

УДК 528.48:626

DOI: 10.33764/2411-1759-2021-26-1-45-56

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ ДЕФОРМАЦИЙ ВОДОПОДПОРНЫХ ПЛОТИН

Хасан Джамил Аль Фатин

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, аспирант кафедры инженерной геодезии, тел. (999)218-52-59, e-mail: hasanjameel789@gmail.com

Мурат Газизович Мустафин

Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Россия, г. Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, доктор технических наук, профессор, зав. кафедрой инженерной геодезии, тел. (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

Оценка геотехнического состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) выполняется в соответствии с ГОСТ Р 22.1.11–2002, определяющим перечень основных показателей такого состояния. Одним из основных является гидростатическое давление, оказываемое на плотину массами воды. Приведен перечень основных показателей состояния водоподпорных гидротехнических сооружений и развития опасных процессов в грунтовых массивах, который предусматривает оценку вертикальных (осадки) и горизонтальных перемещений сооружений и их оснований. Таким образом, мониторинг выполняется по двум направлениям исследований – геотехническое и геодезическое. Как правило, геодезисты разрабатывают систему наблюдений, а геотехники с учетом этих данных определяют техническое состояние плотины. В статье приводится методика оценки геотехнического состояния плотин, направленная на сближение этих направлений. Учет гидростатического давления возможен за счет геодезического контроля уровня водной поверхности, подсчета запасов воды и соответственно давления на плотину. Эти данные вкуче с результатами натурных измерений дают возможность выделения критических и допустимых уровней воды, которые позволяют регламентировать порядок наблюдений в зависимости от уровня воды. Рассмотрен также важный вопрос о схеме размещения деформационных марок на плотине. Регулярное на равных расстояниях друг от друга расположение не всегда правомерно. Более эффективным способом представляется их расположение соразмерно напряженно-деформированному состоянию. На основе предварительного расчета выполнено нерегулярное размещение деформационных марок на плотине. Проведены проектирование и оценка точности деформационной сети. Приведенный подход реализуется на конкретном примере плотины Дукан в Ираке.

Ключевые слова: мониторинг, гидротехнические водоподпорные сооружения, геодезические наблюдения, деформации, водохранилище, давление вод, деформационная сеть

Введение

Устойчивость водоподпорных плотин в первую очередь определяется решением задач определения прочности используемого материала для возведения на стадии проектирования. Вместе с тем, в силу влияния различных факторов, в том числе природных, необходим постоянный контроль с оценкой и прогнозом деформации плотины.

Речь идет о системе мониторинга и составляющей ее части оценки состояния водоподпорных плотин, которая выполняется в соответствии с нормативными документами [1–3].

Воздействие не учтенных природных или техногенных факторов приводит к негативным процессам, таким как большие деформации или разрушения плотин. Так, одним из таких случаев является разрушение в 1959 г. плотины Мальпассе на реке Рейран во Франции. В результате аварии погибло 423 человека. В целом причиной явились деформации в породах основания плотины, которые не были учтены вследствие недостаточного объема исследований. Как часто бывает, было признано, что причина состоит в неизвестных силах природы (природный фактор) [4]. Известны также разрушения плотин, имевшие место в Ираке [5].

Оценка деформационного процесса тела плотины ведется с учетом данных геодезического контроля. Существующие методики [6–11] в основном ориентированы на обеспечение геодезических схем и точности наблюдений, увязка их с физическими факторами происходит лишь по этапам строительства гидротехнического сооружения. В то же время в исследованиях ряда специалистов [12–21] приводятся данные о существенном влиянии уровня воды водохранилища на деформации тела плотины. Кроме того, рассматриваются примеры использования при геодезических наблюдениях оценки деформированного состояния земной коры [19, 21]. При этом применялись разные методики наблюдений, включая спутниковые технологии.

В данной статье представлены результаты исследований по учету уровня воды водохранилища и определению схем геодезической деформационной сети, отвечающих деформированному состоянию тела плотины. Представлена методика построения трехмерной цифровой модели водохранилища на примере плотины Дукан (Ирак). С целью оценки точности выполнено моделирование геодезической деформационной сети для разных схем. При этом варьировались: количество исходных пунктов, длина расстояний от съемочных точек до деформационных марок и точности геодезических приборов (тахеометров). Кроме того, рассмотрен важный вопрос о нерегулярном расположении деформационных марок.

Методика исследований и результаты

Одним из наиболее традиционных источников данных для создания трехмерной цифровой модели местности являются их предшественники – топографические карты. С использованием ГИС-технологии карта сканируется и вводится в виде изображения в ГИС. Затем выполняются ее векторизация с выделением контурных линий и значимых элементов (точки возвышения, низины и т. д.) и преобразование в цифровой вид. При этом трехмерная цифровая модель создается в зависимости от точности карты, используемой в качестве источника [6–11].

Рассмотрим поэтапно создание трехмерной цифровой модели по топографическим картам дна водохранилища из нашего примера – водохранилище плотины Дукан. Используем карты масштаба 1 : 20 000 с высотой сечения рельефа 5 м. Все карты сканируются и вводятся в ГИС в виде изображений. Выполняется географическая привязка: все карты приводятся в одну систему координат и создается единый ансамбль. Использование указанного масштаба обосновывается ниже.

С использованием информационной системы ArcGIS 10.4./ Arc map растры были скоординированы со ссылкой на зональную систему координат UTM (зона 38N), являющейся центральной зоной Ирака, и геоцентрическую систему WGS 84. На рис. 1 показана мозаика (сшивка фрагментов) территории водохранилища Дуканской плотины.

Фактические данные об уровне воды в водохранилище позволили определить среднюю отметку (500 м) над уровнем Персидского залива. Цель построений – определение объема водной массы, который в последующем сопоставляется с фактическими данными о деформациях плотины. Программно можно выбрать любой уровень и определить объем водохранилища. Порядок определения объема в ArcGIS 10.4. (использование возможностей трехмерной аналитики для расчета объема воды в водохранилище на уровне 500 м над средним уровнем моря) предусматривает создание треугольной нерегулярной сети и в конечном итоге – цифровой модели водохранилища (см. рис. 1, б). На основе построенной модели выполнен расчет объема воды, который составил 4,3 млрд м³.

Рассмотренный способ построения цифровой модели возможен не всегда. Например, нет топографической карты местности. В этом случае выполняются топографические и гидрографические работы. Первые связаны с картографированием земной поверхности [3, 22], вторые – с батиметрической съемкой дна водохранилища. При наличии этих данных процесс построения цифровой модели аналогичен описанному выше.

Объем водохранилища был сопоставлен с фактическими данными, которые показали,

что горизонтальные смещения плотины напрямую зависят от уровня воды. Тогда порядок выполнения мониторинговых наблюдений должен быть скорректирован результатами приведенных сопоставлений. Целесообразно выделение трех уровней воды в водохранилище: неопасный, предупредительный и опасный. Геодезические наблюдения следует выполнять в опасный и предупредительный периоды. При этом частота наблюдений в предупредительный период должна соответ-

ствовать нормативным рекомендациям [1–3], а в опасный период стать ежедневной. Существует возможность автоматизировать указанные процессы за счет установки роботизированных измерительных станций. Для водохранилища Дукан по данным многолетних наблюдений опасным и предупредительным следует считать уровни выше отметки 500 м (рис. 2). При этих уровнях смещения плотины направлены в сторону нижнего бьефа, что говорит о работе ее тела на сжатие.

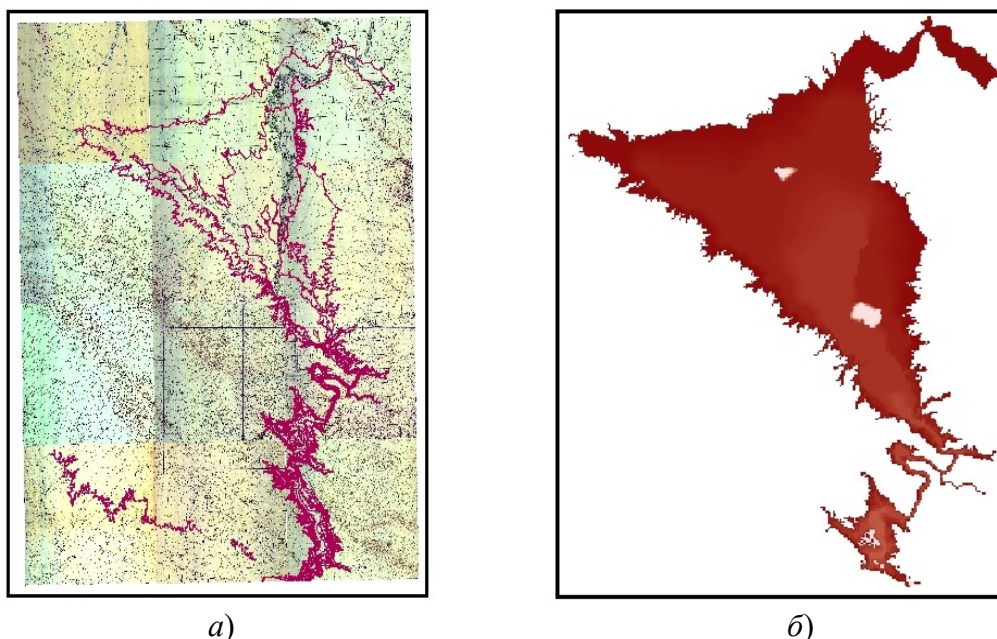


Рис. 1. Фрагменты процесса моделирования водохранилища Дукан:

а) топографическая карта территории (начальный фрагмент); *б)* цифровая модель водохранилища (конечный фрагмент)

Использование цифровой модели позволяет оперативно определять объемы воды по текущему уровню водохранилища. Это необходимо для геотехнического анализа ситуации, при котором используются расчетные методы оценки напряженно-деформированного состояния самой водоподпорной плотины. Такой анализ целесообразно выполнять и с целью уточнения критических значений давлений на плотину (уровня воды), и для оптимизации геодезической деформационной сети, включая определение расстояний между деформационными марками.

Для обеспечения безопасного функционирования плотин требуется выполнение мо-

нитинговых наблюдений с высокой точностью.

Нормы точности измерений смещений для скальных оснований не должны превышать одного миллиметра [1–3]. Выполнение этих требований связано с тщательным проектированием измерений. При этом для моделирования и оценки выполненных наблюдений не обойтись без использования компьютерных технологий и метода наименьших квадратов (МНК) [23, 24]. Существует целый ряд методик геодезического мониторинга плотин, основанных на триангуляционных или трилатерационных методах измерения [15–17].

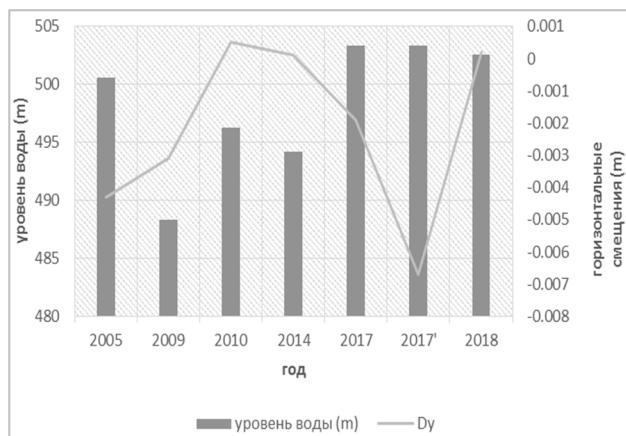


Рис. 2. Графики уровней воды и горизонтальных смещений

Почему принят масштаб 1 : 20 000? Задача состояла в определении объема водной массы для дальнейшего выявления расчетным путем распределения деформаций в плотине. Тот очевидный факт, что чем больше объем воды, тем выше давление на плотину, принимается безусловно. Однако распределение деформаций в плотине качественно будет одинаково при различном, но довольно близком объеме воды. Поэтому решалась задача определения масштаба, достаточного для определения такого близкого объема воды. Проще говоря, проведена оценка возможности использования широко используемых мелких масштабов.

На основе норм точности построения топографических карт [22] смоделированы цифровые модели для разных типов рельефов и масштабов. В среде Autocad строилась некая идеальная модель, которая в характерных точках изменялась на величину графической точности соответствующего масштаба. В нашем случае мы оценили погрешности построения карт для масштабов 1 : 1 000 – 1 : 100 000. С использованием ГИС (GIS10.4/ArcMap/3D Analyst tool) создали для этих масштабов модели. Для топоосновы, отвечающей водохранилищу Дуكان, получили следующие объемы воды для разных масштабов (рис. 3).

Как видно из рис. 3, расчетный объем воды существенно зависит от масштаба карты или точности измерений. Вместе с тем, важно оценить, насколько эти изменения существенны при оценке распределения напряженно-деформированного состояния плотины.

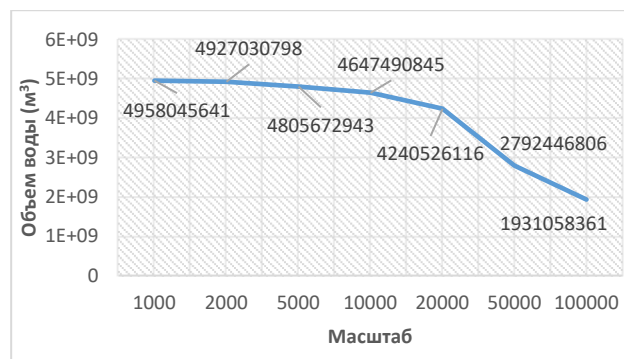


Рис. 3. График изменения объемов воды от масштаба карты

Известно, что давление воды в водоемах любой формы распределяется равномерно во всех направлениях, то есть наблюдается так называемый гидростатический эффект. При этом давление определяется весом столба, равным глубине водоема. Относительно плотины Дукан при расчетном объеме в 4,24 млрд м³ при увеличении точности измерений мы бы получили объем приблизительно на 14 % больше, или 4,96 млрд м³. При площади зеркала воды в 192 км² и принятии с запасом, что и дно водоема имеют такую же площадь, мы получим глубину водохранилища от 22 до 25 м. Если взять давление на среднюю часть плотины, то разница в глубине составит около 1,5 м. С другой стороны, мы видим, что принятие для измерения объема масштаба мельче 1 : 20 000 дает существенное уменьшение объема (см. рис. 3). Таким образом для определения характера распределения напряжений и деформаций в плотине масштаба 1 : 20 000 вполне достаточно. Следует подчеркнуть, что речь идет о качественной оценке для эффективного расположения деформационных марок. Безусловно, количественная оценка, особенно с учетом прочности материала плотины, будет совсем другой. Собственно уровень воды как раз и будет одним из главных факторов, по которому следует ориентироваться при проведении геодезических наблюдений за деформациями плотины. Далее разработана расчетная схема для оценки напряженно-деформированного состояния (НДС) плотины.

Моделирование выполнено в программном комплексе (ПК) «НЕДРА» [23]. Модель

приведена на рис. 4. Задача состояла в определении распределения НДС в плотине. Для этого использована классическая арочная форма, при которой арка принимает и испытывает преимущественно сжимающие нагрузки. Форма плотины в плане в виде прямолинейного строения однозначно определяет неравномерность деформирования (изгиб балки) и интерес представляют именно арочные плотины. Как было сказано выше, вода оказывает равное давление на границы водохранилища. Учтем важный момент, связанный с гидростатическим давлением, обеспечивающим равномерные нагрузки на плотину. Эти условия обеспечиваются решением плоской задачи НДС. При этом расчетная модель водохранилища моделируется элементами с объемным весом, равным воде ($1\ 000\ \text{кг/м}^3$), модулем упругости (E_v)

1 ГПа и коэффициентом Пуассона, близким к 0,5, что обеспечивает гидростатическое давление. Плотина моделировалась материалом, близким к бетону с $E_6 = 50\ \text{ГПа}$. Массив горных пород с $E_{\text{МП}} = 10\ \text{ГПа}$. Угол внутреннего трения принят для всех элементов равным 0,3. Пространство за плотинной моделировалось как пустота (элементы были удалены). Размеры модели – 320 на 200 м. На границах модели приняты условия их неподвижности.

На рис. 5 представлена конечно-элементная модель, состоящая из 5 тыс. треугольных элементов. Предусмотрено сгущение элементов в зонах возможных деформаций и разрушений.

Еще более рельефно просматривается неоднородность напряженности плотины на рис. 6, а, где приведены деформации сдвига.

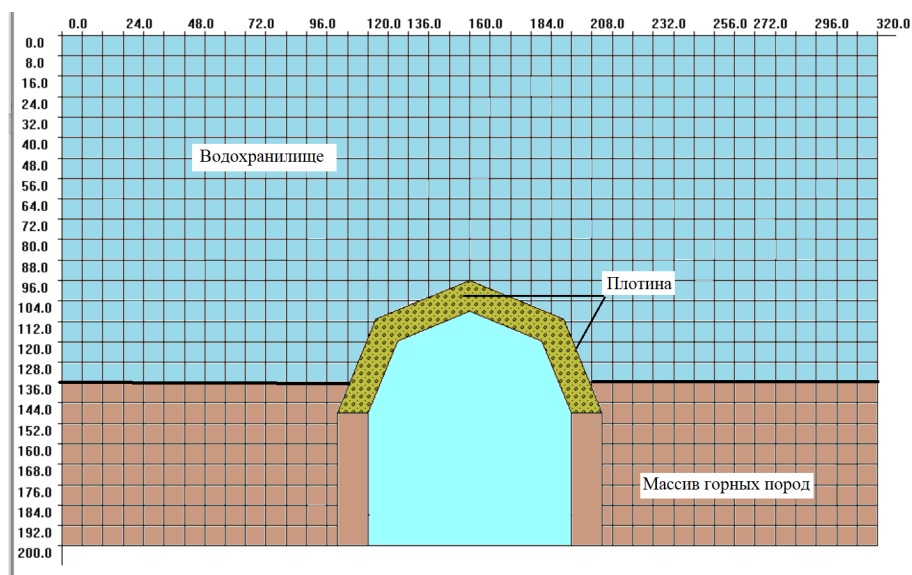


Рис. 4. Расчетная модель для оценки НДС плотины

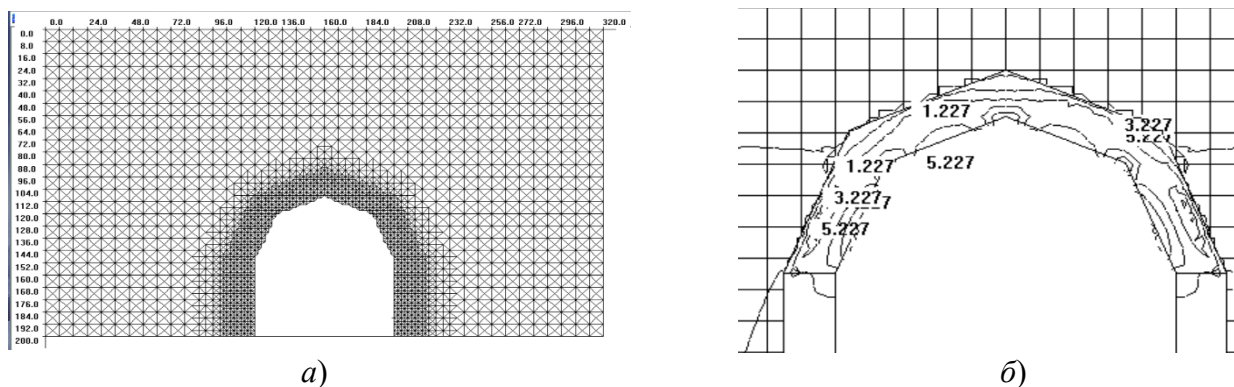


Рис. 5. Иллюстрация напряженного состояния:

а) конечно-элементная модель; б) изолинии главных напряжений (МПа)

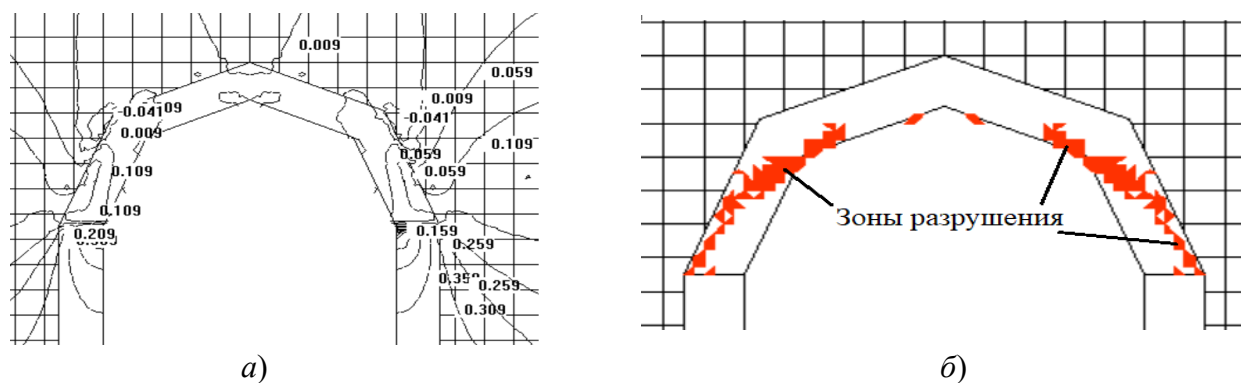


Рис. 6. Картины деформированного состояния:

а) изолиний деформаций сдвига в плотине; б) распределения возможных зон разрушения

В результате расчетов получено распределение главных напряжений (МПа) в плотине (см. рис. 5, б). Видно, что напряжения имеют зоны концентрации, которые сосредоточены в боковых частях плотины.

При моделировании разной прочности материала плотины (условно принимались прочности, при которых возможны разрушения) получены картины возможных ее разрушений (см. рис. 6, б), которые явно свидетельствуют о неравномерности нагружения плотины и акцентировании внимания при изучении деформационного процесса на этих зонах. Это представляется важным в связи с тем, что, как правило, деформационные марки на плотине располагают равномерно, на равных расстояниях.

Эти исследования позволяют проектировать деформационную сеть неравномерно с акцентом на возможные зоны разрушения (см. рис. 6, б), которые прежде всего надо контролировать.

Важным вопросом при мониторинге плотин является предрасчет точности измерений. Для плотины Дукан выполнены предрасчеты для нескольких вариантов, по своим параметрам, охватывающие практически важные случаи (рис. 7).

Моделирование точности измерений выполнялось следующим образом. Использовался МНК в модификации использования конфигурационной матрицы измеренных расстояний между пунктом наблюдений и деформационными марками.

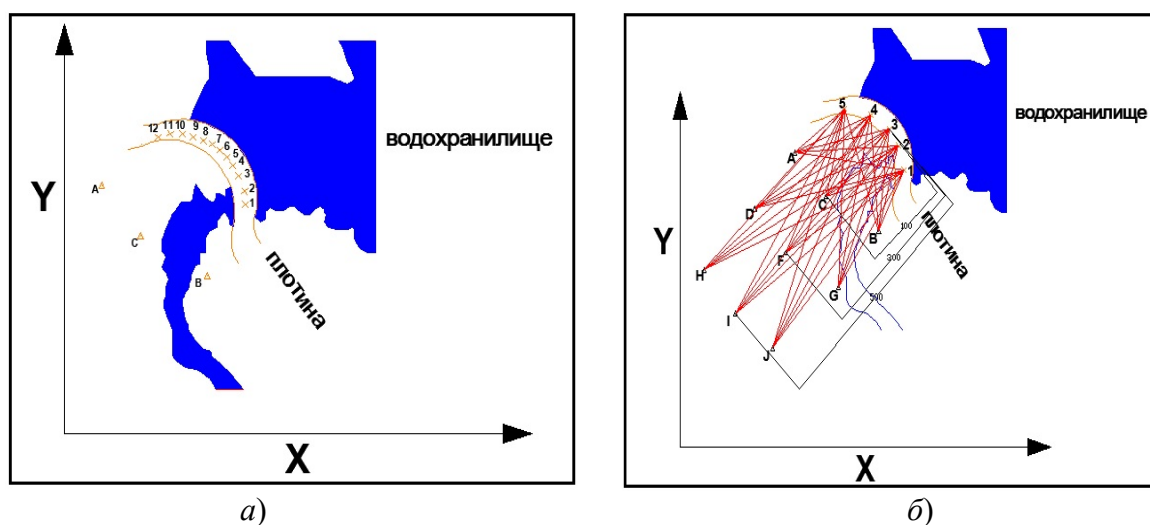


Рис. 7. Схематизация организации наблюдений:

а) схема плотины Дукан с указанием деформационных марок; б) модельные схемы для оценки точности координат деформационных марок

Конфигурационная матрица – это модифицированная матрица коэффициентов параметрических уравнений A [25]. Для случая уравнивания измерений в обобщенном виде (когда требуется только оценка погрешностей измерений): ячейки, отвечающие направлениям измерений, принимают значения 1 или -1 (-1 , когда рассматривается обратное направление, методика подобна оценке точности высотных сетей). Детальный алгоритм описан в ряде источников, например в [23, 25].

В нашем случае выполнено моделирование точности определения координат деформационных марок по линейным измерениям от трех станций измерений на пять целей (марок, см. рис. 7, б). При оценке точности виртуальных измерений использовалось фундаментальное соотношение между координатами точек (пунктов сети) и длинами линий. В программе AutoCAD строилась схема деформационной сети (см. рис. 7, б). При этом A, B, C – это исходные пункты (в то же время тахеометрические станции, с которых определялись расстояния до деформационных марок) с известными координатами, которые располагали в вариантах моделирования от деформационных марок на расстояниях 100, 300 и 500 м. Под номерами обозначены деформационные марки. При моделировании использовали пять марок. Расстояния от исходных пунктов до деформационных марок определялись в программе AutoCAD. Вектор измеренных расстояний моделировался с использованием формулы паспортной точности измерения расстояний. Точки A, B, C (см. рис. 7, б) при моделировании и располагали на разных расстояниях от деформационных марок (от примерной их фронтальной линии), и ориентировали под углами 90° и 45° к средней линии фронта.

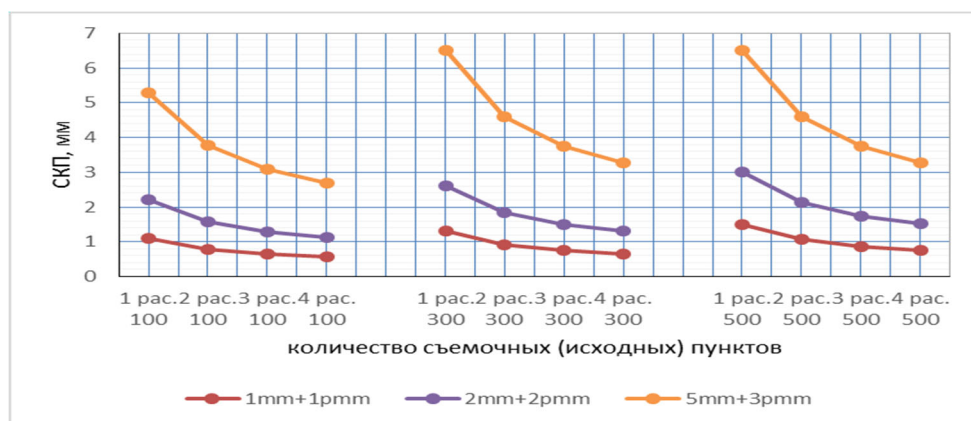
Кроме того, моделировались случаи, когда измерения выполнялись с одного и двух тахеометрических пунктов. Понятно, что когда измерения выполнены с одного пункта, то они будут соответствовать паспортной точности измерений. С увеличением избыточных

равноточных измерений, когда выполнены измерения с двух пунктов при их уравнивании, точность повышается. Моделирование точности определения координат деформационных марок по рассмотренным схемам выполнялось с учетом разной точности измерений приборов. Использовались тахеометры с точностью измерения расстояний от $1 \text{ мм} + 1 \text{ ppm}$ до $5 \text{ мм} + 3 \text{ ppm}$.

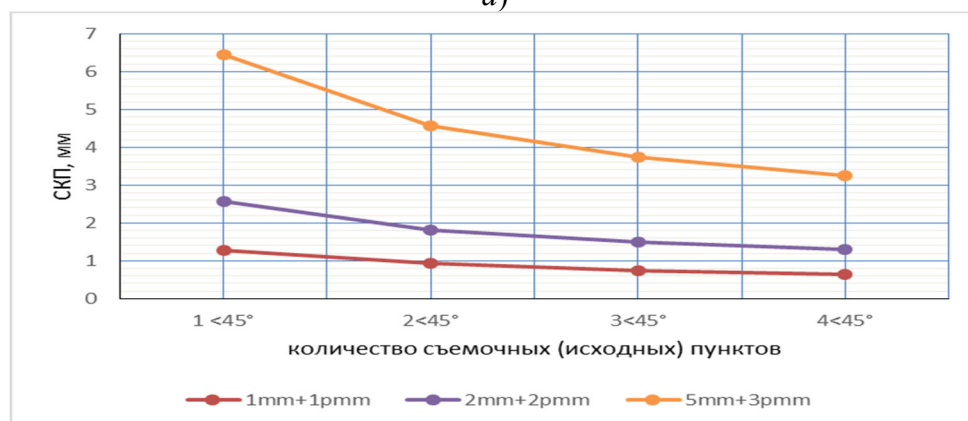
На рис. 8 показаны результаты моделирования. На оси ординат приведены средние квадратические погрешности (СКП) определения координат деформационных марок. На рис. 8, а на оси абсцисс размещены расстояния от тахеометрических станций (A, B, C – см. рис. 7) до фронта деформационных марок (100, 300 и 500 м).

При каждом моделируемом расстоянии рассматривались измерения с одной-четырёх съёмочных точек и разная точность тахеометра. На рис. 8, б, в на оси абсцисс приведены углы измерений. Представленные зависимости свидетельствуют об увеличении точности определения координат деформационных марок с ростом количества съёмочных точек (пунктов измерений). С отклонением условной линии измерений от фронта расположения деформационных марок погрешность возрастает. Факт увеличения точности при росте числа съёмочных точек известен, и в данном исследовании приводится применительно к конкретному объекту и в контексте с разработкой принципов деформационного мониторинга. Важно подчеркнуть общую методологию.

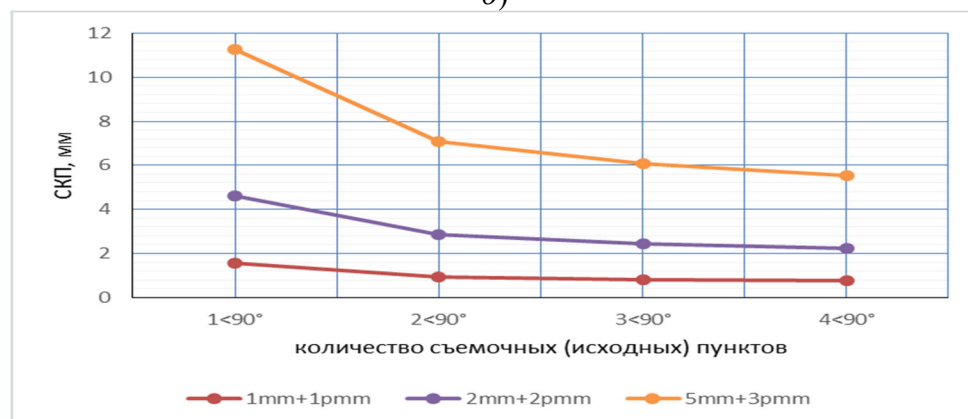
Графики точности позволяют ориентироваться при организации мониторинга деформационного процесса на плотинах. При скальных грунтах при возможности расположения исходных пунктов фронтально целям (деформационным маркам) можно использовать тахеометр с точностью 2 мм. При невозможности параллельного расположения следует использовать тахеометр с точностью 1 мм. Исходных пунктов при этом должно быть более двух.



а)



б)



в)

Рис. 8. Результаты моделирования СКП определения координат деформационных марок: а) фронтальное расположение исходных пунктов относительно условной линии деформационных марок; б) расположение под углом 45° ; в) расположение под углом 90°

Заключение

При проведении геодезических наблюдений за деформациями водоподпорных плотин необходимо учитывать уровень воды в водохранилище. При этом на основании опытных многолетних данных о зарегистрированных

смещениях возможно увязывание их с уровнем, а еще целесообразнее – с давлением воды на плотину, посредством оценки в программах, реализующих конечно-элементный анализ напряжений и деформаций. Такая оценка позволит упорядочить наблюдения и, возможно, исключить их в периоды «низ-

кой воды». В случае «высокой воды» интервал между наблюдениями возможен до одного раза в месяц и еще реже в соответствии с нормами [2].

Важным вопросом является оценка НДС плотины и на этой основе проектирование деформационных марок в ее теле. Рассмотренный в данной работе пример отчетливо показывает целесообразность такого подхода, который существенно повысит точность прогноза аварийных ситуаций.

Проведена оценка точности определения координат деформационных марок в зависимости от расстояний до исходных (съёмочных) пунктов, угла между линией деформационных марок и исходных пунктов и паспортной точности используемых электронных тахеометров. По результатам проведенных исследований имеется возможность выбора средств измерений и схем деформационной сети для обеспечения требуемой точности измерений на плотине Дукан.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Государственный стандарт Российской Федерации. ГОСТ Р 22.1.11–2002. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг состояния водоподпорных гидротехнических сооружений (плотин) и прогнозирование возможных последствий гидродинамических аварий на них. Общие требования [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
2. Правила проведения натурных наблюдений за работой бетонных плотин. РД 153-34.2-21.545–2003 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
3. СП 11-104–97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Часть III. Инженерно-гидрографические работы при инженерных изысканиях для строительства [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
4. Плотина Мальпассе́ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Плотина_Мальпассе.
5. Is Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World? Review of Previous Work and Possible Solutions / N. Al-Ansari, N. Adamo, V. Sissakian, S. Knutsson, J. Laue // Engineering. – 2017. – Vol. 1947–394X. – P. 801–823. doi:10.4236/eng.2017.910048.
6. Скрипников В. А., Скрипникова М. А. Геодезические наблюдения за горизонтальными смещениями плотин // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Междунар. науч. конф. «Геодезия, геоинформатика, картография, маркшейдерия» : сб. материалов в 2 т. (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. Т. 1. – С. 9–12.
7. CECW-EP. Engineer Manual EM-1110-2-1004. Engineering and Design. Deformation Monitoring and Control Surveying. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000. – 1994. – P. 3–5.
8. Erol S., Erol B., Ayan T. A. general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling // XXth ISPRS Congress. – 2004. – Vol. VII, WG VII/5. – P. 12–23.
9. Gökalp E., Taşçı L. Deformation monitoring by GPS at embankment dams and deformation analysis // Survey Review. – 2009. – Vol. 41,311. – P. 86–102. doi 10.1179/003962608X390021.
10. Ali A., Mohamed E. S., Belal A., El-Shirbeny M. GIS spatial model based for DAM reservoir on dry Wadis // 36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia, Proceeding. – 2015. – P. 15.
11. Бугакова Т. Ю., Басаргин А. А., Каленицкий А. И. Применение ГИС-технологий и методов тематического моделирования для определения крена плиты фундамента инженерного сооружения // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 2. – С. 70–78.
12. Charles D. Adjustment computations Spatial Data Analysis. – fifth edition. – New Jersey : JOHN WILEY & SONS, INC., 2010. – 240 p.
13. CECW-EE. Engineer Manual EM-1110-2-1009. Engineering and design. Structural deformation surveying. Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000. – 2002. – P. 1–2.
14. Fonseka P. G. C. C. Project Triangulation 2014. – Sabaragamuwa University of Sri Lanka. – 2014. – P. 51. doi: 10.13140/RG.2.1.4103.5680.
15. Herbei M. V. et al. Georeferencing of topographical maps using the software ARCGIS // Research Journal of Agricultural Science. – 2010. – Vol. 42(3). – P. 595–606.

16. Levin E. et al. Bathymetric surveying in Lake Superior: 3D modeling and sonar equipment comparing // The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – 2019. – Vol. XLII-2/W10. – P. 101–106.
17. Salih S. A., Al-Tarif A. S. M. Using of GIS spatial analyses to study the selected location for dam reservoir on Wadi Al-Jirnaf. West of Shirqat Area, Iraq // Journal of Geographic Information System. – 2012. – Vol. 4, No. 2. – P. 117–127. doi:10.4236/jgis.2012.42016.
18. Soycan A., Soycan M. Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation // Arabian Journal for Science and Engineering. – 2012. – Vol. 34 – P. 121.
19. Кобелева Н. Н., Хорошилов В. С. Построение по геодезическим данным прогнозной модели процесса перемещений гребня плотины Саяно-Шушенской ГЭС (на этапе эксплуатации 2007–2009 гг.) // Вестник СГУГиТ. – 2015. – Вып. 4 (32). – С. 5–12.
20. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016. XII Междунар. науч. конгр. : Пленарное заседание : сб. материалов (Новосибирск, 18–22 апреля 2016 г.). – Новосибирск : СГУГиТ, 2016. – С. 19–31.
21. Мазуров Б. Т. Геодинамические системы (теоретические основы качественного исследования горизонтальных движений) // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 26–35.
22. ГКИНП-02-033–82. Инструкция по топографической съемке в масштабах 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 и 1 : 500 [Электронный ресурс]. – Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс».
23. Мустафин М. Г., Грищенко Е. Н., Юнее Ж. А., Худяков Г. И. Современное маркшейдерско-геодезическое обеспечение эксплуатации горных предприятий // Изв. Тульского государственного университета. Науки о Земле. – 2017. – Вып. 4. – С. 190–203.
24. Зенкевич О. Метод конечных элементов в технике. – М. : Мир, 1975. – 271 с.
25. Гудков В. М., Хлебников А. В. Математическая обработка маркшейдерско-геодезических измерений : учеб. для вузов. – М. : Недра, 1990. – 335 с.

Получено 22.04.2020

© Хасан Джамил Аль Фатин, М. Г. Мустафин, 2021

METHOD FOR DEFORMATION MONITORING OF WATER-BEARING DAMS

Hasan Jamil Al Fatin

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, Ph. D. Student, Department of Engineering Geodesy, phone: (999)218-52-59, e-mail: hasanjameel789@gmail.com

Murat G. Mustafin

St. Petersburg Mining University, 2, Vasilievsky Island, 21 line, St. Petersburg, 199106, Russia, D. Sc., Professor, Head of the Department of Engineering Geodesy, phone: (812)328-86-84, e-mail: mustafinm@mail.ru

Monitoring of the condition of water-supporting hydraulic structures (dams) is carried out in accordance with GOST R 22.1.11–2002, which determines the list of main load indicators including hydrostatic pressure exerted on the dam. The article gives the list of the main indicators of the condition of water-supporting hydraulic structures and the development of hazardous processes in soil massifs, which provides for the assessment of vertical (precipitation) and horizontal movements of structures and their bases. Thus, monitoring is carried out in two areas of research: the first is geotechnical; the second is geodetic. As a rule, surveyors develop an observation system, and geotechnicians, taking into account these data, determine the state of the dam. The article provides a methodology for geotechnical dam condition that combines these two areas. Accounting for hydrostatic pressure is possible due to geodetic control of the water surface level and calculation of water reserves and, accordingly, the pressure on the dam. These data, together with the results of field measurements, make it possible to identify critical and permissible water levels, which allow us to regulate the observation order depending on the water level. The article also considers an important issue about the scheme of deformation marks location on the dam. Regular distance location is not always appropriate. A more effective way is to locate them in accordance with the stress-strain state. On the basis of pre-calculation there was carried out irregular location of the deformation marks on the dam as well as the design and accuracy assess-

ment of deformation network. The afore-mentioned approach is implemented on a specific example of the Dukan Dam in Iraq.

Keywords: monitoring, hydraulic water-bearing constructions, geodetic observations, deformations, reservoir, water pressure, deformation network

REFERENCE

1. The Government Standard of the Russian Federation. (2002). GOST R 22.1.11–2002. Safety in emergency situations. Monitoring the status of water-supporting hydraulic structures (dams) and predicting the possible consequences of hydrodynamic accidents on them. General requirements. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
2. Guidance Paper RD 153-34.2-21.545–2003. (2003). Rules for conducting field observations of the operation of concrete dams. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
3. Code of Practice SP 11-104–97. (1997). Engineering and geodetic surveys for construction: Part III, Engineering and hydrographic work during engineering surveys for construction, Gosstroy of Russia. SP 11-104–97. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
4. Dam Malpasse. (n. d.). Retrieved from https://ru.wikipedia.org/wiki/Плотина_Мальпассе.
5. Al-Ansari, N., Adamo N., Sissakian V., Knutsson S., & Laue J. (2017). Is Mosul Dam the Most Dangerous Dam in the World? Review of Previous Work and Possible Solutions. *Engineering, 1947–394X*, 801–823. doi: 10.4236/eng.2017.910048.
6. Skripnikov, V. A., & Skripnikova, M. A. (2016). Geodetic observations of horizontal displacements of dams. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii: T. 1. Geodeziya, geoinformatika, kartografiya, marksheyderiya [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: International Scientific Conference: Vol. 1. Geodesy, Geoinformatics, Cartography, Mine Surveying]* (pp. 9–12). Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
7. CECW-EP. Engineer Manual EM-1110-2-1004. (1994). Engineering and Design. Deformation Monitoring and Control Surveying (pp. 3–5). Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000.
8. Erol, S., Erol, B., & Ayan, T. (2004). A general review of the deformation monitoring techniques and a case study: analysing deformations using GPS/levelling. *XXth ISPRS Congress, VII, WG VII/5*, 12–23.
9. Gökalp, E., & Taşçı, L. (2009). Deformation monitoring by GPS at embankment dams and deformation analysis. *Survey Review, 41*(311), 86–102. doi 10.1179/003962608X390021.
10. Ali, A., Mohamed, E. S., Belal, A., & El-Shirbeny, M. (2015). GIS spatial model based for DAM reservoir on dry Wadis. *Proceeding of 36th Asian Conference on Remote Sensing: Fostering Resilient Growth in Asia* (P. 15).
11. Bugakova, T. Yu., Basargin, A. A., & Kalenitskiy, A. I. (2018). Application of GIS technologies and methods of mathematical modeling for definition of plate roll is the Foundation of engineering structures. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT], 23*(2), 70–78 [in Russian].
12. Charles, D. (2010). *Adjustment computations Spatial Data Analysis* (5th ed.). New Jersey: JOHN WILEY & SONS, INC, 240 p.
13. CECW-EE. Engineer Manual EM-1110-2-1009. (2002). Engineering and design. Structural deformation surveying (pp. 1–2). Department of the Army U.S. Army Corps of Engineers. Washington, DC 20314-1000.
14. Fonseka, P. G. C. C. (2014). Project Triangulation 2014. Sabaragamuwa University of Sri Lanka, P. 51. doi: 10.13140/RG.2.1.4103.5680.
15. Herbei, M. V., & et al. (2010). Georeferencing of topographical maps using the software ARCGIS. *Research Journal of Agricultural Science, 42*(3), 595–606.
16. Levin, E., & et al. (2019). Bathymetric surveying in Lake Superior: 3D modeling and sonar equipment comparing. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, XLII-2/W10*, 101–106.
17. Salih, S. A., Al-Tarif, A. S. M. (2012). Using of GIS spatial analyses to study the selected location for dam reservoir on Wadi Al-Jirnaf. West of Shirqat Area, Iraq. *Journal of Geographic Information System, 4*(2), 117–127. doi:10.4236/jgis.2012.42016.
18. Soycan, A., & Soycan, M. (2009). Digital elevation model production from scanned topographic contour maps via thin plate spline interpolation. *Arabian Journal for Science and Engineering, 34*, 121.

19. Kobeleva, N. N., & Khoroshilov, V. S. (2015). Construction of a forecast model of the process of moving the crest of the dam of the Sayano-Shushenskaya hydroelectric station (during the operation phase 2007–2009). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 4(32), 5–12 [in Russian].
20. Hiller, B., & Yambaev, H. K. (2016). Development and full-scale testing of the automated system of deformation monitoring. In *Sbornik materialov Interekspo GEO-Sibir'-2016: Plenarnoe zasedanie [Proceedings of Interexpo GEO-Siberia-2016: Plenary Session]* (pp. 19–31): Novosibirsk: SSUGT Publ. [in Russian].
21. Mazurov, B. T. (2016). Geodynamic systems (theoretical foundations of qualitative studies of horizontal movements). *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33), 26–35 [in Russian].
22. Geodetic, Cartographic Instructions, Norms and Regulations GKINP-02-033–82. (1982). Instructions for topographic surveys on a scale of 1 : 5 000, 1 : 2 000, 1 : 1 000 and 1 : 500. Retrieved from ConsultantPlus online database [in Russian].
23. Mustafin, M. G., Grischenkova, E. N., Yunee, Zh. A., & Khudyakov, G. I. (2017). Modern surveying and geodetic support for the operation of mining enterprises. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta [News of Tula State University]*, 4, 190–203 [in Russian].
24. Zenkevich, O. (1975). *Metod konechnykh elementov v tekhnike [The finite element method in technology]*. Moscow: Mir Publ., 271 p. [in Russian].
25. Gudkov, V. M., & Khlebnikov, A. V. (1990). *Matematicheskaya obrabotka markshejdersko-geodezicheskikh izmerenij [Mathematical processing of surveying and geodetic measurements]*. Moscow: Nedra Publ., 335 p. [in Russian].

Received 22.04.2020

© Hasan Jamil Al Fatin, M. G. Mustafin, 2021