наблюдений за осадками дымовых труб Талимарджанской ГРЭС.

В соответствии с выражением (3.11) выполнена полиномиальная идентификация осадки, результаты которой для марки № 1 рассмотрены в табл. 11.

Таблица 11
Полиномиальная идентификация осадки марки № 1

p=1	p=2	p=3	p=4	p=5	p=6	p=7
$\sigma_0=7,97\text{м}$ м	$\sigma_0=6,19\text{м}$ м	$\sigma_0=4,59\text{м}$ м	$\sigma_0=3,24\text{м}$ м	$\sigma_0=2,23\text{мм}$	$\sigma_0=2,25\text{мм}$	$\sigma_0=2,42\text{мм}$
a_i	a_i	a_i	a_i	a_i	a_i	a_i
23,1 2,58	14,4 8,23 -0,532	5,3 19,03 -3,106 0,1591	2,5 34,5 - 10,11 4 1,228 1 0,05172	8,4 51,81 -22,405 4,5061 — 0,41505 0,014205 1	-10,3 59,29 -29,893 7,5020 -0,97241 0,0624005 - 0,0011577 8	-8,3 49,53 -17,574 0,9812 0,74567 - 0,175154 0,014937. - 0,004543. .

Оптимальными будут следующие степени

- p = 5 (марка № 1; $\sigma_0 = 2,23$ мм);
- p = 5 (» № 2; $\sigma_0 = 2,87$ »);
- p = 5 (» № 3; $\sigma_0 = 2,62$ »);
- p = 6 (» № 4; $\sigma_0 = 1,62$ »);
- p = 6 (» № 5; $\sigma_0 = 1,60$ »);
- p = 2 (» № 6; $\sigma_0 = 0,73$ »).

Рассмотрим обоснование точности наблюдений в данном конкретном случае — методика разрабатывается при условии существования только допуска на величину осадки $\check{S} = 300$ мм.

В соответствии с общей методикой последовательной идентификации осадки, разработанной в гл. 2, и учитывая, что процент осадки происходит в стадии эксплуатации сооружения, наибольшим общей моделью осадки является степенной полином k -го порядка в соответствии с чем и выполнено преобразование (3.8)-(3.11) результаты которого приведены в табл. 12 (для марок № 1- 6 соответственно).

Как видно из данных табл. 12, точность наблюдений находится в интервале 83—250 мм для времени прогноза (периодичность наблюдений) $t=2$ года ($t_{n+1} = 12,50$; $t_n = 10,50$).

Известно, что наиболее опасными по вызываемым последствиям (снижение устойчивости сооружений и т. д.) являются неравномерные осадки, причем опасность тем больше, чем значительная разность осадок частей сооружений и чем чувствительнее k к его конструкции. Поэтому методика наблюдений за осадками таких сооружений должна разрабатываться также и в зависимости от следующей предельной характеристики (3.5) — допуска на величину неравномерности ΔS_{i-j} положения конструкций с марками i и j , т. е.

$$(S_i - S_j)_{\text{ист}} + \delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq \Delta \check{S}_{i-j}, \quad (3.12)$$

где S_i и S_j — истинные значения осадок конструкций с марками i и j .

Таблица 12

Предвычисленная точность наблюдений осадок марок № 1—6 по идентифицированным моделям

№ п/п	$t_{\text{прогн}}, \text{ГОД}$	$S_{\text{прогн}}, \text{ММ}$	$\check{S}, \text{ММ}$	$\delta S, \text{ММ}$	$\sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}}$
$p = 5; \sigma_0 = 2,23 \text{ мм}$					
1	10,58	46,98	300	249	0,988
2	10,66	48,09	300	246	1,202

3	10,74	49,33	300	244	1,462
4	10,82	50,71	300	241	1,764
5	10,90	52,25	300	238	2,104
6	10,98	53,95	300	234	2,483
7	11,06	55,83	300	231	2,901
8	11,14	57,89	300	227	3,358
9	11,22	50,14	300	223	3,835
10	11,30	62,60	300	217	4,395
11	11,38	65,28	300	212	4,978
12	11,46	68,19	300	207	5,605
13	11,54	71,34	300	201	6,280
14	11,62	74,74	300	194	7,003
15	11,70	78,41	300	186	7,779
16	11,78	82,37	300	179	8,607
17	11,86	86,62	300	171	9,49
18	11,94	91,18	300	162	10,431
19	12,02	96,06	300	152	11,432
20	12,10	101,29	300	142	12,50
21	12,18	106,87	300	132	13,625
22	12,26	112,83	300	121	14,821
23	12,34	119,17	300	109	16,088
24	12,42	125,92	300	96	17,43
25	12,50	133,09	300	83	18,84

$p = 5; \sigma_0 = 2,87 \text{ MM}$

1	10,58	41,76	300	252	0,988
2	10,66	42,19	300	251	1,202
3	10,74	42,68	300	249	1,462
4	10,82	43,23	300	247	1,764
5	10,90	43,84	300	244	2,104
6	10,98	44,53	300	241	2,483
7	11,06	45,28	300	238	2,900
8	11,14	46,12	300	234	3,358
9	11,22	47,05	300	231	3,856
10	11,30	48,06	300	227	4,395
11	11,38	49,17	300	222	4,977
12	11,46	50,38	300	217	5,605
13	11,54	51,70	300	212	6,280
14	11,62	53,13	300	206	7,003
15	11,70	54,69	300	201	7,779
16	11,78	56,37	300	194	8,607
17	11,86	58,19	300	187	9,490
18	11,94	60,14	300	180	10,43
19	12,02	62,25	300	172	11,43

20	12,10	64,51	300	164	12,50
21	12,18	66,94	300	155	13,624
22	12,26	69,54	300	145	14,821
23	12,34	72,32	300	135	16,09
24	12,42	75,29	300	125	17,43
25	12,50	78,45	300	113	18,84

$p = 5; \sigma_0 = 2,62 \text{ MM}$

1	10,58	39,48	300	255	0,998
2	10,66	39,76	300	254	1,202
3	10,74	40,08	300	252	1,462
4	10,82	40,44	300	250	1,764
5	10,90	40,84	300	248	2,104
6	10,98	41,28	300	246	2,483
7	11,06	41,78	300	243	2,901
8	11,14	42,32	300	240	3,358
9	11,22	42,93	300	237	3,855
10	11,30	43,60	300	233	4,394
11	11,38	44,33	300	229	4,997
12	11,46	45,13	300	225	5,605
13	11,54	46,00	300	221	6,280
14	11,62	46,96	300	216	7,004
15	11,70	47,99	300	211	7,779
16	11,78	49,11	300	206	8,607
17	11,86	50,33	300	199	9,409
18	11,94	51,64	300	194	10,431
19	12,02	53,05	300	187	11,432
20	12,10	54,57	300	179	12,496
21	12,18	56,21	300	172	13,625
22	12,26	57,96	300	164	14,821
23	12,34	59,84	300	155	16,088
24	12,42	61,85	300	147	17,427
25	12,50	64,00	300	137	18,842

$p = 6; \sigma_0 = 1,62 \text{ MM}$

1	10,50	44,52	300	252	0,910
2	10,58	43,98	300	252	1,261
3	10,66	43,33	300	251	1,734
4	10,74	42,55	300	250	2,308
5	10,82	41,64	300	249	2,978
6	10,90	40,59	300	247	3,743
7	10,98	39,37	300	246	4,609
8	11,06	37,98	300	244	5,579
9	11,14	36,40	300	242	6,661

10	11,22	34,61	300	239	7,863
11	11,30	32,60	300	237	9,192
12	11,38	30,35	300	235	10,656
13	11,46	27,84	300	232	12,266
14	11,54	25,04	300	229	14,029
15	11,62	21,94	300	226	15,956
16	11,70	18,52	300	223	18,057
17	11,78	14,76	300	219	20,343
18	11,86	10,61	300	215	22,826
19	11,94	6,07	300	211	25,516
20	12,02	1,11	300	207	28,428
21	12,10	—4,30	300	202	31,257
22	12,18	—10,19	300	197	34,962
23	12,26	—16,602	300	192	38,613
24	12,34	—23,554	300	186	42,538
25	12,42	—31,08	300	179	46,753

$p = 6; \sigma_0 = 1,60 \text{ MM}$

1	10,58	46,03	300	249	1,261
2	10,66	45,40	300	249	1,734
3	10,74	44,64	300	248	2,308
4	10,82	43,74	300	246	2,978
5	10,90	42,69	300	245	3,743
6	10,98	41,48	300	243	4,609
7	11,06	40,09	300	242	5,579
8	11,14	38,51	300	240	6,661
9	11,22	36,71	300	238	7,863
10	11,30	34,69	300	235	9,192
11	11,38	32,61	300	233	10,656
12	11,46	29,87	300	230	12,265
13	11,54	27,04	300	228	14,029
14	11,62	23,89	300	225	15,956
15	11,70	20,41	300	221	18,056
16	11,78	16,57	300	218	20,343
17	11,86	12,33	300	214	22,825
18	11,94	7,69	300	210	25,516
19	12,02	2,607	300	206	28,427
20	12,10	—2,95	300	202	31,572
21	12,18	—9,01	300	197	34,962
22	12,26	—15,60	300	192	38,613
23	12,34	—22,764	300	186	42,538
24	12,42	—30,53	300	181	46,753
25	12,50	—38,94	300	175	51,273

$p = 2; \sigma_0 = 0,73 \text{ MM}$

1	10,58	47,06	300	251	0,715
2	10,66	47,08	300	251	0,737
3	10,74	47,10	300	251	0,759
4	10,82	47,12	300	251	0,782
5	10,90	47,13	300	251	0,805
6	10,98	47,15	300	251	0,829
7	11,06	47,16	300	251	0,853
8	11,14	47,17	300	251	0,879
9	11,22	47,17	300	251	0,904
10	11,30	47,18	300	251	0,931
11	11,38	47,19	300	251	0,958
12	11,46	47,19	300	251	0,985
13	11,54	47,19	300	251	1,013
14	11,62	47,20	300	251	1,042
15	11,70	47,19	300	251	1,071
16	11,78	47,19	300	251	1,101
17	11,86	47,19	300	251	1,132
18	11,94	47,18	300	251	1,162
19	12,02	47,17	300	251	1,194
20	12,10	47,17	300	251	1,226
21	12,18	47,16	300	251	1,258
22	12,26	47,14	300	251	1,291
23	12,34	47,13	300	250	1,324
24	12,42	47,12	300	250	1,358
25	12,50	47,10	300	250	1,393

По аналогии с формулами (3.6) и (3.11) в данном случае необходимо построить идентифицированные модели осадок двух марок с индексами i и j с последующей экстраполяцией их значений на интервале t_n — $t_{\text{прогн}}$. Тогда истинные значения осадок будут определяться с помощью выражений

$$(S_i)_{\text{ист}} = (S_i)_{t_{\text{прогн}}} + \delta(S_i)_{t_{\text{прогн}}} \quad (3.13)$$

$$(S_j)_{\text{ист}} = (S_j)_{t_{\text{прогн}}} + \delta(S_j)_{t_{\text{прогн}}} \quad (3.14)$$

где предельные ошибки величин прогнозируемых осадок определяются с помощью известных выражений

$$\delta(S_i)_{t_{\text{прогн}}} = T_{\beta}(\sigma_0)_i \sqrt{1/(P_i)_{t_{\text{прогн}}}} \quad - \text{ для марки } i;$$

$$\delta(S_j)_{t_{\text{прогн}}} = T_{\beta}(\sigma_0)_j \sqrt{1/(P_j)_{t_{\text{прогн}}}} \quad - \text{ для марки } j;$$

Исходя из цели геодезических наблюдений за осадками — определения момента превышения неравномерности осадок двух элементов сооружения предельно допустимой величины, можно записать следующее неравенство:

$$(S_i - S_j)_{t_{\text{прогн}}} + \delta(\Delta S_{i-j})_{t_{\text{прогн}}} + \delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq \Delta \check{S}_{i-j}, \quad (3.15)$$

где $\delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}}$ — истинная величина предельной ошибки определения истинного значения неравномерности осадок конструкций (марок) i и j в $(n+1)$ -м цикле; $\delta(\Delta S_{i-j})_{t_{\text{прогн}}}$ — предельная ошибка разности прогнозируемых осадок конструкций (марок) i и j , определяемая как

$$\delta(\Delta S_{i-j})_{t_{\text{прогн}}} = T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2} \quad (3.16)$$

Используя уравнение (3.16), можно получить

$$(S_i - S_j)_{t_{\text{прогн}}} = T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2} + \delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq \Delta \check{S}_{i-j}. \quad (3.17)$$

Откуда искомое выражение для нормирования точности наблюдений в $(n+1)$ -м цикле в условиях допуска на неравномерность высотного положения конструкций будет иметь вид

$$\delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq \Delta \check{S}_{i-j} - (S_i - S_j)_{t_{\text{прогн}}} - T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2} \quad (3.18)$$

Иногда на практике допуском, определяющим предельное высотное состояние исследуемого сооружения, является допуск на величину относительного крена (3.5) \bar{k} .

В этом случае величина предельной ошибки определения разности осадок марок i и j , определяющая точность геодезических наблюдений, должна определяться исходя из известной связи относительного крена с неравномерностью осадки:

$$\bar{k} = \Delta \check{S}_{i-j} / L, \quad (3.19)$$

где L — расстояние между конструкциями (марками) i и j , т. е.

$$\bar{k}L - (S_i - S_j)_{t_{\text{прогн}}} - T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2} \geq \delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \quad (3.20)$$

Иллюстрируем применение изложенной теории при обосновании Точности наблюдений за осадками на примере уже известных нам

результатов наблюдений за осадками Талимарджанской ГРЭС. Дымовые трубы Талимарджанской ГРЭС имеют допуск не только на величину осадки, но и на величину неравномерности осадок (табл. 13). Поэтому возникает вопрос о назначении точности наблюдений как допуска на предельную ошибку определения осадок марок, так и предельной ошибки в определении разности осадок марок данного сооружения.

В табл. 14 представлены предельные ошибки определения разностей осадок марок ($i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, i+j$)

Таблица 13

Нормативные допуски на неравномерные осадки марок № 1—6

марки	Марки					
	1	2	3	4	5	6
1		30	50	84	50	30
2	30		30	50	84	50
3	50	30		30	50	84
4	84	50	30		30	50
5	50	84	50	30		30
6	30	50	84	50	30	

Примечание. Величины допусков даны в миллиметрах

Талимарджанской ГРЭС в условиях допуска на неравномерную осадку сооружения. Из анализа данных табл. 14 видно, что для оценки устойчивости данного сооружения во всех его сечениях необходимо проводить наблюдения с предельной ошибкой определения не равномерной осадки $\delta(\Delta S_{i-j})_{ист} = 3,8\text{мм}$ и в интервале 10,50 - 11,30 года (с периодичностью 1 цикл в 10 месяцев). Следовательно, без потери информативности о высотном состоянии объекта наблюдения можно планировать более экономично и эффективно.

На практике для оценки устойчивости сооружений часто используют симметричный относительный прогиб f отдельных частей сооружения, который определяется по формуле [18]

$$f = 2S_m - (S_i + S_j) / 2L \quad (3.21)$$

где S_i и S_j — осадки точек i и j , расположенных на краях прямолинейного участка сооружения длиной L ; S_m — осадка точки m расположенной в середине между точками i и j .

Как видно из формулы (3.21), для обоснования точности наблюдений за осадками в случае допуска на величину симметричного относительного прогиба по методике (3.12) — (3.20) необходимо построить уже три модели осадок марок i , j и m с последующей экстраполяцией их значений на интервале t_n — $t_{\text{прогн}}$:

$$\begin{aligned} (S_i)_{\text{ист}} &= (S_i)_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta}(\sigma_0)_i \sqrt{1/(P_i)_{t_{\text{прогн}}}} \\ (S_j)_{\text{ист}} &= (S_j)_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta}(\sigma_0)_j \sqrt{1/(P_j)_{t_{\text{прогн}}}} \\ (S_m)_{\text{ист}} &= (S_m)_{t_{\text{прогн}}} + T_{\beta}(\sigma_0)_m \sqrt{1/(P_m)_{t_{\text{прогн}}}} \end{aligned} \quad (3.22)$$

Тогда по аналогии с выражением (3.20) можно записать

$$\begin{aligned} 2L (\delta f)_{\text{ист}} \leq f 2\bar{L} - (2S_m - S_i - S_j)_{t_{\text{прогн}}} - \\ - T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_m^2} \end{aligned} \quad (3.23)$$

где $(\delta f)_{\text{ист}}$ — предельная ошибка определения истинного значения симметричного относительного прогиба частей сооружения (марок) i и j .

Предельная ошибка определения истинного значения симметричного относительного прогиба сооружения относительно m связана с предельными

Таблица 14

Предвычисленная точность наблюдений неравномерных осадок марок № 1—6 по идентифицированным моделям

Время наблюдения $t_{\text{прогн}}$, ГОД	Сочетание марок				
	1-2	1-3	1-4	1-5	1-6
10,50	19,3	37,5	77,8	44,7	25,1
10,58	17,6	35,7	75,0	43,1	25,4
10,66	15,4	33,4	71,5	39,6	24,5
10,74	12,7	30,7	67,3	35,5	23,4
10,82	9,7	27,6	62,5	30,7	21,1
10,90	8,3	24,1	57,0	25,2	18,3

10,98	7,5	20,2	50,9	19,1	15,3
11,06	6,7	16,0	44,0	12,2	11,9
11,14	5,2	11,3	36,3	6,6	9,6
11,22	4,4	6,3	27,8	4,4	8,2
11,30	3,1	3,8	18,4	3,8	4,5
11,30			8,1		
Время наблюдения $t_{\text{прогн}}, \text{ГОД}$	Сочетание марок				
	2-3	2-4	2-5	2-6	3-4
10,50	21,4	41,2	73,2	39,4	19,5
10,58	20,0	40,8	72,8	38,9	18,9
10,60	18,2	40,0	72,0	37,2	18,0
10,74	16,0	38,7	70,9	37,0	16,8
10,82	13,5	34,5	69,6	36,0	15,5
10,90	10,6	29,7	65,9	34,7	13,4
10,98	8,4	24,2	60,5	33,2	8,3
11,06	6,9	18,2	54,4	31,6	7,6
11,14	6,1	11,4	47,7	29,8	5,5
11,22	5,7	4,8	40,18	27,7	4,4
11,30	4,5	3,9	31,9	23,7	3,8
11,38			22,8	19,2	
11,46			18,8	14,4	
11,50			1,8	9,6	
Время наблюдения $t_{\text{прогн}}, \text{ГОД}$	Сочетание марок				
	3-5	3-6	4-5	4-6	5-6
10,50	37,4	71,7	23,8	44,4	28,3
10,58	36,9	71,4	22,2	42,8	26,4
10,60	36,0	71,2	20,0	40,6	24,9
10,74	34,8	70,3	17,4	38,0	22,2
10,82	33,4	69,3	14,4	34,9	20,2
10,90	31,9	68,1	10,9	31,4	17,1
10,98	30,1	66,7	8,9	27,4	13,7
11,06	24,9	65,2	7,5	24,2	11,8
11,14	18,6	63,5	6,5	19,6	9,4
11,22	11,6	61,6	5,9	16,4	7,3
11,30	3,8	59,3	4,9	9,9	5,2
11,38	3,4	57,5	3,3	6,7	3,7

погрешностями определения осадок точек i , j и m в $(n+1)$ -м цикле наблюдений следующим соотношением:

$$(\delta f)_{\text{ист}} = 1/2L \sqrt{4 (\delta S_m)_{\text{ист}}^2 + (\delta S_i)_{\text{ист}}^2 + (\delta S_j)_{\text{ист}}^2} \approx 1,41(\delta S_m)_{\text{ист}} / 2L \quad (3.24)$$

Откуда искомое выражение для нормирования точности наблюдений в (n+1)-м цикле в условиях допуска на симметричный относительный прогиб f будет

$$\delta(S_m)_{\text{ист}} \leq \frac{2fL - (2S_m - S_i - S_j)t_{\text{прогн}}}{2,82} - \frac{T_{\beta} \sqrt{(\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_i^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_j^2 + (\sigma_0 \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}}})_m^2}}{2,82} \quad (3.25)$$

Заметим также, что в случае равенства степеней полиномов аппроксимирующих значение осадок марок i и j в случаях (3.18), (3.20) и i , j и m — в случае (3.25), т.е. $p_i = p_j = p_m$, выражение (3.18), (3.20) и (3.25) существенно упрощаются:

$$\delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq \Delta S_{i-j} - (\bar{S}_i - S_j)t_{\text{прогн}} - T_{\beta} \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}} [(\sigma_0^2)_i + (\sigma_0^2)_j]t} \quad (3.26)$$

$$\delta(\Delta S_{i-j})_{\text{ист}} \leq kL - (\bar{S}_i - S_j)t_{\text{прогн}} - T_{\beta} \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}} [(\sigma_0^2)_i + (\sigma_0^2)_j]t} \quad (3.27)$$

$$\delta(S_m)_{\text{ист}} \leq \frac{2fL - (2S_m - S_i - S_j)t_{\text{прогн}} - T_{\beta} \sqrt{1/P_{t_{\text{прогн}}} [(\sigma_0^2)_i + (\sigma_0^2)_j + (\sigma_0^2)_m]t}}{2,82} \quad (3.28)$$

Известно [18], что наблюдения за осадками некоторых сооружений, особо чувствительных к деформациям с точки зрения нормального режима технологического процесса, начинают с началом их возведения, продолжают в эксплуатационный период в стадии затухания осадки, а иногда и в стадии ее стабилизации.

Аппарат дисперсионного анализа, применяемый для определения периода стабилизации осадки, обуславливает построение доверительного интервала для оценки разности значений двух осадок, полученных в циклах m и n ,

$$S_m - S_n > T_{\beta} \sigma \sqrt{2} \quad (3.29)$$

Точность геодезических наблюдений в период стабилизации осадки сооружения, определяемая в данном случае средним квадратическим отклонением σ , должна нормироваться, исходя из следующих предпосылок: 1) допуска на величину осадки сооружения S ; 2) истинного

положения конструкции в момент наблюдений

$$S = \frac{1}{n-k} \sum_{p=k}^n S_p + T_{\beta} M, \quad (3.30)$$

где $k \leq p \leq n$; k - исходный цикл периода стабилизации;

$$M = \frac{1/\sqrt{n-1} \sum_{p=k}^n m_{Sp}}{\sqrt{n-k}} \quad \text{— средняя квадратическая ошибка определения истиной}$$

осадки конструкции (марки) из $(n - k)$ циклов в период стабилизации осадки сооружения.

Тогда, подставляя формулу (3.30) в уравнение (3.29), получаем

$$\bar{S} - (S_{ист} + T_{\beta} M) > T_{\beta} \sigma \sqrt{2}.$$

Откуда искомое выражение для точности наблюдений за осадкой в период ее стабилизации при условии разработки методики с целью установления момента превышения наблюдаемой осадки предельного ее значения будет иметь вид

$$\sigma < \frac{\check{S} - S_{ист} - T_{\beta} M}{T_{\beta} \sqrt{2}} \quad (3.31)$$

3. ОБОСНОВАНИЕ ПЕРИОДИЧНОСТИ НАБЛЮДЕНИЙ

Установление периодичности (или частоты) геодезических наблюдений наряду с обоснованием точности наблюдений — важный момент в процессе разработки технического задания для выполнения наблюдений за осадками сооружений. Весьма желательным является увеличение временного интервала между циклами без потери информативности о процессе осадки сооружения. В связи с тем что обоснование точности геодезических наблюдений исходит из того, что на интервале $t_n - t_{прогн}$ значение суммы

$$S_{t_{прогн}} + \delta S_{t_{прогн}} + \delta S_{ист}$$

не превышает допуска \check{S} , целесообразно исходить из условия, что

периодичность геодезических наблюдений, т. е. в данном случае схема проведения следующего, $(n+1)$ -го цикла, находилась в интервале $t_{n+1} \in [t_n; t_{\text{прогн}}]$, что, в свою очередь, с учетом известных экономических требований приводит к тому, что за время t_{n+1} принимается наиболее удаленное значение от времени t_n , т. е.

$$t_{n+1} = t_{\text{прогн}}. \quad (3.32)$$

Равенство (3.32) позволяет нормировать периодичность наблюдений как на стадии строительства, так и на стадии эксплуатации сооружений.

Возникает также вопрос о нормировании периодичности наблюдений после окончания строительства, т. е. при

$$S = S_{\text{стр}}, P = P_{\text{max}}, t_n = t_{\text{стр}} \quad (3.33)$$

Отметим, что к моменту завершения строительства и монтажа технологического оборудования ($t_n = t_{\text{стр}}$) удельное давление на грунт в основном достигает конечной величины и осадка характеризуется значением $S_{\text{стр}}$. Затем наступает период затухания осадки, характеризуемый величиной $S_{\text{экс}}$. Тогда полная осадка

$$S_k = S_{\text{стр}} + S_{\text{экс}}. \quad (3.34)$$

Осадку $S_{\text{экс}}$ можно предвычислить по формуле [19]

$$S_{\text{экс}} = \int_0^{t_{\text{стр}}} \frac{S_k}{t_{\text{стр}}} t^{-a_{\text{cp}}} dt \quad (3.35)$$

или

$$S_{\text{экс}} = \frac{S_k}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}}} [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1] \quad (3.36)$$

В период затухания осадку за время t_i можно определить с помощью выражения (2.2)

$$S_{t_i} = S_k (1 - e^{-a_{\text{cp}} t_i}).$$

Из формулы (2.2) следует, что для определения осадки S_{t_i} некоторый промежуток времени t_i необходимо знать величины S_k и a_{cp} . Для их определения составим систему из двух уравнений с двумя неизвестными — S_k и a_{cp} — с помощью выражений (3.34) и (3.35):

$$S_k = S_{\text{стр}} + S_{\text{экс}},$$

$$S_{\text{экс}} = S_{\text{к}} / a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}} [e^{-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}}} (-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}} - 1) + 1]. \quad (3.37)$$

Если наблюдения проводились с начала строительства и намечается их продолжить в период эксплуатации, то $S_{\text{ср}}$ в формулу (3.37) известно. Если же наблюдения проводились не с начала строительства, то для дальнейших расчетов осадку $S_{\text{ср}}$, полученную из наблюдений, необходимо увеличить на величину «упущенной осадки». Тогда, решая систему (3.37) методом последовательных приближений, определяем $S_{\text{к}}$ и $a_{\text{ср}}$. Заметим, что в качестве первого приближения величины $S_{\text{к}}$ полезно принять выражение [31]

$$S_{\text{к}} = \frac{(1 - v_0)^2}{1 - 2v_0} \omega b a_{\text{ср}} P_{\text{к}},$$

где v_0 — коэффициент бокового расширения грунта; ω — коэффициент формы и жесткости; b — ширина подошвы фундамента; $P_{\text{к}}$ — давление на грунт подошвы фундамента.

В этом случае формула (3.34) примет вид

$$S_{\text{к}} = S_{\text{ср}} + S_{\text{экс}} = S_{\text{ср}} + S_{\text{к}} / a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}} [e^{-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}}} (-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}} - 1) + 1]$$

откуда

$$S_{\text{к}} = S_{\text{ср}} \frac{a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}}}{a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}} - [e^{-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}}} (-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}} - 1) + 1]} \quad (3.38)$$

Подставляя выражение (3.38) в (3.36), получаем рабочую формулу

$$S_{t_i} = \frac{S_{\text{ср}} a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}} (1 - e^{-a_{\text{ср}} t_i})}{a_{\text{ср}}^2 t_{\text{ср}} - [e^{-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}}} (-a_{\text{ср}} t_{\text{ср}} - 1) + 1]}$$

В свете поставленной задачи необходимо учесть, при каком максимальном отрезке времени t_i и данной осадке сооружения S_{t_i} предельные ошибки прогнозируемой осадки, вычисляемой по формуле (3.39), и наблюдаемой осадки совпадут, т. е.

$$\delta S_{\text{ист}} = T_{\beta} m_{\text{Н}} \sqrt{2} = \delta S_{t_{\text{прогн}}},$$

где $m_{\text{Н}}$ — средняя квадратическая ошибка отметки осадочной марки.

Среднюю квадратическую ошибку определения отметки осадочной

марки находим из выражения [26]

$$m_H = S_{\min}/T_\beta\sqrt{2}, \quad (3.40)$$

где T_β – нормированный множитель, S_{\min} — наименьшая величина осадки, т. е.

$$S_{\min} = \check{S} - S_{t_{\text{прогн}}}$$

тогда

$$\delta S_{t_{\text{прогн}}} = S_{\min}. \quad (3.41)$$

Продифференцируем выражение (3.39) по переменной t , предварительно преобразовав его:

$$S_{t_i} = \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} (1 - e^{-a_{\text{cp}} t_i})}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]} = \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]} -$$

$$- \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} e^{-a_{\text{cp}} t_i}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]}, \quad dS_t = \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^3 t_{\text{стр}} e^{-a_{\text{cp}} t}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]} dt$$

Переходя от дифференциалов к предельным ошибкам, получаем

$$\delta S_{t_{\text{прогн}}} = \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^3 t_{\text{стр}} e^{-a_{\text{cp}} t}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]} \delta t \quad (3.42)$$

Учитывая выражение (3.41) и принимая $\delta t = 1$ месяцу, определяем искомый период наблюдений t

$$S_{\min} = \frac{S_{\text{стр}} a_{\text{cp}}^3 t_{\text{стр}} e^{-a_{\text{cp}} t}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]},$$

$$-a_{\text{cp}} t = \ln \left\{ \frac{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]}{a_{\text{cp}}^3 t_{\text{стр}}} \frac{S_{\min}}{S_{\text{стр}}} \right\},$$

$$t = \frac{1}{a_{\text{cp}}} \ln \left\{ \frac{a_{\text{cp}}^3 t_{\text{стр}}}{a_{\text{cp}}^2 t_{\text{стр}} - [e^{-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}}} (-a_{\text{cp}} t_{\text{стр}} - 1) + 1]} \frac{S_{\text{стр}}}{S_{\min}} \right\}. \quad (3.43)$$

Нормирование первого послестроительного цикла наблюдений

№ п/п	Номер опоры	$t_{стр}$, месяц	$S_{стр}$, мм	a	t , месяц	$t_{практик}$, месяц	$ \delta t $
1	114-130	8	4.4	0.582	3.6	3.0	0.6
2	114	8	3.6	0.640	3.0	4.0	1.0
3	124	8	6.8	0.528	5.1	5.0	0.1
4	158	8	4.4	0.514	4.2	4.0	0.9
5	212-242	7	4.7	0.524	5.3	6.0	0.7

Выражение (3.43) позволяет нормировать периодичность геодезических наблюдений за осадками инженерных сооружений в начальный период эксплуатации сооружения.

Иллюстрируем изложенное вычисление времени проведения первого цикла в период эксплуатации сооружений (табл. 15) с помощью выражения (3.43).

4. КОМПЛЕКСНЫЕ МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ СООРУЖЕНИЙ ПО ДАННЫМ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ НАБЛЮДЕНИЙ

КРИТЕРИЙ ВЫЯВЛЕНИЯ ДЕФОРМАЦИЙ, БЛИЗКИХ К ПРЕДЕЛЬНЫМ

Повышение качества строительства и увеличение долговечности возводимых инженерных сооружений невозможно без производства комплексных геодезических работ, включающих геодезические наблюдения за деформациями сооружений. Эти наблюдения проводятся в стадии строительства зданий и сооружений и в стадии их эксплуатации, в основном до периода стабилизации деформаций. Кроме того, на уникальных сооружениях в зависимости от природных условий и характера протекания деформаций наблюдения могут продолжаться также и в период после их стабилизации.

Геодезические наблюдения за деформациями (осадками и плановыми смещениями) сооружений проводятся в основном для апостериорного определения устойчивости данных сооружений. Под устойчивостью сооружений в общем случае понимается их способность противостоять усилиям, стремящимся вывести сооружения из исходного состояния статического или динамического равновесия. Следует сказать, что необходимость обеспечения устойчивости (наряду с прочностью) — одно из основных требований, предъявляемых к сооружениям. Следствием потери устойчивости в худшем случае будет сдвиг или скольжение, иногда приводящее к разрушению сооружения. Проверка устойчивости необходима в первую очередь в тех случаях, когда на сооружения действуют мощные вертикальные и горизонтальные силы (большая масса сооружения в условиях неоднородности грунтов, гидростатическое давление на плотину, давление грунта на подпорную стену или устой моста, сейсмические или ветровые нагрузки на высотные сооружения и др.). При проектировании зданий и сооружений, исходя из условия безусловного обеспечения их устойчивости, определяются предельно допустимые величины деформаций (обычно осадок), превышение которых на практике может привести к потере устойчивости возводимого или уже возведенного сооружения. В связи с этим возникает вопрос о надежном статистическом определении деформаций, близких к предельным, по данным проведенных геодезических наблюдений. Здесь возможны два случая: на сооружение действуют в основном горизонтальные или же вертикальные силы. Вертикальные силы вызывают осадку сооружения, горизонтальные — плановые смещения.

В связи с тем, что допуск на неравномерность осадок имеет большее значение, чем допуск на величину осадки, рассмотрим методику определения предельно допустимых значений неравномерностей осадок марок сооружения. Пусть на наблюдаемом сооружении установлено n осадочных марок. Тогда значение неравномерной осадки сооружения

можно считать меньшим, чем предельное на момент времени t_k проведения цикла k , если:

1) оценка стандарта отклонений разностей

$$\left. \begin{aligned} \Delta_1^{(k)} &= H_2^{(k)} - H_1^{(k)} = S_2^{(k)} - S_1^{(k)}, \\ \Delta_2^{(k)} &= H_3^{(k)} - H_2^{(k)} = S_3^{(k)} - S_2^{(k)}, \\ \dots\dots\dots \\ \Delta_{n-1}^{(k)} &= H_n^{(k)} - H_{n-1}^{(k)} = S_n^{(k)} - S_{n-1}^{(k)}, \end{aligned} \right\} \quad (3.44)$$

в данном цикле k от средней разности $\bar{\Delta}^{(k)} = \sum_{i=1}^{n-1} \Delta_i / (n - 1)$ незначима с оценкой генеральной дисперсии \bar{m}^2 , где $H_i^{(k)}$ — отметка марки с номером i в цикле k , $S_i^{(k)}$ — осадка марки с номером i за время t_k ;

2) сумма неравномерности осадок конструкций с марками i и j в цикле k и предельной ошибки ее определения не больше предельного значения этой неравномерности, т. е.

$$(\Delta S_{i-j})^{(k)} + \delta(\Delta S_{i-j})^{(k)} \leq \Delta \bar{S}_{i-j} \quad (3.45)$$

В связи с неравнозначностью данных критериев (второй является необходимым, первый же — только достаточным) определение неравномерности осадок сооружений, близких к предельным, предлагается проводить в два этапа.

Первый этап. Выполняется сравнение осадок марок сооружения в цикле k между собой с помощью F-критерия Фишера и методом Фостера — Стюарта.

Второй этап. Выполняется сравнение осадок и разностей осадок соседних марок и предельных ошибок их определения с допуском на неравномерность (выполняется в том случае, если первый этап выявил значимую неравномерность).

Выводы по главе III.

Резюмируя все вышесказанное в данной главе, можно сделать следующие выводы:

1. Величина интенсивности осадки играет более существенную роль с точки зрения суждения о происходящем процессе, чем ее

абсолютная величина, что приводит к выводу о первостепенной роли величины интенсивности деформации при обосновании точности периодичности наблюдений. Данное условие можно записать в виде

$$\sigma T_{\beta} \leq |St_{n+1} - St_n|$$

2. Наблюдения за деформациями показали, что каждая в отдельности величина допуска не может служить состоятельной оценкой устойчивости сооружения. Поэтому для полного суждения об устойчивости сооружения методику наблюдений необходимо разрабатывать, исходя из комплексного влияния всех характеристик, имеющих предельные значения, а именно

$$\check{S}, \Delta\check{S}, \bar{k}, \bar{f}.$$

1. Приведена методика определения предельно допустимых значений неравномерностей осадок марок сооружения.

Общие выводы

Исследования выполненные в диссертационной работе на соискание степени магистра, позволили изучить вопросы комплексного исследования осадок инженерных сооружений, произвести моделирование и прогнозирование деформационных процессов, апостериорную корректировку методики наблюдений по данным уже проведенных циклов и определение деформаций по значениям, близким к предельным. В результате произведено моделирование и прогнозирование осадки по результатам геодезических наблюдений, доказана необходимость построения модели в виде экспоненты, а не полинома.

Основные результаты диссертационной работы можно свести к следующему:

1. Существуют три фазы деформации грунтов под фундаментом при нагрузке возрастающими ступенями: I-фаза уплотнения, II-фаза местных сдвигов, III – фаза выпирания, вследствие чего протекание осадки является функционально сложным и дифференцированным

во времени процессом.

2. Процесс протекания осадки инженерных сооружений требует комплексного и дифференцированного подхода к методам его изучения.

3. Большой объем получаемой информации требует систематизации и соответствующих математических исследований для выявления наиболее значимых факторов, влияющих на процесс деформации, с целью построения математической модели деформаций и последующего прогнозирования. Математическим аппаратом данных являются дисперсионный, корреляционный и регрессионный анализы.

4. Показано, что в приведенном случае, дисперсионный анализ позволяет выяснить, являются ли совокупности наблюдений в разных циклах набором наблюдений одной нормально распределенной случайной величины или смесью наблюдений нормально распределенных случайных величин, различающихся только средними значениями.

5. Под прогнозированием понимается вероятностное определение величины осадки $S(t_{n+1})$ во время t_{n+1} (время прогноза) с помощью модели, построенной по данным уже проведенных n циклов во времени t_1, t_2, \dots, t_n .

6. Доказано, что метод послойного суммирования, как априори наиболее точный из двух (метода эквивалентного слоя и метода послойного суммирования[^] и может быть рекомендован для приближенной предварительной оценки величины конечной (стабилизированной) осадки

7. Показано, что после проведения трех первых циклов наблюдений и обработки их результатов появляется возможность математического моделирования хода осадки сооружения сначала в зависимости времени, а затем, после проведения еще нескольких циклов (накопления информации) и выявления значимых факторов, в зависимости

и от них.

8. По результатам математической обработки результатов экспериментальных геодезических наблюдений доказано, что осадки всех шести марок, установленных на трубах Талимарджанской ГРЭС, происходят по закону экспоненты

$$S(t_i) = S_k - S_k e^{-\alpha t_i}$$

9. Показано, что идеи полиномиальной аппроксимации универсальны, и их с успехом можно применять и при построении моделей отличного от приведенного в работе вида. К тому же, самое главное — полиномиальная аппроксимация практически незаменима при построении модели по ограниченному объему предыстории.

10. Величина интенсивности осадки играет более существенную роль с точки зрения суждения о происходящем процессе, чем ее абсолютная величина, что приводит к выводу о первостепенной роли величины интенсивности деформации при обосновании точности периодичности наблюдений. Данное условие можно записать в виде

$$\sigma T_\beta \leq |S_{t_{n+1}} - S_{t_n}|$$

11. Наблюдения за деформациями показали, что каждая в отдельности величина допуска не может служить состоятельной оценкой устойчивости сооружения. Поэтому для полного суждения об устойчивости сооружения методику наблюдений необходимо разрабатывать, исходя из комплексного влияния всех характеристик, имеющих предельные значения, а именно

$$\check{S}, \Delta\check{S}, \bar{k}, \bar{f}.$$

12. Приведена методика определения предельно допустимых значений неравномерностей осадок марок сооружения.

Результаты исследований могут быть использованы на геодезических предприятиях Республика Узбекистан при производстве геодезических наблюдений за деформациями и дадут экономический

эффект.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Нормативно – правовая документация:

1. ГОСТ 8.207—76. ГСИ. Прямые измерения с многократными наблюдениями. Методы обработки результатов наблюдений. Основные положения.
2. СНиП 2-15-74. Основания зданий и сооружений. Нормы проектирования М., Стройиздат, 1975.
3. Руководство по наблюдениям за деформациями оснований фундаментов зданий и сооружений. М., Стройиздат, 1975.

Произведения президента республики Узбекистан

И.А.Каримова:

4. Каримов И.А. «Узбекистан на пороге XXI в: угрозы безопасности, условия и гарантии прогресса» Т., 1997г.

Основная литература:

5. Бандурка В. И., Лошкарев Н. А. Об оптимальной частоте геодезических наблюдений осадок инженерных сооружений. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 4, 1972, с. 55—
6. Большаков В. Д., Гайдаев П. А. Теория математической обработки геодезических измерений. М., Недра, 1977.
7. Брайт П. И. Геодезические методы определения деформаций и сооружений. М., Недра, 1965.
8. Брайт П. И., Медвецкий Е. Н. Измерения осадок и деформаций геодезическими методами. М., Геодезиздат, 1959.
9. Бурхонов М.С. Аппроксимация и прогнозирование осадок фундаментов сооружений. Геодезия, картография и кадастр №1(3), Т., 2000, стр 6-8
10. Васютинский И. Ю. Гидростатическое нивелирование. М., Недра, 1976.
11. Гладкий В. И. К вопросу о точности определения осадок фундаментов промышленных зданий. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 3, 1973, с. 47—52.
12. Горелов В. А. Исследование и опыт применения высокоточных методов створных измерений при строительстве Серпуховского ускорителя. Автореф. канд. дис., М., МИИГАиК, 1974.
13. Гридчин А. Н. Выбор оптимального метода подбора уравнений осадок при их прогнозировании. — В кн.: Методы инженерной геодезии в ирригационном и гидротехническом строительстве. Ростов-на-Дону, 1973.
14. Гридчин А. Н. Прогнозирование затухающих осадок

инженерных сооружений по результатам геодезических наблюдений. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 1, 1970, с. 3—10.

15. Гуляев Ю. П. О точности математического описания процесса деформации основания фундамента. — Геодезия и картография, 1975, № 10, с. 27—33.

16. Исаков Э.Х., Бурханов М.С. Моделирование и прогнозирование осадок фундаментов памятников архитектуры – Проблемы архитектуры и строительства. Научно-технический журнал. сб., вып.2, 2012, стр 9-12

17. Кулешов Д. А., Гуляев Ю. П. Некоторые задачи и методологические принципы статистического моделирования деформаций оснований сооружений по геодезическим данным. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 4, 1976, с. 3—13.

18. Михелев Д. Ш., Рунов И. В., Голубцов А. И. Геодезические измерения при изучении деформации крупных инженерных сооружений. М., Недра, 1977.

19. Нестеренок М. С. О прогнозировании затухающей осадки. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 4. 1972, с. 77—81.

20. Николаев С.А. Статистические исследования осадок инженерных сооружений. М., Недра. 1983

21. Пилягин А. В. Опыт определения осадок фундаментов, по данным краткосрочных геодезических наблюдений. — Геодезия и картография, 1973, № 11, с. 28—31.

22. Пустыльник Е. И. Статистические методы анализа и обработки наблюдений. М., Наука, 1966.

23. Садакова Н. М. Анализ осадок сооружений средствами математической статистики. — Тр. Моск. ин-та ж.-д. транспорта, вып. 378, 1971, с. 40—53.

24. Суюнов А.С., Суюнов Ш.А., Аминжанова М.Б. и др. Виды деформации сооружений и причины их возникновения, - Проблемы архитектуры и строительства. Научно-технический журнал. сб., вып.4, 2012, с.11-13.

25. Суюнов А.С., Аминжанова М.Б. и др. Понятие об оптимальном эксперименте – «Иктидорли ёшлар ва уларнинг интеллектуал салохиятини руёбга чикариш» Мавзусидаги ёш олимлар, магистрант ва талабаларнинг анъанавий X республика илмий-амалий конференцияси Материаллари 1-кисм. 2013, с.112-115.

26. Шеховцев Г. А. О точности геодезических наблюдений за деформациями сооружений. — Геодезия, картография и аэрофотосъемка. Респ. междувед. на- учн.-техн. сб., вып. 22, 1975, с. 88—93.

Дополнительная литература:

27. Вергасов В. А., Журкин И. Г., Красикова М. А. Вычислительная математика, М., Недра, 1976.

28. Маркузе Ю. И. Алгоритм уравнивания геодезических сетей. М., Недра, 1972.

29. Новак В. Е., Горелов В. А., Ямбаев Х. К. Вероятностно-статистический анализ результатов створных измерений, производимых оптическим методом. — В сб.: Вопросы атомной науки и техники, сер. Проектирование, вып. 11, 1975, с. 39—44.

30. Пискунов М. Е., Нгуен Ван Дау. Метод высокоточного тригонометрического нивелирования коротким (до 100 м) лучом. — Изв. вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, вып. 6, 1971, с. 37—48.

31. Цытович Н. А., Зарецкий Ю. К., Малышев М. В. Прогноз скорости осадок оснований сооружений. М., Высшая школа, 1967.

32. Ямбаев Х. К. Высокоточные створные измерения. М., Недра, 1978.

Электронные ресурсы:

33. <http://www.revolution.allbest.ru> интернет сайт

34. <http://www.dissercat.com> интернет сайт