

УДК 622.267:550.372

Е.В. Костюков, С.М. Простов, С.П. Бахаева

ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ ОГРАЖДАЮЩИХ ДАМБ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ ГЕОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ ИХ СОСТОЯНИЯ

Нарушение устойчивости гидротехнических сооружений приводит не только к нарушению технологических процессов промышленных предприятий, но и к экономическому, социальному и экологическому ущербу, а в ряде случаев – к человеческим жертвам.*

Так в 1993 г. дождевым паводком разрушена дамба Киселевского водохранилища, расположенного на реке Каква выше г. Серова Свердловской области. Снесено более 1 тыс. жилых деревянных домов, железнодорожный и автомобильный мосты.

Разрушение дамбы произошло в результате перелива воды через гребень из-за переполнения водохранилища при паводке выше расчетного.

В 1994 г. дождевым паводком разрушена плотина Тирляндского водохранилища Белорецкого комбината Башкоростана. Потоком воды разрушены жилые дома и производственные здания, автомобильный и железнодорожные мосты [1].

В Кузбассе предприятиями горной, металлургической и химической промышленности эксплуатируется более 130 дамб водохранилищ, отстойников, накопителей.

Основным критерием безопасной эксплуатации гидросооружений является коэффициент запаса устойчивости ограждающих дамб (плотин).

Среди известных методов расчета устойчивости откосов наиболее часто в практике гидро строительства используют метод алгебраического сложе-

ния моментов сил по плавной криволинейной поверхности при следующих допущениях: состояние предельного равновесия фиксируется только в точках на поверхности скольжения, а призма возможного обрушения рассматривается как одно монолитное тело.

Положение наиболее опасной поверхности скольжения устанавливают подбором при проведении многократных поверочных расчетов. Состояние предельного равновесия определяется только по одному условию статики – равенству моментов удерживающих и сдвигающих сил относительно центра вращения смещающегося тела [2].

Этот метод, как правило, предполагает разделение призмы возможного обрушения на отсеки (блоки), ширину которых обычно принимают равной $0,1R$ (R – радиус кривой скольжения).

Определение моментов сдвигающих и удерживающих сил производят отдельно по каждому блоку.

Расчетное значение коэффициента запаса устойчивости дамбы определяется формулой:

$$k_f = \frac{\sum_{i=1}^n \{P_i \cos \alpha_i - \Phi_i\} g \varphi_i + C_i \ell_i}{\sum_{i=1}^n P_i \sin \alpha_i}$$

где P_i – вес пород блока, Н; φ_i – угол внутреннего трения грунтов, град; C_i – сцепление пород тела дамбы, МПа; ℓ_i – длина поверхности скольжения в пределах блока, м; Φ_i – равнодействующая сил гидроста-

тического и гидродинамического давлений, Н; α_i – угол наклона площадки, являющейся основанием отдельного блока, град; i – порядковый номер блока; n – число блоков в призме обрушения.

Особое влияние на устойчивое состояние откосов оказывают фильтрационные силы, действующие на поверхность расчетных блоков призмы обрушения. Равнодействующая сил гидростатического взвешивания и гидродинамического давления воды пропорциональна величине напора поровой жидкости, действующего на призму возможного обрушения.

Гидравлические напоры устанавливают на основании аналитических фильтрационных расчетов или данных натурных наблюдений.

Аналитические методы расчета фильтрации через насыпные грунтовые плотины разработаны различными авторами на основе гидродинамических моделей и классических методов исследования. Выделяют более 20 различных схем расчета фильтрации в зависимости от инженерно-геологических условий основания и тела плотины (дамбы), а также с учетом их конструктивных особенностей [3]. Такое широкое многообразие расчетных схем дает возможность прогноза фильтрационных параметров практически всех существующих в Кузбассе типов гидротехнических сооружений.

Наиболее распространенным экспериментальным методом контроля гидродинамических процессов в теле сооружения является установка наблюдательных скважин-пьезометров и определение установив-

* Работа выполнена при поддержке гранта Минобразования России А 03-2.13-12

шегося уровня воды в них.

По результатам пьезометрических измерений устанавливают форму депрессионной кривой в теле ограждающего сооружения.

Определение уровня воды с помощью пьезометров позволяет судить о степени насыщения грунтов тела дамбы водой только в отдельных точках. Кроме

того, практика показывает, что погрешность измерений уровня грунтовых вод весьма высока из-за заиливания фильтрующей части пьезометра и попадания внутрь перфорированной трубы инородных тел.

Повышение информативности прогноза гидродинамических процессов в техногенных массивах гидротехнических

сооружений обеспечивается применением в комплексе с пьезометрическими измерениями геофизических, в частности, геоэлектрических методов, основанных на взаимосвязи удельного электросопротивления грунтов с их пористостью и влагонасыщенностью. ГУ КузГТУ совместно с НФ "КУЗБАСС-НИИОГР" разработана

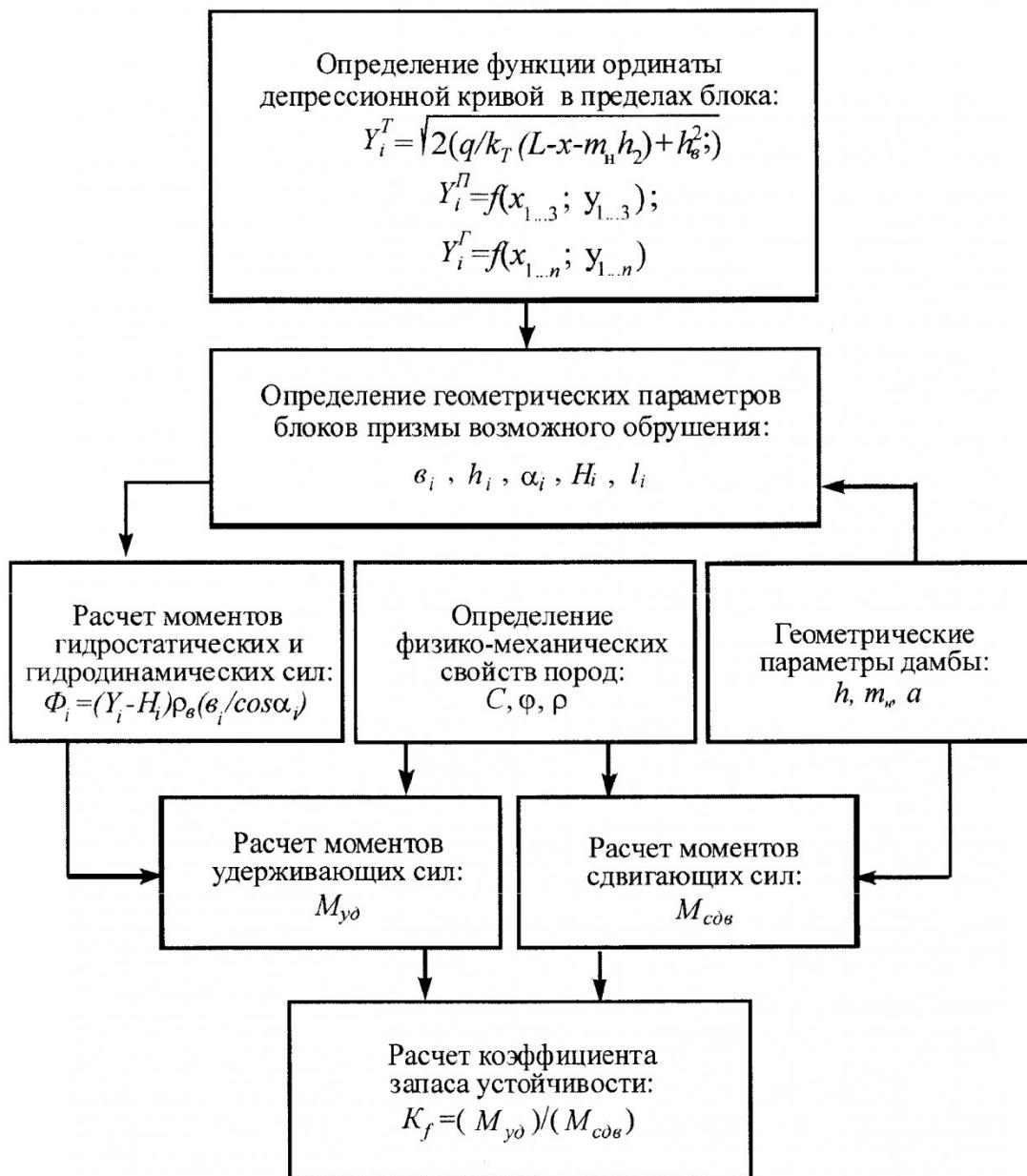


Рис. 1. Блок-схема к расчету коэффициента запаса устойчивости откосов гидротехнических сооружений: $Y_i^T, Y_i^{II}, Y_i^{III}$ – ордината депрессионной кривой, определенная соответственно теоретическим, пьезометрическим и геоэлектрическим методами; q – удельный расход воды через тело дамбы; k_T – коэффициент фильтрации грунтов тела дамбы; L – расстояние от уреза воды до подошвы низового откоса; x – расстояние от i -того сечения до подошвы откоса дамбы; m_H – заложение низового откоса; h_e – высота выхода воды на низовой откос; b_i, h_i – соответственно, ширина и высота расчетного блока; α_i – угол наклона основания блока; H_i – величина гидравлического напора; l_i – длина поверхности скольжения в пределах расчетного блока; ρ – плотность грунта; ρ_g – плотность воды; h – высота дамбы; a – угол откоса дамбы

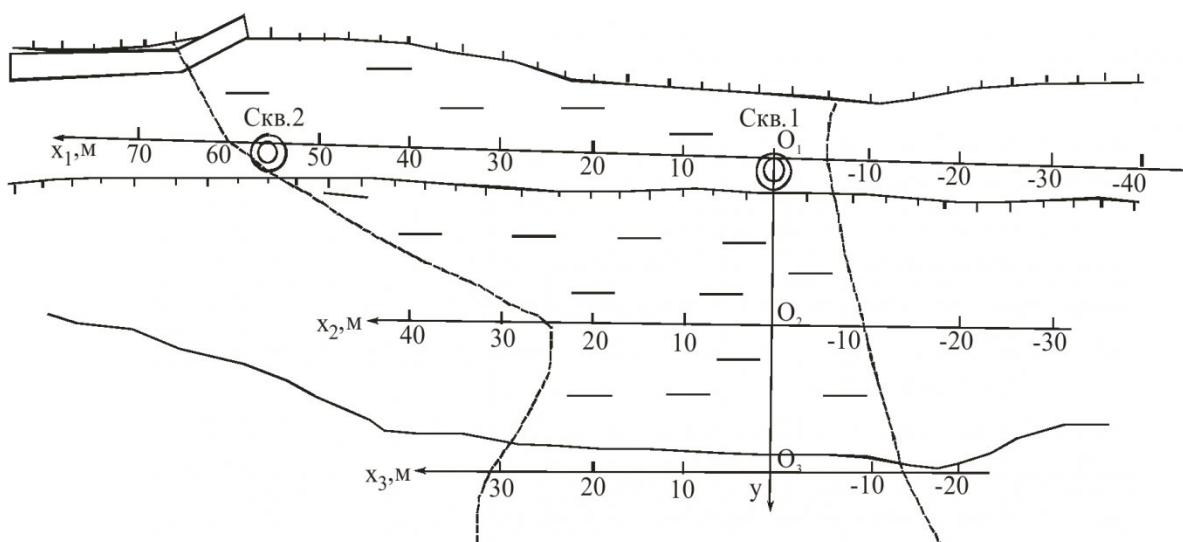


Рис. 2. Границы обводненной зоны в теле ограждающей дамбы обогатительной фабрики ЗАО "Черниговец": O_1x_1 , O_2x_2 , O_3x_3 – профили ЭП; скв.1, скв.2 – наблюдательные скважины (пьезометры)

методика контроля физического состояния грунтового массива, включающая бесскважинные измерения с поверхности дамбы [4].

Основные этапы геоэлектрических исследований дамб заключаются в следующем. На участках бурения геологических скважин или установки пьезометров производят вертикальное электрическое зондирование (ВЭЗ), по результатам которого определяют расположение верхней границы обводненной зоны и глубину зондирования. Затем намечают профили по гребню и откосам дамбы, производят электропрофилирование (ЭП) с требуемым шагом и разносом, соответствующим расположению выявленной границы. По результатам ВЭЗ и ЭП

устанавливают контуры обводненных зон в теле дамбы, степень обводненности грунтов и форму депрессионной поверхности в вертикальных сечениях дамбы.

Геоэлектрический контроль обеспечивает значительное повышение детальности и точности прогноза физического состояния грунтовых массивов дамб, позволяет получить объемную картину степени насыщения грунтов водой, что в свою очередь повышает надежность расчета устойчивости ограждающих дамб гидротехнических сооружений.

Комплексный подход к оценке состояния дамб гидротехнических сооружений на основе экспериментальных исследований реализован в виде

блок-схемы расчета коэффициента запаса устойчивости (рис. 1), которая имеет следующие основные элементы:

- определение функции ординаты Y_i депрессионной кривой в пределах расчетного блока теоретическим, пьезометрическим и геофизическим методами;

- установление геометрических параметров блоков призмы возможного обрушения b_i , h_i , α_i , H_i , l_i ;

- расчет равнодействующей гидростатических и гидродинамических сил Φ_i ;

- расчет коэффициента запаса устойчивости k_f по соотношению моментов удерживающих и сдвигающих сил.

Данная методика реализо-

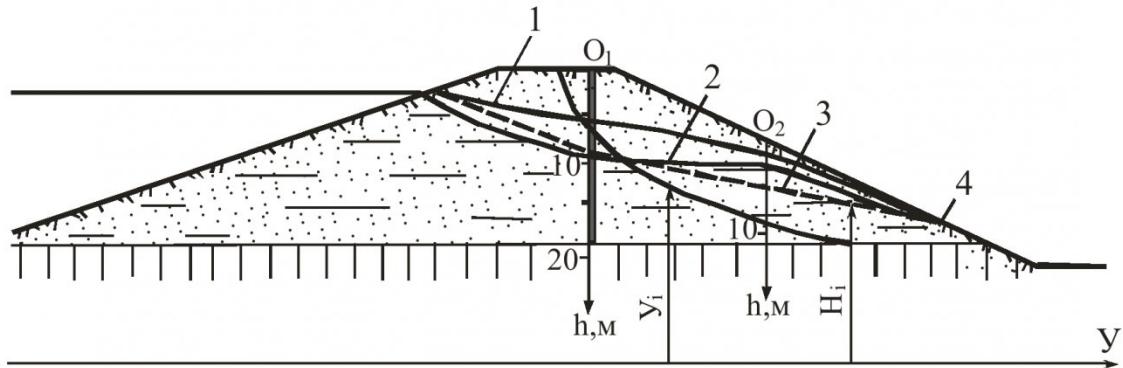


Рис. 3. Схема к расчету устойчивости дамбы илонакопителя ОФ ЗАО "Черниговец":

1 – теоретическое положение депрессионной кривой; 2 – то же по данным геофизических измерений; 3 – то же по данным пьезометрических наблюдений; 4 – выход дренажных вод на низовой откос; O_1 – замерная станция ВЭЗ №1 (пьезометр); O_2 – замерная станция ВЭЗ №2

вана в виде компьютерных программ и используется при прогнозе устойчивости дамб на угольных предприятиях Кузбасса.

В качестве объектов комплексных экспериментальных исследований ниже рассмотрены ограждающие дамбы трех накопителей жидких промышленных отходов предприятий Кузбасса: разделительная перемычка на пляжной зоне гидроотвала №3 ОАО "Разрез Кедровский"; дамба шламовых отстойников "Дальние" обогатительной фабрики ОАО "Шахта им. С.М. Кирова"; дамба илонакопителя обогатительной фабрики ЗАО "Черниговец".

Разделительная перемычка на пляжной зоне гидроотвала №3 ОАО "Разрез Кедровский" отсыпана скальными вскрышными породами поверх суглинистых водонасыщенных намывных отложений гидроотвала №3. Протяженность перемычки 600 м. Высота относительно намывного грунта 6÷14 м, ширина основания 100÷130 м, ширина по гребню 70÷100 м.

Откосы отсыпаны под углом естественного откоса (28÷30°).

В соответствии с программой инженерно-геологических изысканий в теле ограждающей перемычки было пробурено две скважины. Выявлено наличие водоносного горизонта, в теле ограждающей перемычки на глубине 7,2 м в районе скважины №1. Из скважины №2 наблюдался самоизлив воды через кромку обсадной трубы с напором более 0,3 м. Наличие напора обусловлено возникновением положительного порового давления в намывных грунтах в результате дополнительного внешнего давления от ограждающей перемычки и расположенного рядом отвала вскрытых пород. Результаты комплексных геоэлектрических исследований на данном объекте приведены в [5]. Наблюдения в течение 1,5 лет позволили проследить динамику развития фильтрационных зон в насыпном массиве тела дамбы, установить параметры поверхностей депрессии в двух наиболее опасных сечениях.

Первичная дамба шламовых отстойников "Дальние" ОФ ОАО "Шахта им. С.М. Кирова" отсыпана суглинистыми грунтами, однородная, талая, без противофильтрационных устройств в теле и основании. В последующем поверх суглинистых грунтов выполнено наращивание тела дамбы породами обогатительной фабрики. Дамба характеризуется следующими основными параметрами: заложение верхового и низового откосов 1:3; ширина по гребню 5 м; высота от 8,5 м до 9,5 м. Контроль развития фильтрационных коллекторов в дамбе шламового отстойника ОФ ОАО "Шахта им. С.М. Кирова" осуществлялся путем периодических наблюдений визуальных признаков водопроявлений. Результаты геоэлектрического прогноза расположения и размеров обводненных зон приведены в [6].

Ограждающая дамба илонакопителя ОФ ЗАО "Черниговец" насыпная, тало-мерзлая, сложена из насыпных грунтов, представленных суглинком тяже-

Таблица

Результаты расчета коэффициентов запаса устойчивости ограждающих дамб

Физико-механические характеристики	Дамба илонакопителя ЗАО "Черниговец"	Дамба шламового отстойника ОАО "Шахта им. С.М. Кирова"	Перемычка гидроотвала ОАО "Разрез Кедровский"
Исходные данные			
Сцепление C , МПа	0,0471	0,017	0,007
Угол внутр. трения ϕ , град	23	27	28
Плотность ρ , г/см ³	2,0	1,5	2,3
Момент гидродинамических сил $M(\Phi)$			
Аналитический метод	214,9	14,7	71,8
Пьезометрический метод	121,6	23,4	48,1
Геоэлектрический метод	171,8	25,8	42,1
Момент удерживающих сил $M_{y\sigma}$			
Аналитический метод	381,5	28,9	170,0
Пьезометрический метод	421,1	24,6	181,8
Геоэлектрический метод	399,8	23,3	184,8
Момент сдвигающих сил $M_{cd\sigma}$			
Аналитический, пьезометрический и геоэлектрический методы	207,9	15,9	163,9
Коэффициент запаса устойчивости K_f			
Аналитический метод	1,84	1,82	1,04
Пьезометрический метод	2,03	1,52	1,11
Геоэлектрический метод	1,92	1,46	1,13

лым, редко легким, бурого и темнобурого с красноватым оттенком цвета, полутвердой и твердой консистенции. Максимальная высота дамбы 21 м, ширина до 10 м, заложения откосов 1:2.

На рассматриваемой дамбе илонакопителя по гребню были установлены пьезометрические наблюдательные станции в двух створах. Пьезометр №1 установлен в створе максимальной высоты дамбы – по тальвегу лога. Следует отметить, что на этом же участке наблюдались выходы воды на низовой откос дамбы. Пьезометр №2 был установлен в 55 м от створа №1 в сечении на склоне лога.

На рис. 2 представлено расположение наблюдательных станций, а также границ обводненной зоны на плане дамбы ЗАО "Черниговец", установленные по результатам геоэлектри-

ческих исследований.

Комплексные исследования гидрогеологических условий использовались для построения депрессионных кривых в теле дамбы в наиболее опасном сечении О₁У различными методами: теоретическим, геоэлектрическим и пьезометрическим (по замерам уровня воды в пьезометрах) (рис. 3).

В табл. приведены результаты расчетов коэффициента запаса устойчивости низовых откосов трех гидротехнических сооружений на основе данных аналитического, пьезометрического и геоэлектрического метода прогноза их состояния.

Диапазон изменения значений коэффициента запаса устойчивости k_f , составляет 4% (ОАО "Шахта им. С.М. Кирова"), 12% (ОАО "Разрез Кедровский") и 10% (ЗАО "Черниговец"), что указывает на высокую

степень сходимости результатов определения обводненной части дамбы геоэлектрическим и пьезометрическим методами. При оценке устойчивости дамб гидротехнических сооружений могут быть уменьшены затраты на бурение скважин и установку пьезометров за счет использования наряду с точечными замерами уровня воды по пьезометрам геофизических исследований по всему объекту.

Использование геоэлектрических методов контроля в комплексе с традиционными методами позволяет повысить надежность прогноза устойчивости дамб, а также своевременно разработать рекомендации по укреплению (усилению) низового откоса (создание выполняющих полочек, контрфорсов, возвведение инъекционных бурованых свай).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Аксенов С.Г. Аварии на ограждающих сооружениях, основные причины и меры по их предотвращению.– Белгород: НИиПЭЦ "Промгидротехника", 2003.– 328 с.
2. Чугаев Р.Р. Земляные гидротехнические сооружения. – Л.: Энергия, 1967. – 460 с.
3. Гидротехнические сооружения. Справочник проектировщика. – М.: Стройиздат, 1983. – 118 с.
4. Методические указания по контролю геомеханических и фильтрационных процессов в техногенных породо-грунтовых массивах гидротехнических сооружений горных предприятий комплексным геоэлектрическим методом. – Кемерово: ГУ КузГТУ, 2003. – 42 с.
5. Бахаева С.П. Комплексная оценка геомеханических процессов в дамбах из грунтовых материалов / С.П. Бахаева, С.М. Простов, Е.В. Костюков, Е.А. Серегин // Маркшейдерский вестник. – 2003. – №2. – С. 62-66.
6. Исследование параметров обводненных зон в протяженной дамбе шламового отстойника "Дальний" ОАО "Шахта им. С.М. Кирова" / Костюков Е.В., Простов С.М., Бахаева С.П., Гуцал М.В. // Вестн.КузГТУ, 2004.№ 2. С.24-29.

□ Авторы статьи:

Костюков
Евгений Владимирович
– аспирант каф. теоретической и
геотехнической механики

Простов
Сергей Михайлович
– доктор техн. наук, проф. каф. теоретической и геотехнической механики

Бахаева
Светлана Петровна
– канд. техн. наук, зам. директора
НФ "КУЗБАСС-НИИОГР"

УДК 550.372: 622.267

Е.В. Костюков, С.М. Простов, С.П. Бахаева, М.В.Гуцал

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОБВОДНЕННЫХ ЗОН В ПРОТЯЖЕННОЙ ДАМБЕ ШЛАМОВОГО ОТСТОЙНИКА "ДАЛЬНИЙ" ОАО "ШАХТА им. С.М. КИРОВА"

В результате аналитических и экспериментальных исследований КузГТУ совместно с НФ "КУЗБАСС-НИИОГР" разработана методика выявления и контроля развития локальных обвод-

ненных неустойчивых зон в техногенных породных массивах, в том числе, в ограждающих дамбах гидротехнических сооружений горнодобывающих предприятий бесскважинным геоэлектри-