

МОНИТОРИНГОВЫЕ СИСТЕМЫ В ГОРНОМ ДЕЛЕ

УДК 627.514.2:528.02 + 627.514.2:622.1

ОБОСНОВАНИЕ ТОЧНОСТИ МАРКШЕЙДЕРСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ДАМБ НАКОПИТЕЛЕЙ ЖИДКИХ ОТХОДОВ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ

С. П. Бахаева, Т. В. Михайлова

*Кузбасский государственный технический университет им. Т. Ф. Горбачева,
E-mail: baxaevas@mail.ru, mtv238@mail.ru, ул. Весенняя, 28, 650026, г. Кемерово, Россия*

Предложен подход к обоснованию точности маркшейдерского контроля при мониторинге безопасности грунтовых дамб на примере накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий. На основе системной структуризации типов грунтовых дамб и их конструктивных элементов, оценки влияния нагрузок и воздействий на эти сооружения, а также анализа риска аварий методом “Анализ опасности и работоспособности” построена идеальная знаковая модель системы мониторинга безопасности грунтовых дамб и установлен состав натуральных наблюдений, необходимый для фиксирования опасных отклонений и предотвращения гидродинамической аварии. Путем моделирования идеальной грунтовой дамбы определены критерии ее напряженно-деформированного состояния. Из условия недопущения нарушения состояния предельного равновесия грунтового сооружения установлены требования к точности маркшейдерского контроля плано-высотного положения конструктивных элементов дамбы.

Мониторинг безопасности, критерий безопасности, грунтовая дамба, коэффициент устойчивости, напряженно-деформированное состояние, маркшейдерский контроль, средняя квадратическая погрешность

Технологический процесс многих горнопромышленных предприятий предполагает наличие гидротехнических сооружений (ГТС) накопителей жидких отходов, эксплуатация которых в большинстве случаев сопряжена с риском возникновения аварий. Только за последние 5 лет в мире произошло свыше 300 аварий, при этом аварийность в России в 2.5 раза превысила средний мировой показатель. По статистическим данным, из 1150 случаев разрушений напорных гидротехнических сооружений, зафиксированных в 35 странах мира, 36% — это повреждения грунтовых плотин (дамб) и их оснований [1]. На гидротехнических сооружениях чаще всего происходят разрушения тела (~47%) и основания (25%) дамб высотой 5 ÷ 15 м (~11%) и 15 ÷ 30 м (~46%), приводящие к гидродинамическим авариям с катастрофическими последствиями: затопление и загрязнение промышленными отходами земель территории нижнего бьефа; подтопление и разрушение автомобильных и железных дорог, частных жилых домов и дачных строений; загрязнение поверхностных водных объектов. Для условий Кузбасса, где эксплуатируют около 170 комплексов накопителей жидких отходов промышленных предприятий,

деструктивными процессами, приводящими к деформациям и разрушению грунтовых дамб, являются: сосредоточенная фильтрация с признаками суффозии (32 %), перелив воды через гребень (21 %), рост избыточного порового давления (11 %) и подрabотка сооружений подземными горными работами (36 %) [2].

Около 70 % гидротехнических сооружений Кузбасса относятся к IV классу и характеризуются высотой напора от 5 до 15 м, однако в силу конструктивных особенностей под воздействием природных и техногенных факторов риск возникновения опасных повреждений и аварий на таких сооружениях чрезвычайно высок [3]. В отличие от сооружений I, II и III классов, гидротехнические сооружения IV класса в большинстве своем не оснащены контрольно-измерительной аппаратурой (КИА), в их емкостях установлены только водомерные рейки.

Отсутствие эффективной системы наблюдений не позволяет своевременно фиксировать деструктивные процессы, вследствие чего происходят деформации сооружений, вызывающие нарушение технологического режима работы предприятия, а также возникновение гидродинамических аварий, приводящих к чрезвычайным ситуациям от локального до федерального характера, дополнительному загрязнению акватории. Ежегодный объем сточных вод для Кузбасса составляет 1515.44 млн м³/год [4].

Разработанные и реализованные в настоящее время в практике горнопромышленных предприятий методы мониторинга безопасности ГТС, включающие визуальные и инструментальные наблюдения с использованием контрольно-измерительной аппаратуры, в целом позволяют контролировать состояние грунтовых дамб, свойства слагающих их грунтов, интенсивность протекающих в теле и основании сооружений фильтрационных и деформационных процессов. Вместе с тем отсутствуют четко установленные взаимосвязи между конструктивными особенностями грунтовых сооружений, подверженных воздействию нагрузок природного и техногенного характера, и объектами мониторинга, количественными и качественными критериями безопасности этих сооружений, видами и методами натурных наблюдений, а также требования к их точности. Кроме того, существующие нормативно-методические документы (инструкции, СНиПы, Руководства и т. п.) устарели и не отвечают современным требованиям проведения геодезического мониторинга гидротехнических сооружений [5].

В настоящей работе изложены результаты исследований по обоснованию требований к точности определения пространственно-временного местоположения элементов (объектов мониторинга) грунтовых дамб и установленной на них КИА.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА БЕЗОПАСНОСТИ ГРУНТОВЫХ ДАМБ

Анализ совокупности накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий, разделяемых в зависимости от вида отходов и назначения емкостей, рельефа участка местности, способа устройства и технологии заполнения, а также опыта их эксплуатации при ведении горных работ и работ по обогащению полезных ископаемых, показал, что наиболее уязвимыми являются накопители, огражденные дамбами [6].

Многообразие типов грунтовых дамб (земляные насыпные, земляные намывные, каменно-земляные и каменно-набросные), классифицируемых по конструктивным особенностям на однородные и неоднородные, последние из которых разделяются на сооружения с противofильтрационными устройствами в теле и основании сооружения, а также дренажными устройствами, предопределило необходимость структуризации накопленной информации по мониторингу безопасности гидротехнических сооружений.



Рис. 1. Схема структуризации системы мониторинга безопасности ГТС

В качестве научного метода, позволяющего выполнить системную структуризацию, принят метод системного анализа, идея которого заключается в разделении сложной проблемы на подпроблемы (этапы) до определенного уровня, т. е. построение иерархической схемы, отражающей модель системы мониторинга безопасности ГТС (рис. 1).

Первый уровень иерархической схемы — тип дамбы (конструкция сооружения); второй — объекты мониторинга безопасности (элементы грунтовой дамбы: гребень и берма, верховой и низовой откосы, дренажные и противофильтрационные элементы, тело, подошва); третий — контролируемые показатели (количественные и качественные показатели состояния сооружения, непосредственно измеренные с помощью технических средств или вычисленные на основе измерений).

Предельные значения наиболее значимых для диагностики и оценки состояния гидротехнического сооружения и условий его эксплуатации количественных и качественных показателей, соответствующие допустимому уровню риска аварии гидротехнического сооружения, называют критериями безопасности.

Нормативными документами по безопасности ГТС предусмотрено введение двух уровней критериев безопасности диагностических показателей состояния сооружений [7]. Первый уровень критериев безопасности (К1) является предупреждающим, т. е. значения диагностических показателей состояния ГТС, определяемые при основном сочетании нагрузок, при достижении которых устойчивость, механическая и фильтрационная прочность гидротехнических сооружений и его основания, а также пропускная способность водосбросных и водопропускных сооружений еще соответствуют условиям их нормальной эксплуатации. Превышение первого уровня критериев безопасности диагностических показателей сигнализирует о наступлении потенциально опасного состояния и требует от собственника (эксплуатирующей организации) принятия соответствующих оперативных мер по приведению сооружения в нормальное состояние. Второй (предельный) уровень критериев безопасности (К2) — значения диагностических показателей состояния гидротехнических сооружений, при превышении (уменьшении) которых эксплуатация ГТС в проектном режиме недопустима, состояние сооружения может перейти в предаварийное.

Исходя из схемы структуризации системы мониторинга безопасности ГТС (см. рис. 1), выделим четвертый уровень иерархической схемы — виды натуральных наблюдений (способ контроля). Этот уровень построен одновременно целевым методом “сверху” и тезаурусным “снизу” на основе анализа риска гидродинамической аварии.

На пятом уровне иерархической схемы (см. рис. 1) для каждого вида натуральных наблюдений, исходя из надежности получаемой информации и рациональных затрат на его реализацию, определена методика маркшейдерского мониторинга, включающая: метод и точность наблюдений, средства измерений (контрольно-измерительную аппаратуру и приборы).

Учитывая, что главной целью мониторинга является обеспечение безопасности ГТС, построена идеальная знаковая модель системы мониторинга безопасности грунтовых дамб (рис. 2). Ее элементы определены методом экспертных оценок на основе анализа риска аварий с учетом конструктивных особенностей, условий их эксплуатации и оценки влияния деструктивных процессов, которые могут привести к гидродинамической аварии.

В качестве наиболее подходящего для решения поставленных задач на этапе идентификации опасностей выбран метод “Анализ опасности и работоспособности” (“Hazard and Operability Study” — “HAZOP”), который основан на предположении, подтверждаемом обширным опытом эксплуатации ГТС, и согласно которому развивающиеся или уже имеющиеся повреждения и неполадки проявляются в той или иной мере через отклонения значений показателей состояния сооружения от обычно наблюдаемого или предельно допустимого.

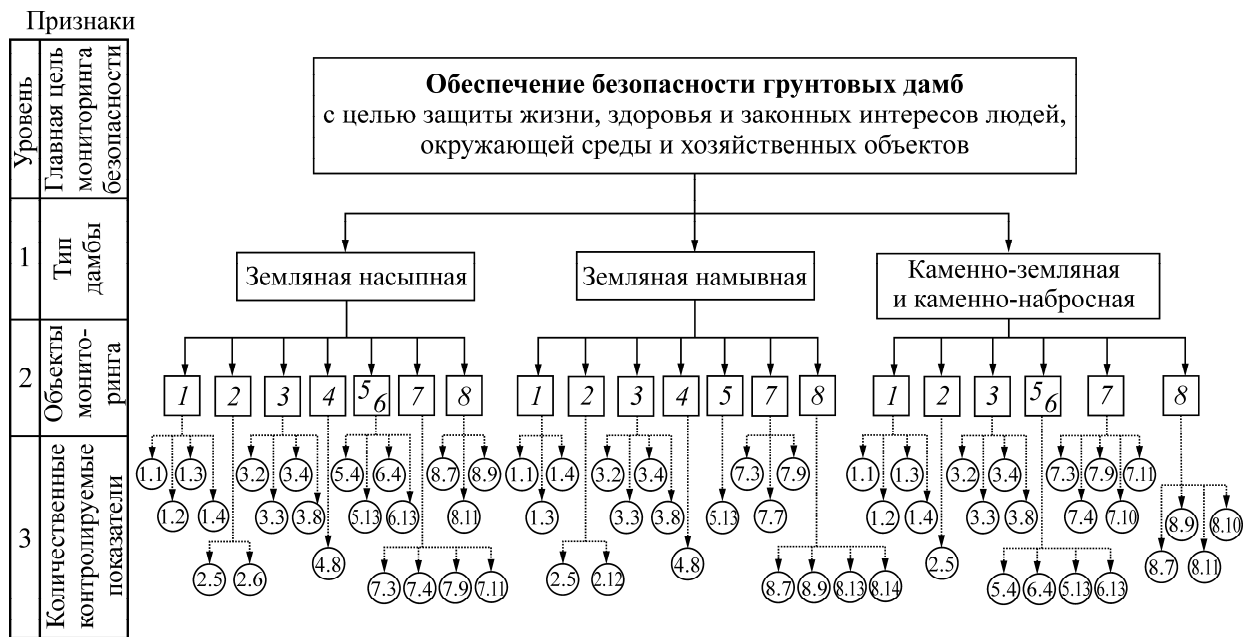


Рис. 2. Идеальная знаковая модель системы мониторинга безопасности грунтовых дамб. Объекты мониторинга: 1 — гребень (берма); 2 — верховой откос; 3 — низовой откос; 4 — дренажные устройства; 5, 6 — противодиффузионные устройства; 7 — тело; 8 — подошва. Контролируемые показатели (обозначены кодом из двух цифр: первая — номер объекта мониторинга, вторая — контролируемый показатель): 1 — высотная отметка; 2 — геометрические параметры (ширина, заложение и др.); 3 — вертикальные перемещения (осадки); 4 — горизонтальные смещения; 5 — гидродинамическое давление (уровень воды со стороны откоса); 6 — давление отложившихся наносов; 7 — положение (отметки) депрессионной поверхности фильтрационного потока; 8 — фильтрационный расход воды; 9 — пьезометрические напоры и их градиенты; 10 — напряжение грунта; 11 — параметры сейсмических колебаний; 12 — параметры намывного пляжа; 13 — характеристики материала (грунтов упорной призмы); 14 — поровое давление и интенсивность его рассеивания

Первый этап идентификации опасностей (рис. 3) для гидротехнических сооружений методом “HAZOP” начинается с исследования компоновки и структуры элементов анализируемого сооружения, воздействий и нагрузок на него, а также особенностей жизненного цикла сооружения, включая уже имевшиеся повреждения, аварии и неполадки, т. е. выделяются объекты мониторинга. На втором этапе изучается весь перечень контролируемых показателей состояния ГТС (“осадки”, “горизонтальные смещения” и др.) и анализируются возможные отклонения их от критериев безопасности с использованием ключевых (управляющих) слов “больше”, “меньше”, “иначе чем” и др. Содержание ключевых слов следующее: осадки гребня дамбы больше критерия безопасности. На третьем этапе выявляются возможные причины и следствия этих отклонений. На четвертом (завершающем) этапе идентификации опасностей определяется состав наблюдений, позволяющий своевременно фиксировать деформационные процессы и опасные отклонения контролируемых показателей состояния ГТС от предельно допустимых значений (критериев безопасности).

В результате идентификации опасностей риска аварий методом “HAZOP” для различных типов грунтовых дамб установлены виды натуральных наблюдений общие для всех сооружений и дифференцированные в увязке с их конструктивными элементами (например, для земляной насыпной — фильтрационный режим; для земляной намывной — пиковое давление; для каменно-земляной — наличие и ширина противофильтрационного элемента и т. д.), направленные на фиксирование отклонений наиболее значимых для данной конструкции дамбы контролируемых показателей относительно их критериев безопасности (табл. 1).

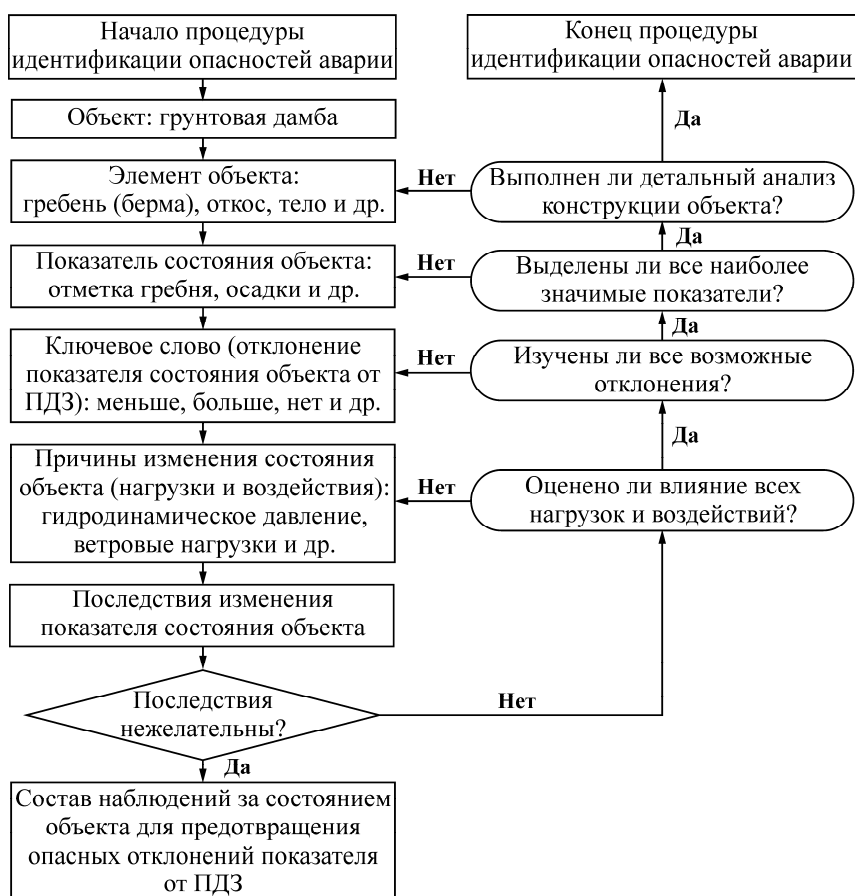


Рис. 3. Алгоритм процедуры идентификации опасностей методом “HAZOP” для определения элементов системы мониторинга безопасности грунтовой дамбы (ПДЗ — предельно допустимые значения)

ТАБЛИЦА 1. Определение состава наблюдений на грунтовых дамбах на основе анализа опасностей риска аварий (пример)

Элемент сооружения	Показатель состояния	Критерий по "HAZOP"	Нагрузки и воздействия	Последствия изменения показателя состояния ГТС	Состав наблюдений для предотвращения опасных отклонений показателя состояния ГТС от ПДЗ
Гребень	Осадки	Больше	Собственный вес сооружения	Потеря устойчивости (оползание низового откоса), перелив воды через гребень	Маркшейдерский контроль: отметки поверхностных марок на гребне. Визуальный контроль: наличие трещин и просадок
			Вес горнотранспортного оборудования		
			Силовое воздействие фильтрации	Нарушение фильтрационной прочности, образование прорана	
		Меньше	Опасности не представляет и далее не рассматривается		
	Горизонтальные смещения	Больше	Динамические нагрузки (землетрясение, взрывы)	Потеря устойчивости откоса и оползание участка дамбы с образованием прорана в теле и волны прорыва	Визуальный контроль: наличие трещин, заколов. Маркшейдерский контроль: отметки поверхностных марок на гребне
			Температурные воздействия	Потеря структурной устойчивости грунтов тела дамбы	
Меньше		Опасности не представляет и далее не рассматривается			
Тело дамбы	Положение поверхности депрессии	Больше	Силовое воздействие фильтрационного потока: старение грунтов; снижение пропускной способности дренажных устройств; превышение проектного уровня заполнения	Нарушение фильтрационной прочности и потеря устойчивости сооружения, оползание участка с образованием прорана, излив потока в нижний бьеф	Маркшейдерский контроль: отметки воды в пьезометрах. Геофизический контроль: уровень воды в теле дамбы
И т. д.

КРИТЕРИИ МОНИТОРИНГА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ДАМБ

Определение критериев мониторинга напряженно-деформированного состояния грунтовых дамб основано на оценке устойчивости сооружения, выражаемого коэффициентом запаса k_f . В общем виде напряженно-деформированное состояние грунтовых сооружений обусловлено влиянием на них нагрузок и воздействий природного и техногенного характера, что приводит к формированию в откосной части дамбы потенциальной поверхности скольжения. Расчетный коэффициент запаса устойчивости k_f представляет функцию истинных значений аргументов:

$$k_f = F(C, \varphi, \gamma, S, \delta, \alpha, l, H^B, h^B), \tag{1}$$

где C — сцепление грунта, МПа; φ — угол внутреннего трения, град; γ — плотность грунта, т/м³; δ — угол откоса дамбы, град; S и l — площадь и длина поверхности скольжения элементарного блока; α — угол наклона касательной к поверхности скольжения в середине блока, град; H^B — высота подтопления откоса (вертикальное расстояние от подошвы дамбы до уровня воды со стороны откоса), м; h^B — высота обводненной части в блоке (вертикальное расстояние от поверхности скольжения до уровня поверхности депрессии), м.

Алгоритм расчета коэффициента устойчивости грунтовой дамбы, являющегося интегральным критерием прочности дамбы — функционалом прочности [8], показан на рис. 4.

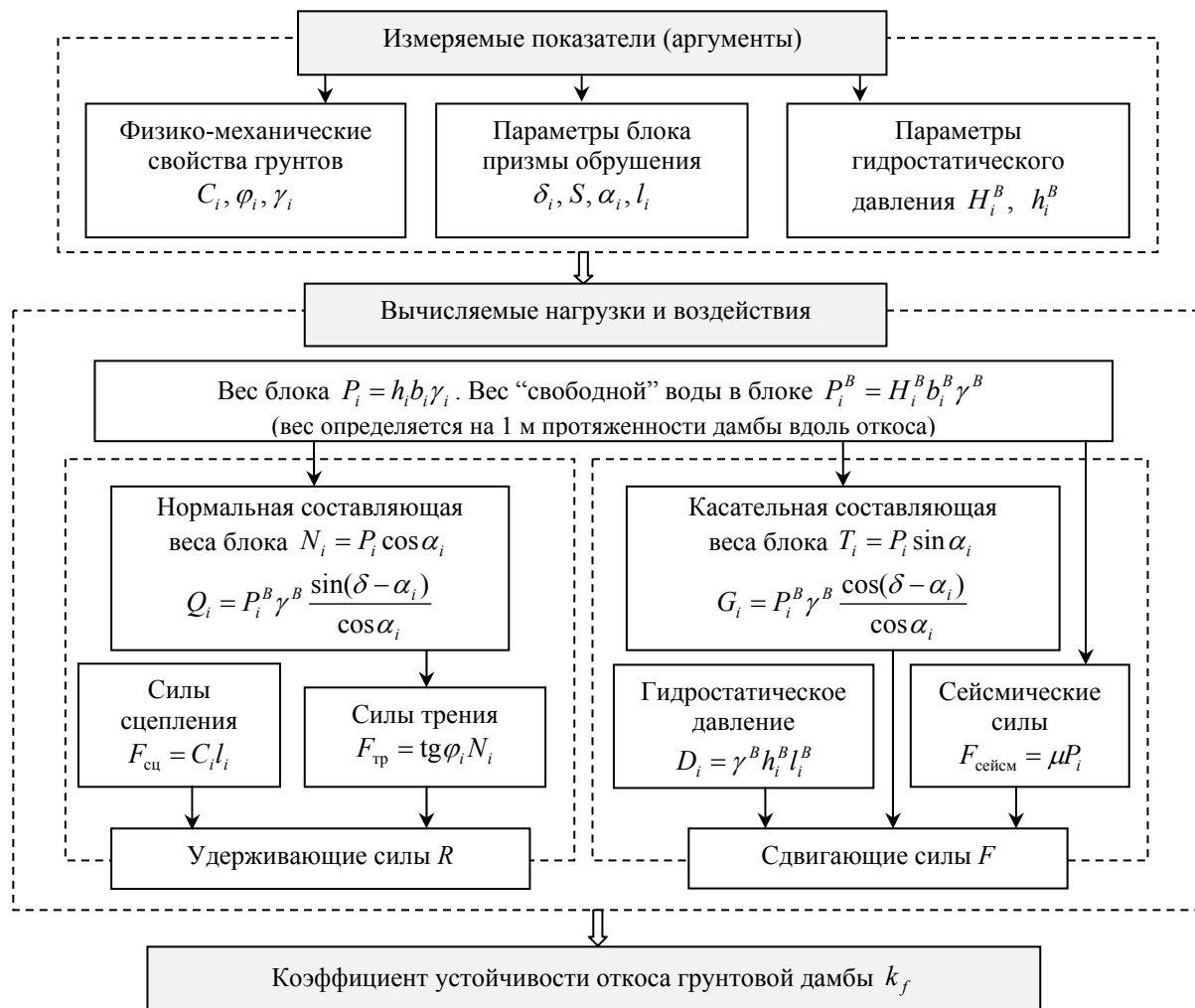


Рис. 4. Алгоритм расчета коэффициента устойчивости грунтовой дамбы

Минимальное изменение нормативного коэффициента устойчивости k_s , устанавливаемого по СП 126.13330.2012 [9], при повышении на один класс ответственности сооружения либо перехода этого сооружения в состояние предельного равновесия составляет 5%. В качестве основного критерия безопасности грунтовой дамбы принято предельное отклонение коэффициента устойчивости от нормативного значения $\Delta k = 0.05$.

Влияние погрешностей измеренных аргументов на погрешность функции k_f (1) установлено следующим образом. Число измерений j каждого аргумента в формуле (1) принято одинаковым. Составлен ряд частных значений функций; в них подставлены непосредственно из-

меренные значения аргументов; полученные функции разложены в ряд Тейлора. Ввиду малости погрешностей аргументов, ограничиваясь первыми частными производными по каждой переменной, получена следующая система уравнений [3]:

$$\begin{aligned} \Delta^1 &= \frac{\partial F}{\partial C} \Delta_C^1 + \frac{\partial F}{\partial \varphi} \Delta_\varphi^1 + \frac{\partial F}{\partial \gamma} \Delta_\gamma^1 + \frac{\partial F}{\partial \delta} \Delta_\delta^1 + \frac{\partial F}{\partial S} \Delta_S^1 + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta_\alpha^1 + \frac{\partial F}{\partial l} \Delta_l^1 + \frac{\partial F}{\partial H^B} \Delta_{H^B}^1 + \frac{\partial F}{\partial h^B} \Delta_{h^B}^1; \\ \Delta^j &= \frac{\partial F}{\partial C} \Delta_C^j + \frac{\partial F}{\partial \varphi} \Delta_\varphi^j + \frac{\partial F}{\partial \gamma} \Delta_\gamma^j + \frac{\partial F}{\partial \delta} \Delta_\delta^j + \frac{\partial F}{\partial S} \Delta_S^j + \frac{\partial F}{\partial \alpha} \Delta_\alpha^j + \frac{\partial F}{\partial l} \Delta_l^j + \frac{\partial F}{\partial H^B} \Delta_{H^B}^j + \frac{\partial F}{\partial h^B} \Delta_{h^B}^j. \end{aligned} \quad (2)$$

Из (2) следует, что погрешность функций $(\Delta^1, \dots, \Delta^j)$ для ряда измеренных аргументов определяется суммой произведений частных производных по этим аргументам на их случайную погрешность измерения. Изменения частных производных в пределах изменения аргументов существенно не повлияют на погрешность k_f (1), поэтому для практических расчетов в формулу (2) вместо истинных значений аргументов могут быть подставлены их измеренные значения.

Приняв в качестве случайной погрешности функции k_f (1) основной критерий безопасности грунтовой дамбы — предельное отклонение коэффициента устойчивости от нормативного значения $\Delta k = 0.05$, определили максимально допустимые отклонения (случайные погрешности) измеренных аргументов, при которых не будет допущен “переход” грунтовой дамбы в состояние предельного равновесия.

Влияние групп аргументов (физико-механические свойства грунтов — C, φ, γ , параметры призмы возможного обрушения — δ, S, α, l и характеристики гидростатического давления — H^B, h^B) на значение функции k_f (коэффициент устойчивости) проанализировано на примере идеальной модели грунтовой дамбы со следующими параметрами: высота — от 5 до 65 м; коэффициент заложения откоса — от 1 до 4; отметка зеркала воды — от 1/3 высоты подтопления откоса до максимального подпорного уровня (МПУ).

Физико-механические свойства грунтов, полученные в результате инженерно-геологических изысканий на 27 дамбах предприятий Кузбасса, обработаны известными методами математической статистики. В результате модельного эксперимента установлено [3], что наиболее значимым аргументом является сцепление грунтов, при уменьшении этого показателя относительно расчетного значения всего на 3.1 % ($\Delta C = -0.0014$ МПа) снижение коэффициента устойчивости достигает критерия безопасности $\Delta k = 0.05$. Однако в процессе эксплуатации происходит консолидация грунтов, увеличиваются их сцепление и угол внутреннего трения, что оказывает положительное влияние на устойчивость дамбы.

Следующую группу аргументов в функции k_f (1) — параметры призмы возможного обрушения (δ, S, α, l) — определяют через геометрические размеры дамбы и положение наиболее напряженной поверхности скольжения в откосе, погрешность которых обусловлена погрешностью маркшейдерской съемки, нанесением результатов этой съемки на план, а также погрешностями построения расчетного профиля и измерений на профиле. Моделированием грунтовой дамбы установили, что отклонение коэффициента устойчивости от нормативного значения не превысит 5 % ($\Delta k = 0.05$) при случайных погрешностях коэффициента заложения откоса $\Delta m = +0.14$ (или $\Delta \delta = +8^\circ$) и высоты дамбы $\Delta H = +2.9$ м, а также следующих соотношениях высоты и заложения откосов:

— для сооружений IV класса ($H \leq 10$ м) при минимальных значениях физико-механических свойств грунтов ($C = 0.013$ МПа; $\varphi = 15^\circ$; $\gamma = 1.71$ т/м³) и коэффициенте заложения откоса $m \geq 1$;

— для сооружений III ($10 < H \leq 20$ м), II ($20 < H \leq 50$ м) и I ($H > 50$ м) классов при средних значениях физико-механических свойств грунтов ($C = 0.045$ МПа; $\varphi = 22^\circ$; $\gamma = 1.97$ т/м³) и коэффициентах заложения откоса соответственно $m \geq 2$; $m \approx 2 - 3.5$ и $m \geq 4$.

Фактическая погрешность маркшейдерской съемки (в масштабе 1:2000) значительно меньше полученных отклонений (Δm , ΔH), поэтому можно считать, что погрешности геометрических параметров дамбы (Δ_δ , Δ_S , Δ_α , Δ_l) не окажут существенного влияния на значение коэффициента устойчивости.

Аргументы H^B и h^B в функции k_f (1) являются интегральными показателями, обуславливающими суммарное влияние гидростатического взвешивания и гидродинамического давления на призму возможного обрушения, которые проявляются как гидростатическое давление, распределенное по нормали к поверхности скольжения и уменьшающее нормальную составляющую, не оказывая существенного влияния на касательную. Воздействие гидростатического давления на каждый элемент грунтовой дамбы, расположенный в контуре фильтрационного потока ниже уровня кривой депрессии, зависит от подтопления откоса (уровня воды в накопителе) и пьезометрических напоров в теле и основании сооружения. Случайные погрешности определения высоты подтопления откоса Δ_{H_b} и положения кривой депрессии в теле дамбы Δ_{h_b} , при которых отклонение коэффициента устойчивости от нормативного значения не превысит 5% ($\Delta k = 0.05$), составляют 0.2–0.5 м (1–2% от высоты дамбы) и являются наиболее “чувствительными” аргументами, отрицательно влияющими на значение функции k_f (1).

Полученные выше критерии мониторинга напряженно-деформированного состояния грунтовой дамбы приняты для обоснования точности маркшейдерского контроля при мониторинге безопасности грунтовых дамб.

ОБОСНОВАНИЕ МЕТОДИКИ МАРКШЕЙДЕРСКОГО КОНТРОЛЯ СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВЫХ ДАМБ

Инструментальные маркшейдерские наблюдения за состоянием грунтовых дамб включают контроль: вертикальных и горизонтальных смещений, высотных отметок гребня, геометрических размеров сооружения, “нуля” водомерной рейки, планово-высотного положения контрольно-измерительной аппаратуры.

Как известно, *горизонтальные и вертикальные смещения* дамб определяют из двух циклов наблюдений путем измерения планово-высотного положения поверхностных марок традиционными геодезическими методами: створных наблюдений (способ малых углов), отдельных направлений, полигонометрического хода, геометрического или тригонометрического нивелирования, гидростатического нивелирования, а также спутниковым методом с использованием приборно-инструментальных комплексов ГЛОНАСС / GPS.

Критерии безопасности (К1) смещений грунтовых дамб установим исходя из среднеквадратических погрешностей (СКП) по ГОСТ 24846-2012 [10], соответственно в плане — $m_{\Delta S(\text{дон})}^{\text{ПМ}} = 42$ мм и по высоте — $m_{\Delta Z(\text{дон})}^{\text{ПМ}} = 28$ мм.

Приняв за основу указанные критерии безопасности (К1) смещений грунтовых дамб и регламентированные “Инструкцией ...” [11] требования к производству работ, разработали методику измерений пространственно-временного положения поверхностной марки в одной серии наблюдений. В частности, высотную отметку марки находили в зависимости от ее удаленности относительно опорного репера: до 0.3 км — тригонометрическим нивелированием оптическим

теодолитом; до 0.75 км — тригонометрическим нивелированием электронным тахеометром; до 1 и 3 км — геометрическим нивелированием соответственно IV и III классов. Плановые координаты поверхностной марки при ее удаленности от опорного пункта на расстояние до 0.8 км возможно определять точными оптическими приборами (СКП измерения: угла — $m_\beta = 5''$, длин — $m_l = 3 - 5$ мм/км) методами створных наблюдений, отдельных направлений, полигонометрического хода [12]. При большей удаленности поверхностной марки от опорного пункта следует выполнять предрасчет ожидаемой погрешности с учетом геометрии расположения опорных пунктов и поверхностных марок либо воспользоваться соответствующими графиками, пример которых приведен на рис. 5.

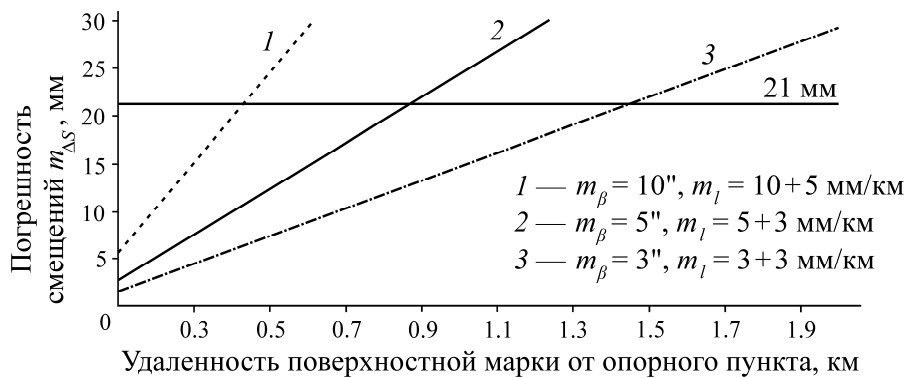


Рис. 5. Зависимость погрешности горизонтального смещения от удаленности поверхностной марки (способ малых углов, $\Delta\beta = 0 - 15^\circ$)

При контроле смещений методом спутникового определения координат максимальное удаление поверхностной марки от опорного пункта может составлять: при плановом смещении — около 10 км, высотном — 5 км. В этом случае для контроля планово-высотного положения поверхностных марок целесообразно использовать приборно-инструментальные комплексы ГЛОНАСС/GPS с точностью не менее $15 + 1$ м/км. В практике маркшейдерских работ периодичность наблюдений принято назначать исходя из скорости смещений поверхностных марок. В весенний период грунтовая дамба испытывает максимальное влияние внешних нагрузок, поэтому целесообразно маркшейдерский (геодезический) контроль выполнять не реже одного раза в год, после весеннего паводка, и по скорости смещений марок устанавливать сроки проведения последующих серий наблюдений.

Высотные отметки гребня грунтовых дамб на всем их протяжении назначают на основе расчета возвышения гребня над уровнем воды, исходя из величины ветрового нагона воды в верхнем бьефе Δh_{set} , высоты наката на откос ветровых волн 1 %-й обеспеченностью $h_{run1\%}$, с учетом минимального запаса возвышения гребня дамбы над уровнем воды в емкости a , а также строительных осадок тела и основания дамбы [6]. Опыт натурных обследований гидротехнических сооружений показывает, что влияние различного рода нагрузок и воздействий (гидродинамическое давление, силовое воздействие фильтрационной воды, ветровые и снеговые нагрузки, вес технологического оборудования и др.) на грунтовую дамбу приводит к изменению ее размеров и форм в течение всего периода эксплуатации [7]. Приняв в качестве критерия безопасности предельную величину осадки $K1 = 200$ мм, установили допустимую ($m_{Z(доп)}^{пр} = 141$ мм) и среднеквадратическую ($m_Z^{пр} = 70$ мм при $P = 0.95$) погрешности определения высотной отметки греб-

ня дамбы из одной серии измерений, исходя из которых, а также требований к точности нивелирования [11] обосновали оптимальный метод контроля. Так, для дамб протяженностью до 1.5 км контроль высотных отметок гребня может обеспечиваться любым методом (геометрическое нивелирование IV класса, техническое нивелирование, тригонометрическое нивелирование как электронным тахеометром, так и оптическим теодолитом). При протяженности гребня дамбы более 1.5 км для контроля высотной отметки необходимо проводить геометрическое нивелирование либо тригонометрическое нивелирование электронным тахеометром.

Уровень воды в емкости накопителя и теле грунтовой дамбы является интегрированным показателем безопасности грунтовой дамбы и устанавливается путем замера по водомерной рейке и вычисления через отметку устья пьезометра и глубину воды в нем, замеряемую лот-свистком или хлопущкой. С целью недопущения предельного состояния сооружения в качестве критерия безопасности принято минимальное значение случайной погрешности определения уровня воды в накопителе Δ_{H_B} и теле дамбы Δ_{h_B} , при которых отклонение коэффициента устойчивости от нормативного значения не превысит 5%, — $m_{Z(\text{доп})}^B = 200$ мм. С учетом принятого критерия безопасности ($K_1 = 200$ мм) и исходя из СКП $m_Z^B = 100$ мм (при $P = 0.95$) проверку “нуля” водомерной рейки в емкости накопителя и устьев пьезометров на дамбе, удаленных относительно опорного репера на расстояние менее 2.2 км, допускается осуществлять тригонометрическим нивелированием с использованием оптического теодолита технической точности. При большем удалении объекта контроля от опорного репера предпочтение следует отдавать электронному тахеометру или техническому нивелированию.

Обоснование требований к *планово-высотной съемке грунтовой дамбы* выполнено с учетом оценки влияния погрешности определения геометрических параметров дамбы на коэффициент устойчивости откосов, который характеризует напряженно-деформированное состояние грунтового сооружения. Исследования [3] показали, что СКП планового положения контура дамбы не должна превышать 1.1 м, высотной отметки — 1 м.

Обобщенные требования к выбору методики маркшейдерского (геодезического) контроля при мониторинге безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий сведены в табл. 2.

ВЫВОДЫ

Идеальная знаковая модель системы мониторинга безопасности грунтовых дамб, структурированная методом системного анализа, описывается следующими признаками: тип дамбы, объекты мониторинга (конструктивные элементы дамбы) и идентификация опасностей при анализе риска аварий методом “HAZOP” различных типов грунтовых дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий, которая обеспечивается диагностированием наиболее уязвимых зон (гребень, низовой и верховой откосы, дренажные и противодиффузионные сооружения, подошва). Модель позволяет дифференцировать состав натуральных наблюдений в зависимости от конструктивных особенностей сооружения (например, для земляной насыпной — фильтрационный режим; для земляной намывной — избыточное поровое давление; для каменно-земляной — наличие и ширина противодиффузионного элемента).

Практический мониторинг и теоретические расчеты показали, что устойчивость грунтовой дамбы обеспечивается с коэффициентом устойчивости выше нормативного для дамб высотой до 10 м и коэффициенте заложения откоса $m \geq 1$ при минимальных, а для дамб большей высоты и коэффициенте заложения откоса m от 2 до 4 при средних значениях физико-механических свойств техногенных глинистых грунтов.

ТАБЛИЦА 2. Рекомендации к выбору метода геодезического контроля грунтовых дамб

Контролируемый показатель	K1	СКП	Условия обеспечения требуемой точности							
			Метод контроля	Характеристика условий измерений						
				максимальная удаленность ПМ от ОП, км	технические характеристики средств контроля					
Вертикальные смещения ПМ	28 мм	14 мм	Тригонометрическое нивелирование: оптическим теодолитом	0.30	m_δ , с	m_l , мм				
			электронным тахеометром		10	8				
			Геометрическое нивелирование: IV класса	1.0	ν , крат	m_h , мм				
			III класса		20–22	6				
			Спутниковое определение	база – ровер	m_z , мм					
5 км	15 + 1 мм/км									
Горизонтальные смещения ПМ	42 мм	21 мм	Створные наблюдения (способ малых углов)	1.4	m_β , с	m_l , мм				
					3	3 + 3 мм/км				
					0.8	5	5 + 3 мм/км			
			Полигонометрический ход	0.4	10	10 + 5 мм/км				
					2.0	3	3 + 3 мм/км			
					0.8	5	5 + 3 мм/км			
			Отдельные направления (прямая линейно-угловая засечка)	0.2	10	10 + 5 мм/км	β , град	c , км	m_β , с	m_l , мм
							≤ 10	2.0	3	3 + 3 мм/км
							50	1.3		
							≤ 10	1.2	5	5 + 3 мм/км
							50	0.8		
			≤ 10	0.6	10	10 + 5 мм/км				
50	0.4									
Спутниковые определения	база – ровер	$m_{x,y}$, мм								
10 км	20 + 1 мм/км									
Высотная отметка гребня дамбы	140 мм	70 мм	Тригонометрическое нивелирование: оптическим теодолитом	1.5	m_δ	m_l				
			электронным тахеометром		10	35				
			Техническое нивелирование	3.5	ν	m_h				
					5	20	20			
Отметки “нуля” ВР и УП	200 мм	100 мм	Тригонометрическое нивелирование	2.2	m_δ	m_l				
			8		35					
			Техническое нивелирование	5	ν	m_h				
20	20									
Контур дамбы: в плане по высоте	3.2 м 2.9 м	1.1 м 1.0 м	Маркшейдерская съемка	Масштаб съемки 1:2000						

Примечание. ПМ — поверхностная марка; K1 — критерий безопасности первого уровня; СКП — среднеквадратическая погрешность измерения; ОП — опорный пункт; ВР — водомерная рейка; УП — устье пьезометра; c — значение базиса (сторона между опорными пунктами), км; β — горизонтальный угол при базисе, град; δ — вертикальный угол, град; ν — увеличение зрительной трубы, крат.; m_δ — СКП измерения вертикального угла, с; m_β — СКП измерения горизонтального угла, с; m_l — СКП измерения длины линии, мм; m_h — СКП измерения превышения на 1 км хода, мм; m_z , $m_{x,y}$ — среднеквадратические погрешности соответственно высотных отметок и плановых координат при определении местоположения пункта с использованием GPS-аппаратуры, мм

Погрешность коэффициента устойчивости грунтовых дамб на этапе эксплуатации накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий в большей степени зависит от показателей гидростатического давления (H^B, h^B), отклонение которых на 1–2% от нормативного значения может привести к деформациям дамбы.

Методика маркшейдерского контроля при мониторинге безопасности грунтовых дамб обеспечивается геодезическими методами, точность которых определяется критериями, установленными из условия недопущения нарушения состояния предельного равновесия дамбы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ограждающие дамбы** хвостохранилищ, риск опасных происшествий и уроки, полученные на практике / Бюллетень Международной комиссии по большим плотинам (СИГБ) № 121–2001 — Риск чрезвычайных происшествий на плотинах хвостохранилищ. Практические уроки.
2. **Михайлова Т. В., Бахаева С. П.** Формирование иерархической схемы мониторинга безопасности гидротехнических сооружений накопителей жидких промышленных отходов // Безопасность труда в пром-ти. — 2010. — № 5. — С. 43–46.
3. **Михайлова Т. В.** Обоснование точности маркшейдерского мониторинга грунтовых дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий: дис. ... канд. техн. наук. — Кемерово: Кузбасский технический университет, 2013. — 184 с.
4. **Опарин В. Н., Потапов В. П., Гиниятулина О. Г., Андреева Н. В.** Мониторинг загрязнения водного бассейна районов активной угледобычи с использованием данных дистанционного зондирования // ФТПРПИ. — 2012. — № 5. — С. 181–188.
5. **Грибов П. Б., Карлсон А. А.** О некоторых технологиях геодезического мониторинга // Гидротехническое строительство. — 2014. — № 6. — С. 45–48.
6. **Методическое** руководство по разработке системы мониторинга безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий / Новационная фирма “КУЗБАСС-НИИОГР”; КузГТУ. — Кемерово, 2013. — 57 с.
7. **СП 39.13330.2012.** Плотины из грунтовых материалов (актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84).
8. **Захаров В. Н., Малинникова О. Н., Трофимов В. А., Филиппов Ю. А.** Оценка устойчивости оползневого склона и развития его деформаций во времени // ФТПРПИ. — 2014. — № 6. — С. 11–22.
9. **СП 126.13330.2012.** Геодезические работы в строительстве (актуализированная редакция СНиП 3.01.03-84). Утв. Приказом Минрегион России № 635/18 от 29.12.2011, введен в действие с 01.01.2013. — 85 с.
10. **ГОСТ 24846-2012.** Грунты. Методы измерения деформаций оснований зданий и сооружений. Дата введения 01.07.2013. — 17 с.
11. **Инструкция** по производству маркшейдерских работ: РД 07-603-03 (утв. Постановлением Госгортехнадзора России от 06.06.2003 № 73).
12. **Методическое** руководство по геодезическому (маркшейдерскому) контролю при мониторинге безопасности грунтовых дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий / КузГТУ; Новационная фирма “КУЗБАСС-НИИОГР”. — Кемерово, 2014. — 46 с.

Поступила в редакцию 29/IX 2016