

УДК 624.131.43

**ПРОГНОЗ УСТОЙЧИВОСТИ НАСЫПНЫХ ДАМБ
С УЧЕТОМ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ
ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ СУГЛИНИСТЫХ ГРУНТОВ**

С. П. Бахаева¹, Д. В. Гурьев²

*Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева,
E-mail: ¹baxaevas@mail.ru, ²gurevdv@gmail.com, ул. Весенняя, 28, 650000, г. Кемерово, Россия*

На основе анализа, обобщения и статистической обработки экспериментальных данных определены нормативные значения физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов, применяемых при строительстве дамб накопителей жидких отходов промышленных предприятий. Установлена тесная параболическая зависимость сцепления и угла внутреннего трения от естественной влажности грунтов. Представлен метод оперативного прогнозирования параметров грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта.

Физико-механические характеристики, техногенные суглинистые грунты, устойчивость грунтовых дамб

DOI: 10.15372/FTPRPI20200103

Постоянное увеличение темпов извлечения из недр полезных ископаемых ведет к интенсивному образованию и накоплению жидких отходов горнопромышленных предприятий. Хранение этих отходов предусмотрено в накопителях, ограждаемых грунтовыми дамбами, для которых существует риск разрушения и загрязнения природной среды (поверхностных и подземных вод, почв) токсичными веществами, повреждения волной прорыва зданий и сооружений, расположенных в нижнем бьефе накопителей, опасности нанесения вреда животному миру.

Надежность грунтовых дамб количественно оценивается коэффициентом устойчивости, зависящим от физико-механических характеристик грунтов тела и основания, изменчивость которых даже в пределах одного сооружения может превышать 50 %, что предопределяет необходимость изучения вариативности свойств грунтов [1–4].

На этапе проектирования гидротехнических сооружений физико-механические характеристики грунтов выбирают по приложениям СП 11-105-97 или по результатам инженерно-геологических изысканий, включающих проходку горных выработок, полевые и лабораторные исследования грунтов, находящихся в условиях естественного залегания. Недостатком такого подхода является то, что характеристики грунтов, приведенные в Своде правил, являются усредненными для всей территории бывшего Советского Союза [5]. После выемки, транспор-

тировки и укладки в тело дамбы они значительно изменяют свои значения. Возникает необходимость обобщения физико-механических характеристик техногенных грунтов, отобранных в реальных условиях эксплуатации откосных сооружений [6].

Цель настоящей работы — анализ и обобщение пространственной изменчивости физико-механических характеристик техногенных грунтов, установление зависимости механических характеристик от физических, разработка алгоритма аналитического метода прогноза устойчивости дамб с учетом изменчивости прочностных свойств суглинистых грунтов.

Наряду с прямыми исследованиями грунтов широкое распространение получают косвенные: геофизические методы (сейсмоакустический, термометрический, геомагнитный, электромагнитный) и гидрогеологические наблюдения (контроль фильтрации и работы дренажных устройств; определение фильтрационных свойств грунтов, положения депрессионной поверхности в массиве; изменения порового давления во времени) [7, 8].

Одно из основных предназначений исследований техногенных грунтов — определение надежности дамб накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий, характеризуемой коэффициентом устойчивости:

$$k_f = \frac{\sum \left(P_i \cos \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i - \frac{\rho_w g h_i^B l_i^B}{\cos \alpha_i} \right) + \sum C_i l_i}{\sum P_i \sin \alpha_i}, \quad (1)$$

где P_i — вес i -го элементарного блока, отнесенного к единичной ширине призмы обрушения, Н/м; α_i — угол наклона основания блока в его середине, град; φ_i — угол внутреннего трения грунта i -го блока, град; ρ_w — плотность воды, г/см³; g — ускорение свободного падения, м/с²; h_i^B, l_i^B — высота и длина обводненной части блока, м; C_i — сцепление грунта i -го блока, МПа; l_i — длина поверхности скольжения элементарного блока единичной ширины, м.

Экспериментальные данные представлены материалами инженерно-геологических изысканий, проведенных ООО «Геотехника» (г. Кемерово) на дамбах накопителей жидких отходов горнопромышленных предприятий Кузбасса. Для удобства обработки данных каждому объекту присвоен номер 1, 2, ..., n . Результаты изысканий подвергнуты предварительной обработке, проанализированы свойства образцов грунтов, извлеченных однотипным буровым станком, прошедших испытания на приборах одной марки, определенного геолого-генетического комплекса, расположенные выше и ниже депрессионной кривой.

Анализ пространственной изменчивости свойств грунтов показал, что рассеяние характеристик грунтов по глубине и площади, характеризуемое коэффициентом вариации, отдельных (рис. 1) и совокупности дамб Кузбасса носит небольшой (до 4 %) разброс значений по плотности (1.61–2.19 г/см³), несколько больший (до 20 %) по углу внутреннего трения (11–35°) и весьма значимое (до 70 %) варьирование сцепления (0.005–0.140 МПа) [9].

Изучение экспериментальных данных, а также опыт эксплуатации дамб позволяет предположить, что для грунтов определенного геолого-генетического комплекса (суглинок) существует возможность определения их нормативных значений на основе обобщения и установление закономерностей их изменения статистическими методами. Процедура анализа и обобщения физико-механических характеристик грунтов по материалам инженерно-геологических изысканий приведена на рис. 2. Массив экспериментальных данных для получения нормативных значений физико-механических характеристик техногенных грунтов представлен 284 образцами, из которых 167 — отобраны выше, 117 — ниже депрессионной кривой.

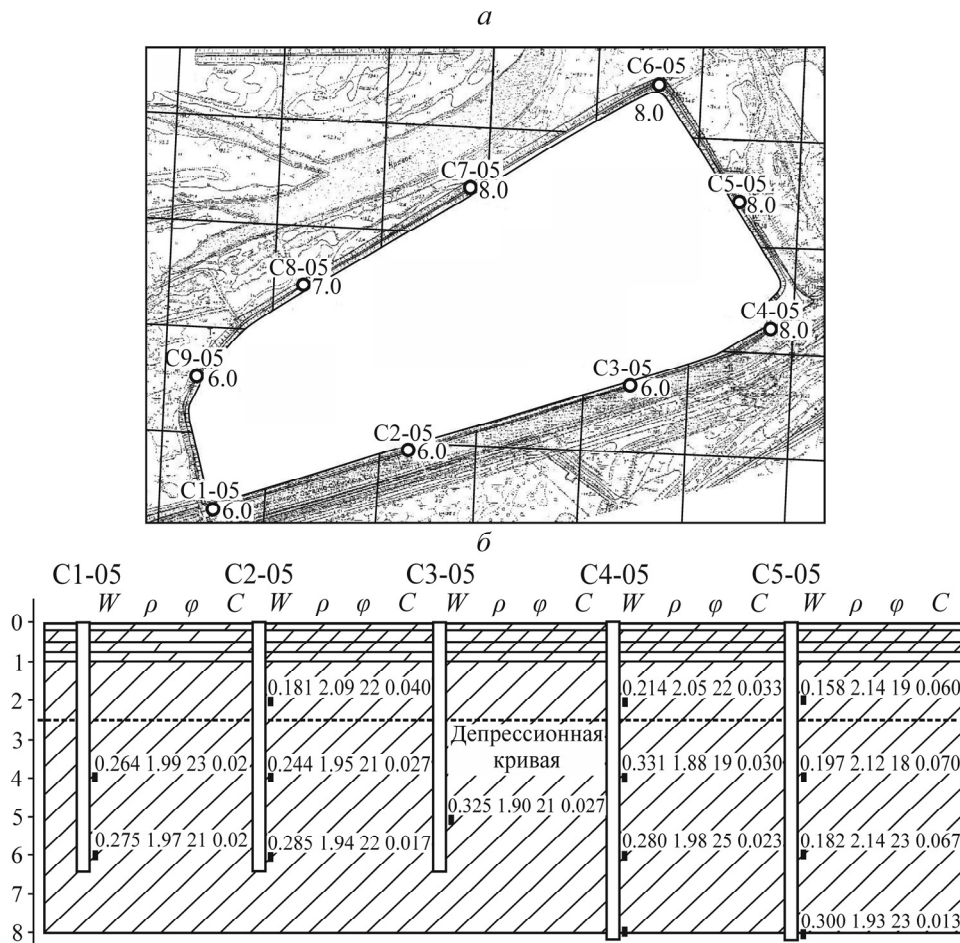


Рис. 1. План (а) и продольный профиль (б) дамбы объекта 13



Рис. 2. Схема анализа и обобщения физико-механических характеристик грунтов

Для надежности исходный материал разбит на обучающую и экзаменационную выборки, каждая из которых обработана по идентичной процедуре. По результатам статистической обработки установлено следующее.

Распределения характеристик плотности, угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой соответствуют нормальному; характеристик сцепления — логнормальному законам. Эмпирическое распределение угла внутреннего трения грунта, расположенного выше депрессионной кривой, не получило подтверждения подчинения какому-либо закону.

Равенство средних значений физико-механических характеристик техногенных грунтов обучающей и экзаменационной выборок по всем рассматриваемым показателям, подтвержденное t -критерием Стьюдента, позволило выделить их для условий Кузбасса в качестве обобщенных. Однако анализ гистограмм эмпирического распределения значений сцепления показал целесообразность использования “модального” значения признака (табл. 1).

ТАБЛИЦА 1. Обобщенные значения физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса

Показатель	Среднее значение для выборки			Мода
	обучающей	экзаменационной	общее	
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой				
C , МПа	0.039	0.037	0.039	0.024
ρ , г/см ³	1.940	1.950	1.950	1.950
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой				
C , МПа	0.043	0.038	0.041	0.025
ρ , г/см ³	1.980	1.970	1.980	1.980
φ , град	21	20	20	19

По результатам оценки различий средних значений физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов дамб, отобранных в отдельных районах Кузбасса, методом однофакторного дисперсионного анализа установлено, что средние значения плотности и угла внутреннего трения грунта ниже депрессионной кривой можно считать постоянными. В выборках сцепления и плотности грунта выше депрессионной кривой методом множественного сравнения по критерию Б. Дункана выявлены неоднородные элементы и проведено их районирование (табл. 2, столбцы 3–7).

Результаты статистической обработки экспериментальных данных показали следующее:

— диапазон фактических значений характеристик обширнее рекомендуемых СП 11-105-97 (Ч. III, табл. Ж.1) для сцепления — в 5.2, угла внутреннего трения — в 3.5, плотности — в 1.8 раза;

— расхождения обобщенных характеристик грунтов выше и ниже депрессионной кривой находятся в пределах погрешности вычислений (сцепление 0.001 МПа, плотность 0.03 г/см³); при оценках устойчивости проектируемых дамб из суглинка следует руководствоваться нормативными для условий Кузбасса характеристиками грунта ниже депрессионной кривой (табл. 2, столбец 2).

ТАБЛИЦА 2. Рекомендуемые нормативные значения физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов для условий Кузбасса

Показатель	Обобщенные	По районам					СП 11-105-97, Ч. III, табл. Ж.1	
		Кемеровский	Ленинск-Кузнецкий	Новокузнецкий	Прокопьевский	Гурьевский	Свежеобразованные	Слежавшиеся
1	2	3	4	5	6	7	8	9
Грунт, расположенный выше депрессионной кривой								
φ , град	— 14–35	— 14–32	— 14–29	— 14–33	— 14–25	— 14–35	— 15–20	— 18–26
C , МПа	0.024 0.005–0.140	0.021 0.005–0.090	0.027 0.005–0.140	0.028 0.013–0.078	0.033 0.024–0.041	0.027 0.010–0.050	— 0.03–0.05	— 0.039–0.065
ρ , г/см ³	1.95 1.61–2.19	1.93 1.76–2.11	1.95 1.61–2.11	1.98 1.61–2.14	1.90 1.83–2.09	1.99 1.63–2.19	— 1.50–1.80	— 1.95–2.30
Грунт, расположенный ниже депрессионной кривой								
φ , град	20 11–32	20 14–32	18 11–24	21 18–26	20 18–26	22 19–23	—	—
C , МПа	0.025 0.005–0.117	0.026 0.008–0.083	0.024 0.010–0.057	0.029 0.005–0.083	0.023 0.005–0.117	0.028 0.012–0.067	—	—
ρ , г/см ³	1.98 1.77–2.14	1.97 1.77–2.08	1.95 1.89–2.09	1.98 1.84–2.14	2.12 1.85–2.13	1.99 1.93–2.04	—	—

Примечание. В первой строке указано нормативное значение характеристики, во второй — диапазон ее изменения.

Для вскрытия закономерностей связи физико-механических характеристик грунтов применен известный метод корреляции. Алгоритм прогноза прочностных характеристик грунта по материалам инженерно-геологических изысканий приведен на рис. 3. Исходные данные представлены в виде интервального ряда в координатной плоскости, где ось абсцисс — интервалы факторного признака (естественная влажность W , влажность на границе текучести W_l , влажность на границе раскатывания W_p , плотность ρ , коэффициент водонасыщения S_r , коэффициент пористости e , показатель текучести I_p , число пластичности I_l), ось ординат — средние значения результативного признака (сцепление C , угол внутреннего трения φ).

Визуальной оценкой полученных графических моделей отобраны пары с прослеживаемой статистической связью между характеристиками грунта. Регрессионные уравнения, наиболее адекватно описывающие зависимости между факторным и результативным показателями, получены минимизацией суммы квадратов отклонений эмпирических от прогнозируемых значений результативного признака и решения методом наименьших квадратов 152 систем линейных уравнений. Исходя из условий простоты функции и минимизации степени рассеяния результативного признака, выбраны оптимальные уравнения парной регрессии.

Парным регрессионным анализом установлено, что прочностные характеристики грунта уменьшаются с увеличением его влажности. Сцепление и угол внутреннего трения связаны значимой параболической зависимостью с естественной влажностью W (рис. 4).

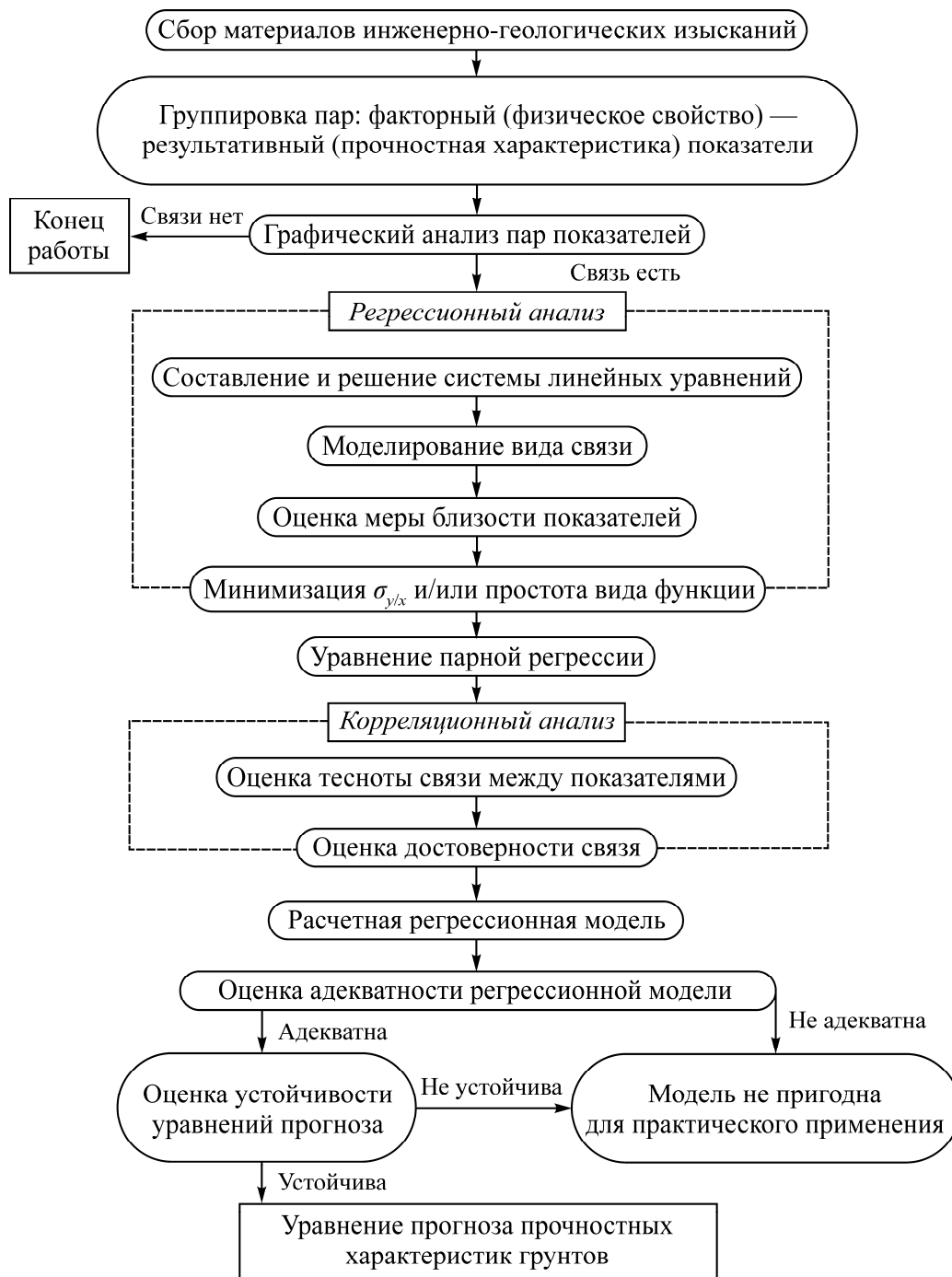


Рис. 3. Алгоритм прогноза прочностных характеристик грунта

Проверка адекватности расчетных моделей подтверждена превышением критического значения критерия Фишера ($F_{кр} = 39$ при 5% уровне значимости) при средней погрешности аппроксимации прочностных характеристик не более 20%, что сравнимо с лабораторными методами исследований. Отклонение прогнозных и фактических средних значений физико-механических характеристик техногенных суглинистых грунтов, образцы которых отобраны по дамбам, расположенным в отдельных районах Кузбасса, в среднем для угла внутреннего трения не превышает 0.4%, сцепления — 5.8%.

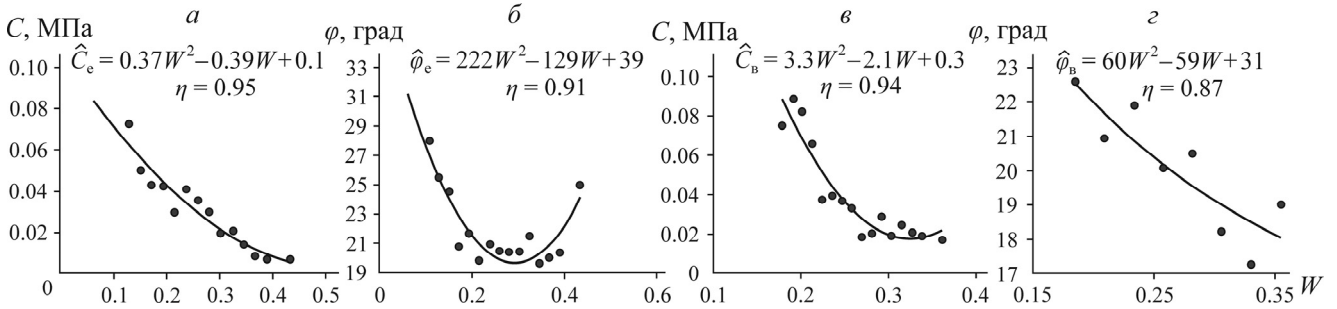


Рис. 4. Корреляционные зависимости прочностных свойств грунтов, расположенных выше (а, б) и ниже (в, г) депрессионной кривой, от естественной влажности

В практике проектирования грунтовых дамб выбор их профиля, обеспечивающего устойчивое положение, определяется методом итерации — построением множества вариантов контура проектируемой дамбы и расчета устойчивости откосов для каждого варианта пока коэффициент устойчивости не будет удовлетворять нормативному значению. Коэффициент устойчивости связан с геометрическими параметрами и физико-механическими свойствами грунтов. Предполагается существование некой корреляционной связи параметров дамбы от физико-механических характеристик грунта, использование которой позволит оперативно устанавливать ее расчетный контур (угол откоса для заданной высоты).

Метод оперативного прогнозирования параметров дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта показан на рис. 5.



Рис. 5. Алгоритм аналитического метода прогноза устойчивости дамбы

Сущность метода заключается в следующем: определяются физико-механические свойства грунта (по материалам инженерных изысканий или прогнозированием сцепления и угла внутреннего трения по имеющимся значениям естественной влажности, либо по региональной таблице обобщенных значений); методом корреляции аппроксимируются геометрические параметры дамбы или критериальный показатель безопасности (коэффициент устойчивости k) прочностными характеристиками грунтов, выражаемый линейным уравнением первого порядка; параметры дамбы корректируются с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик техногенных суглинистых грунтов. Поиск наиболее напряженной поверхности скольжения включает выбор типа основания, моделирование напряженного состояния дамбы, аналитическое выражение поверхности скольжения, параметров блоков и нагрузок.

Исследования показали, что выбор угла откоса (но не более угла естественного откоса грунтов 35°) сооружения высотой до 20 м возможен по уравнению

$$\beta(C_i, \varphi_i) = 947C_i + 1.3\varphi_i - 8 \text{ при } R = 0.80.$$

Для полученного профиля дамбы проводят прогноз устойчивости, определяя коэффициент устойчивости, выражающийся трехфакторной корреляционной моделью. Например, при заложении откоса 1:2 и высоте дамбы до 20 м уравнение множественной регрессии примет вид

$$k(C_i, \varphi_i, \rho_i) = 27C_i + 0.05\varphi_i - 0.4\rho_i + 0.6 \text{ при } R = 0.85. \quad (2)$$

На этапе проектирования дамб с помощью (2) решается обратная задача — подбор характеристик грунта, при которых устойчивость дамбы с заданными параметрами будет обеспечена. Моделирование напряженного состояния грунтовых дамб позволило установить, что для условий Кузбасса при высоте дамбы до 20 м и среднем значении сцепления для всего диапазона изменчивости плотности и угла внутреннего трения изменение коэффициента устойчивости составляет соответственно 10 и 30 % (рис. 6). При средних значениях плотности, угла внутреннего трения и минимальном сцеплении 0.005 МПа дамба переходит в состояние предельного равновесия $k = 1$, что указывает на большую вероятность формирования оползня откоса. При вариации сцепления от минимального значения до максимального диапазон изменения коэффициента устойчивости достигает 70 %.

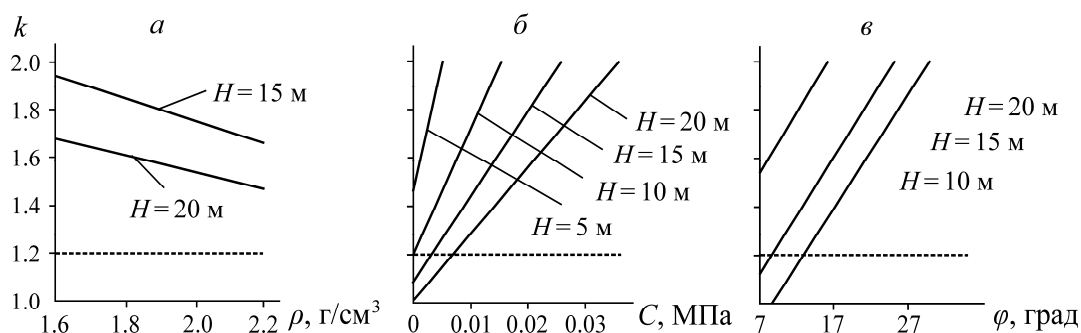


Рис. 6. Зависимость коэффициента устойчивости от изменчивости характеристик грунта

Аналитический метод оперативного прогнозирования параметров грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта заключается в следующем. Грунтовая дамба представлена в виде двумерного профиля со следующими элементами: поверхность низового и верхового откосов, гребень, линия контакта с основанием, поверхность скольжения. Элементы профиля в графическом виде изображены прямыми и кривыми линиями. Моделирование осуществлено в декартовой системе координат: начало — нижняя бровка низового откоса, ось абсцисс совпадает с линией горизонта, ось ординат отражает высотные отметки

дамбы. Положение элементов на плоскости выражено уравнениями в координатной форме. Коэффициент запаса устойчивости вычисляется с помощью уравнения множественной регрессии (2), отражающего изменчивость прочностных характеристик грунта [10]. Аналитический метод прогноза устойчивости реализован в программе для ЭВМ “Устойчивая насыпь” [11].

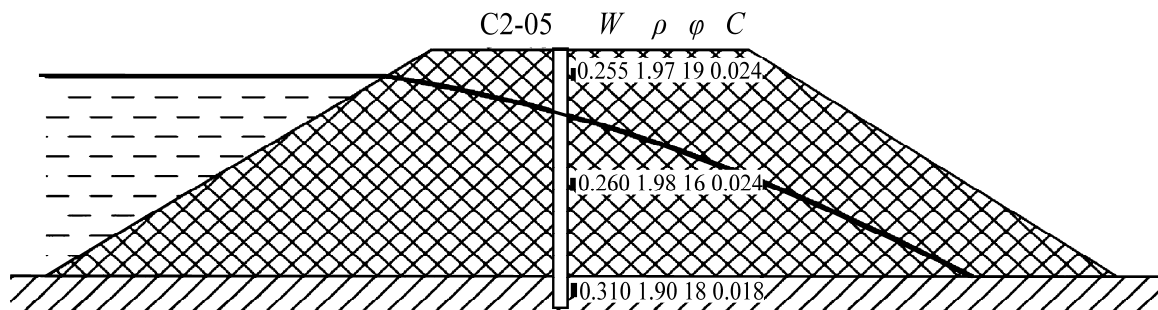


Рис. 7. Профиль грунтовой дамбы (объект 17)

Расчетом устойчивости реальных дамб (рис. 7) аналитическим способом и по корреляционной связи для физико-механических свойств, определенных по результатам инженерно-геологических изысканий или прогнозом сцепления, угла внутреннего трения по естественной влажности либо обобщенных для дамб Кузбасса (табл. 3), установлено следующее:

- незначительное до 10 % расхождение коэффициента устойчивости, позволяющее на этапе проектирования использовать наименее трудоемкий способ прогноза (по корреляционным связям);
- на этапе эксплуатации оценку устойчивости дамбы следует выполнять по прочностным характеристикам грунтов, полученным по инженерно-геологическим изысканиям, так как прогнозные значения дают завышенное значение коэффициента устойчивости;
- на этапе проектирования целесообразно использовать таблицу региональных свойств, в этом случае получается несколько заниженный коэффициент устойчивости, что приведет к дополнительному запасу устойчивости дамбы.

ТАБЛИЦА 3. Прогноз устойчивости грунтовых дамб Кузбасса

Шифр объекта	Свойства ¹			Параметры дамбы		Коэффициент устойчивости ² , определенный	
	по изысканиям	прогнозные	обобщенные	Высота, м	Заложение откоса	по корреляционной связи	аналитическим способом
9	20	20	20 0.025 1.980	12.7	1 : 2.4	1.91	2.14
	0.023	0.031				2.25	2.52
	1.980	1.980				1.99	2.23
15	22	20		17.8	1 : 2.5	2.38	2.52
	0.038	0.041				2.41	2.52
	2.000	1.980				1.78	1.95
16	21	21		6.0	1 : 1.7	3.27	3.15
	0.030	0.043				4.23	4.13
	1.980	1.980				2.67	2.72
17	18	19		7.5	1 : 1.0	1.27	1.30
	0.021	0.022	1.35			1.39	
	1.920	1.980	1.41			1.43	

Примечание. ¹Первое число в ячейке соответствует углу внутреннего трения, градус; второе — сцеплению, МПа; третье — плотности, г/см³. ²Первое число в ячейке соответствует коэффициенту устойчивости, рассчитанному для грунтов по материалам инженерно-геологических изысканий; второе — по прогнозным прочностным характеристикам; третье — по обобщенным характеристикам для региона.

ВЫВОДЫ

Для надежной оценки устойчивости грунтовых дамб накопителей жидких отходов на этапе проектирования целесообразно использовать нормативные характеристики физико-механических свойств суглинистых грунтов для условий Кузбасса: средние значения плотности (1.98 г/см^3) и угла внутреннего трения (20°), модальное — для сцепления (0.025 МПа).

Прочностные характеристики глинистого грунта ниже депрессионной кривой уменьшаются с увеличением его естественной влажности (при $0.20-0.30$) и выражаются тесной параболической зависимостью, характеризуемой корреляционным отношением $\eta_{xy} > 0.87$.

На этапе проектирования дамб с достаточной степенью надежности (расхождение коэффициентов устойчивости не более 10%) допустимо применение аналитического метода оперативного прогнозирования параметров грунтовых дамб с учетом пространственной изменчивости прочностных характеристик грунта, основанного на использовании трехфакторной корреляционной модели.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Sivakumar G. L. and Mukesh M. D.** Effect of soil variability on reliability of soil slopes, *J. Géotechnique*, 2004, Vol. 54, No. 5. — P. 335–337.
2. **Cho S. E.** Effects of spatial variability of soil properties on slope stability, *J. Eng. Geol.*, 1992, Vol. 92. — P. 97–109.
3. **Едигенов М. Б.** Изменчивость свойств грунтов на бортах карьера Варваринского месторождения Костанайской области Казахстана // Изв. НАН Кыргызской Республики. — 2014. — № 2. — С. 30–35.
4. **Ахлюстин О. Е.** Закономерности изменчивости физико-механических свойств просадочных грунтов Анапского района Краснодарского края: автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. — Екатеринбург, 2013. — 23 с.
5. **Черняк Э. Р.** Будущее за региональными таблицами нормативных и расчетных показателей механических свойств грунтов // Инж. изыскания. — 2011. — № 9. — С. 4–8.
6. **Руководство по составлению региональных таблиц нормативных и расчетных показателей свойств грунтов / ПНИИИС Госстроя СССР.** — М.: Стройиздат, 1981.
7. **Простов С. М., Смирнов Н. А., Бахаева С. П.** Прогноз физико-механических свойств намывного массива по данным электрических зондирований // ФТПРПИ. — 2015. — № 1. — С. 69–78.
8. **Курленя М. В., Сердюков А. С., Чернышов Г. С., Яблоков А. В., Дергач П. А., Дучков А. А.** Методика и результаты исследования физико-механических свойств связных грунтов сейсмическим методом // ФТПРПИ. — 2016. — № 3. — С. 3–10.
9. **Гурьев Д. В.** Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса // Вестн. КузГТУ. — 2015. — № 3. — С. 31–36.
10. **Bakhaeva S. P. and Guriev D. V.** Analytical prediction of stability of earthfill dam, *Proc. of the 8th Russian-Chinese Symp. Coal in the 21st Century, Mining, Proc., Safety, Beijing*, 2016. — P. 188–192.
11. **Св-во № 2015617755.** О государственной регистрации программы для ЭВМ “Устойчивая насыпь” / Д. В. Гурьев, М. М. Караблин; № 2015613416; заявл. 23.04.2015; зарегистр. 22.07.2015.

*Поступила в редакцию 06/XI 2019
После доработки 20/XII 2019
Принята к публикации 04/II 2020*