

УДК 622.011.4

**ПРОГНОЗ ПАРАМЕТРОВ ДАМБЫ НА ОСНОВЕ МОДЕЛИРОВАНИЯ
НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ОТКОСА**

**THE FORECAST OF PARAMETERS OF DAMS BASED ON
THE MODELING THE STRESS-STRAIN STATE OF A SLOPE**

Бахаева Светлана Петровна,

доктор технических наук, профессор, e-mail: baxaevas@mail.ru

Bakhaeva Svetlana P., Dr. Sc. in Engineering, Professor

Гурьев Дмитрий Витальевич,

аспирант,

Guriev Dmitry V., post-graduate student

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 650000, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, 28 street Vesennaya, Kemerovo, 650000, Russian Federation

Аннотация: представлены результаты моделирования напряженного состояния грунтовой дамбы и алгоритм аналитического расчета коэффициента запаса устойчивости, реализованной в программе для ЭВМ «Устойчивая насыпь». Выведены уравнения множественной регрессии, позволяющие управлять физико-механическими свойствами техногенных дисперсных грунтов либо параметрами дамбы, обеспечивая нормативное значение коэффициента запаса устойчивости.

Abstract: the paper presents the results of modeling the stress state of an earthfill dam and the algorithm for analytical calculation of the factor of sustainability that is implemented in the computer program "Sustainable mound". Equations of multiple regression, allows to control the physico-mechanical properties of man-induced dispersed soil or parameters of the dam, providing a normative value for the factor of sustainability.

Ключевые слова: физико-механические свойства, техногенные дисперсные грунты, моделирование, напряженное состояние, уравнение регрессии.

Keywords: physico-mechanical properties, technological disperse different soils, simulation, stress, regression equation.

По данным Российского регистра [1] в настоящее время насчитывается свыше 12 тысяч гидroteхнических сооружений, уровень безопасности 46% которых характеризуется как «нормальный», 33% - «пониженный», 10% - «неудовлетворительный», 3 - «опасный», по 8% сооружений нет данных. Для поддержания «нормального» уровня безопасности статьей 9 Федерального закона № 117-ФЗ «О безопасности гидroteхнических сооружений» [2] предусмотрена ответственность собствен-

ника за ведение контроля (мониторинга) состояния гидroteхнического сооружения с целью обеспечения его безопасности. Для диагностики состояния сооружений разрабатываются качественные и количественные критерии безопасности объектов мониторинга.

К наиболее уязвимым объектам комплекса гидroteхнических сооружений, разрушение которых может привести к возникновению чрезвычайной ситуации, является грунтовая дамба. Количествен-

Таблица 1. Уравнения элементов профиля дамбы
Table 1. Equations of the elements of the profile of the dam

Элемент	Уравнение	Переменные формул
Низовой откос	$Y_i = x_i / m_1$	m_1, m_2 – коэффициент заложения низового и верхового откосов; h_∂ – высота дамбы, м; b – ширина гребня, м; α – угол наклона основания, град
Верховой откос	$Y_i = -\frac{x_i}{m_1} + \frac{m_2 h_\partial + b}{m_1} + h_\partial$	
Гребень	$Y_i = h_\partial$	
Основание	$Y_i = x_i \tan \alpha$	

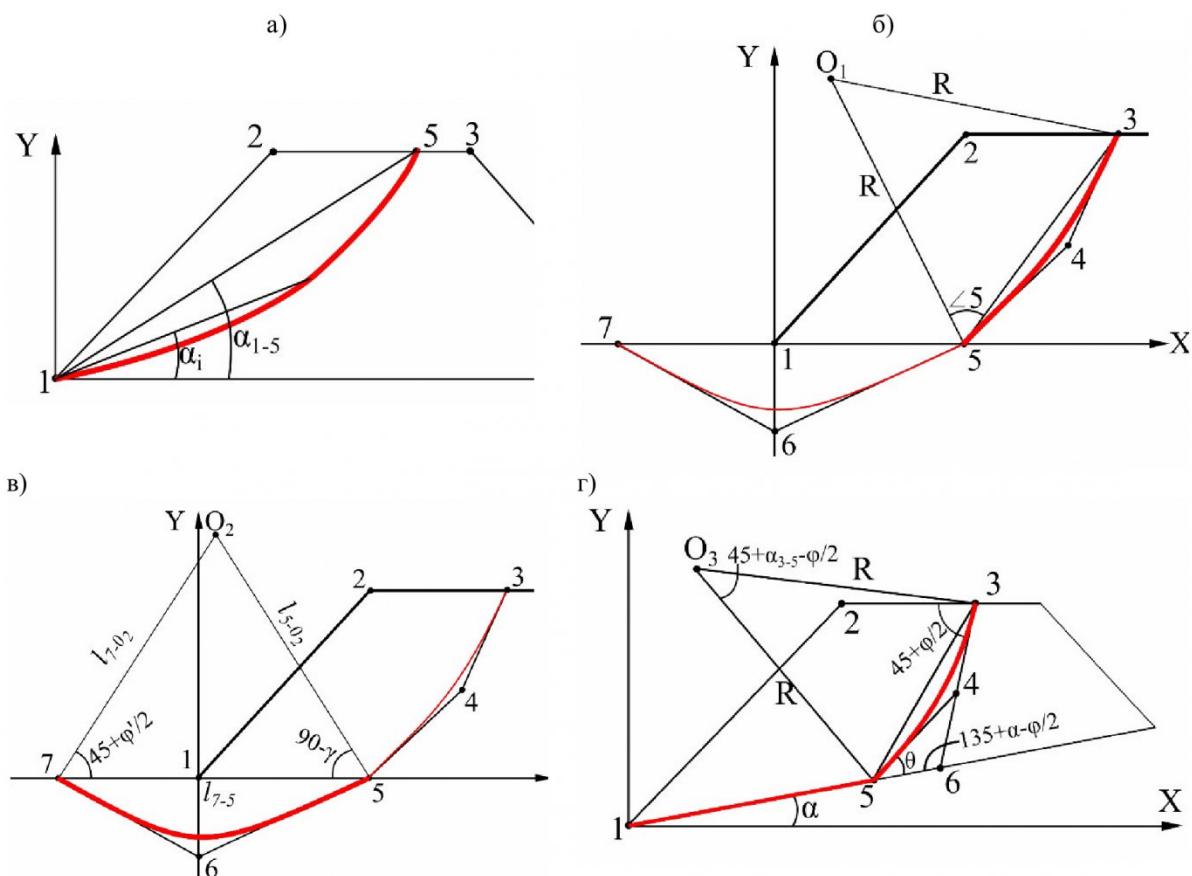


Рис. 1. Моделирование поверхности скольжения для дамбы на прочном (а), слабом (б, в) и слоистом (г) основаниях

Fig. 1. Modeling of the sliding surface for the dam on a solid (a), weak (b, v) and layered (г) grounds

ным критерием безопасности дамбы является коэффициент запаса устойчивости, характеризующий напряженно-деформированное состояние техногенного грунтового массива.

Для возможности оперативной оценки надежности грунтовой дамбы на этапе эксплуатации, обратимся к моделированию ее напряженно-деформированного состояния. Модель грунтовой

дамбы представим в виде профиля, на котором изобразим низовой и верховой откосы, гребень, линию контакта с основанием. Каждый элемент профиля дамбы опишем уравнениями прямой (таблица 1).

Потенциальная поверхность скольжения, оконтуривающая призму возможного обрушения откоса дамбы, имеет криволинейную в профиле форму.

Таблица 2. Уравнения поверхностей скольжения
Table 2. Equation of the sliding surfaces

Вид основания	Поверхность скольжения	
	в массиве	в основании
Горизонтальное прочное	$Y_i = x_i \tan\left(\frac{\alpha_{1-5}}{x_5} x_i\right)$	$\Delta R = \frac{l_{7-O_2} - l_{5-O_2}}{l_{7-5}} -$
Горизонтальное слабое	$Y_i = Y_{O_1} - \sqrt{R^2 - (x_i - X_{O_1})^2}$	$Y_i = Y_{O_2} - \sqrt{(l_{5-O_2} + \Delta R(l_{7-5} - x_i - X_7))^2 - (x_i - X_{O_2})^2}$
Наклонное слоистое	$Y_i = Y_{O_3} - \sqrt{R^2 - (x_i - X_{O_3})^2}$	$Y_i = x_i \tan\alpha$
Примечание	$\Delta R = \frac{l_{7-O_2} - l_{5-O_2}}{l_{7-5}}$	

Поверхность скольжения выразим уравнением кривой, вид которой определяется углом наклона и типом грунтов основания. Для дамбы на горизонтальном прочном основании поверхность скольжения выразим уравнением кривой, близкой к тангенциальной (рис. 1а); на горизонтальном слабом (водоносыщенном) – в массиве – уравнением окружности в координатной форме (рис. 1б), в основании – уравнением кривой, близкой к окружности (рис. 1в); на наклонном слоистом – в массиве также уравнением окружности в координатной форме (рис. 1г), в основании – уравнением прямой.

Уравнения поверхностей скольжения в анали-

тическом виде приведены в табл. 2.

Поверочный расчет сдвигающих и удерживающих сил, действующих на призму возможного обрушения, для отвалов на горизонтальном основании выполняется методом алгебраического сложения сил, границы элементарных блоков при этом проводят вертикально (рис. 2а). Для отвалов на наклонном основании границами блоков являются кривые первого (3-5) и второго (Б-2 и А-5) семейства поверхностей скольжения (рис. 2б), которые с небольшой погрешностью аппроксимации могут быть заменены на отрезки прямых.

Параметры элементарных блоков и силы, дей-

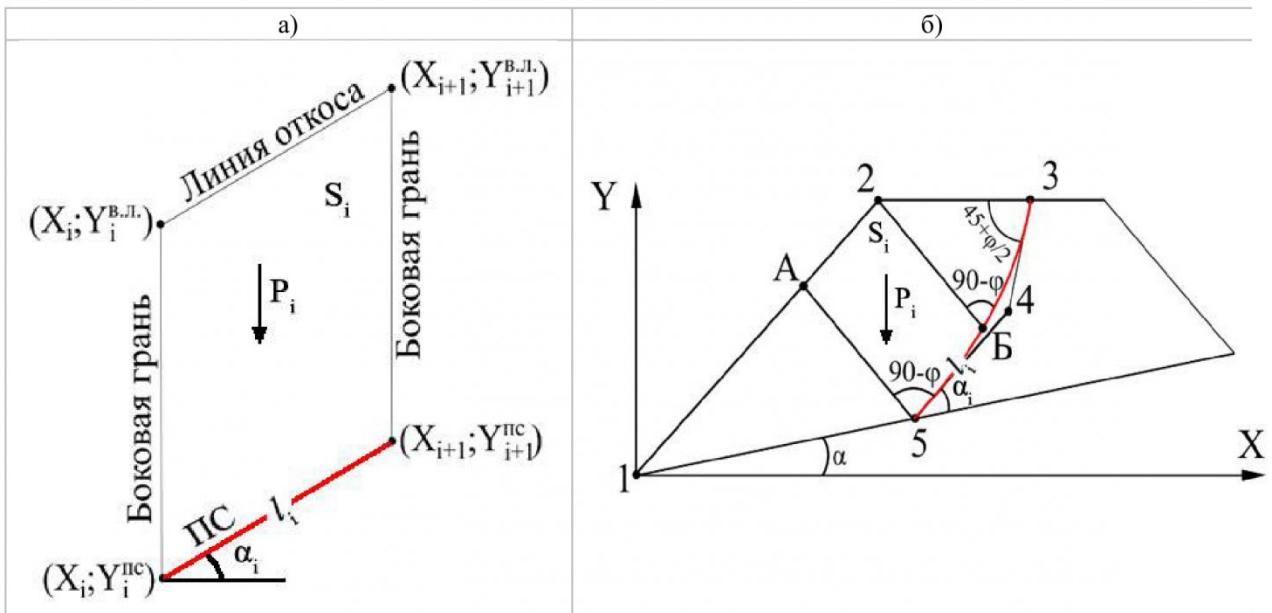


Рис. 2. Вид элементарных блоков при поверочных расчетах методом алгебраического (а) и векторного (б) сложения сил

Fig. 2. View basic blocks in the check calculations of the algebraic method (a) and vector method (b) addition of forces

Таблица 3. Параметры элементарных блоков и действующие силы
Table 3. The parameters of elementary blocks and forces

Параметр	Уравнения для методов поверочного расчета	
	алгебраического сложения сил	векторного сложения сил
Площадь	$S_i = 0,5 \left[(x_i^{\theta..l} - x_i) (y_i^{\theta..l} + y_i) + \dots + (x_i^{\theta..l} - x_{i+1}) (y_i^{\theta..l} + y_{i+1}) \right]$	
Длина ПС		$l_{i_{бок}} = \sqrt{(x_i - x_i)^2 + (y_i^{nc} - y_{i+1}^{nc})^2}$
Угол наклона основания блока		$\alpha_i = \tan^{-1} \frac{y_i^{nc} - y_{i+1}^{nc}}{x_i - x_{i+1}}$
Вес		$P_i = S_i \rho$
Длина боковой грани	-	$l_{i_{бок}} = \sqrt{(x_i^{\theta..l} - x_i)^2 + (y_i^{\theta..l} - y_i)^2}$
Силы сцепления в основании	-	$C_{i_{осн}} = Cl_{i_{осн}}$
Силы сцепления по боковой грани	-	$C_{i_{бок}} = Cl_{i_{бок}}$

ствующие в основании и по боковым граням, выражим аналитическими уравнениями через координаты угловых точек (таблица 3).

Алгоритм аналитического расчета коэффициента запаса по наиболее напряженной поверхности скольжения, реализованный в программе для ЭВМ «Устойчивая насыпь» [3], представлен на рис. 3.

В рамках обобщения материалов инженерно-геологических изысканий по дамбам накопителей жидких отходов и обработки их статистическими методами авторами получена региональная таблица физико-механических свойств техногенных глинистых грунтов Кузбасса, которая приведена в работе [4]. Интервал изменчивости по основным показателям, влияющим на устойчивость откоса, составил: по углу внутреннего трения $\phi = 7 \div 35^\circ$, сцеплению $C = 0,005 \div 0,140$ МПа, плотности грунтов $\gamma = 1,56 \div 2,19$ т/м³.

Моделируя напряженное состояние откоса высотой 10 м (коэффициент заложения 2) при среднем значении сцепления грунтов для всего диапазона изменчивости плотности и угла внутреннего трения

обосновать требования к сцеплению грунтов и тем самым обеспечить надежность откосного сооружения.

Используя программу для ЭВМ [3] методом множественной корреляции установили тесную связь ($R^2 = 0,99 \pm 0,01$) коэффициента запаса от совокупности физико-механических свойств техногенного дисперсного грунта, выражаемую уравнением множественной регрессии со средней погрешностью аппроксимации $\bar{\varepsilon} = 1,7\%$:

$$k(\rho, \phi, C) = 0,80\rho_i - 0,43\rho_i + 36,52C_i + 0,80(1)$$

Полученное уравнение регрессии (1) позволяет на этапе проектирования подобрать грунт с характеристиками, при которых будет обеспечена устойчивость дамбы с заданными параметрами.

В том случае, когда выбор грунтов ограничен и нет возможности изменить их прочностные характеристики, управляют параметрами сооружения. Для этого также воспользовались упомянутой выше программой [3] и промоделировали влияние прочностных характеристик грунтов на устойчивость дамбы. Высота откосного сооружения, как



Рис. 3. Алгоритм расчета минимального коэффициента запаса устойчивости

Fig. 3. The calculation algorithm of the minimum safety factor stability

установили, что коэффициент запаса превышает 1,5, его изменение составило соответственно 10 и 30% (рис. 4). Вместе с тем при средних значениях плотности и угла внутреннего трения коэффициент запаса изменяется в пределах 70%, и при минимальном значении сцепления достигает критического значения 1,0, что указывает на большую вероятность формирования оползня откоса. Предложенная выше методика расчета коэффициента запаса (рис. 3) позволяет на этапе проектирования

правило, известна, плотность грунтов не оказывает значимого влияния на коэффициент запаса, поэтому при моделировании ее приняли равной среднему значению по Кузбассу [5]. При различных сочетаниях прочностных свойств (угол внутреннего трения, сцепление) определили значение угла откоса, обеспечивающего устойчивость сооружения. По результатам статистической обработки полученного массива данных установили тесную связь ($R^2 = 0,98 \pm 0,01$) угла откоса от сцепления и угла внутреннего трения

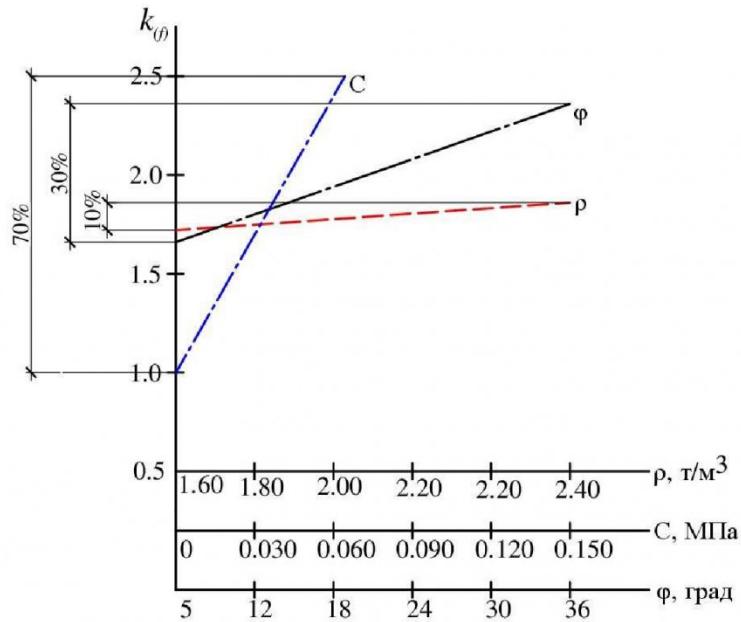


Рис. 4. Влияние физико-механических свойств на коэффициент запаса
Fig. 4. The influence of physico-mechanical properties on the safety factor

грунтов, выражаемую уравнением множественной регрессии (2) со средней погрешностью аппроксимации $\bar{\varepsilon} = 2,7\%$.

$$\beta(\varphi, C) = 1,27\varphi_i + 15,88C_i - 3,52 \quad (2)$$

Результатом графоаналитического моделирования напряженного-деформированного состояния откосного сооружения от изменчивости прочност-

ных свойств техногенных дисперсных грунтов являются уравнения множественной регрессии, позволяющие для заданных параметров откосного сооружения подобрать свойства грунтов либо по прочностным характеристикам грунтов управлять заложением откоса, обеспечивая нормативное значение коэффициента запаса устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Обобщенные данные по федеральным органам надзора за безопасностью ГТС [электронный ресурс] режим доступа: <http://www.waterinfo.ru/gts/rstat2.php>.
- Федеральный закон от 23.06.1997 №117 «О безопасности гидroteхнических сооружений» // Российская газета. 1997. – №144.
- Свидетельство № 2015617755 от 22.07.2015 о государственной регистрации для ЭВМ «Устойчивая насыпь» / авт. Гурьев Д. В., Караблин М. М. – 2015.
- Гурьев Д. В. Обобщение характеристик дисперсных грунтов техногенных массивов на примере Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2015. – №3. – С. 31-36.
- Бахаева С. П. Исследование влияния изменчивости физико-механических свойств грунтов на устойчивость дамб / С. П. Бахаева, Д. В. Гурьев, Т. В. Михайлова // Маркшейдерский вестник. – 2013. – №5. – С. 11-14.

REFERENCES

- Obobshchennye dannye po federal'nym organam nadzora za bezopasnost'ju GTS [jelektronnyj resurs] rezhim dostupa: <http://www.waterinfo.ru/gts/rstat2.php>.
- O bezopasnosti gidrotehnicheskikh sooruzhenij: Federal'nyj zakon ot 23.06.1997 №117 // Rossijskaja gazeta. 1997. – N 144.
- Svidetel'stvo № 2015617755 ot 22.07.2015 o gosudarstvennoj registracii dlja JeVM «Ustojchivaja nasyp'» / avt. Gur'ev D. V., Karablin M. M. – 2015.
- Gur'ev D. V. Obobshchenie harakteristik dispersnyh gruntov tehnogennyh massivov na primere Kuzbassa // Vestnik KuzGTU. – 2015. – №3. – С. 31-36.
- Bahaeva S. P. Issledovanie vlijanija izmenchivosti fiziko-mehanicheskikh svojstv gruntov na ustojchivost' damb / S. P. Bahaeva, D. V. Gur'ev, T. V. Mihajlova // Markshejderskij vestnik. – 2013. – №5. – S. 11-14.

Поступило в редакцию 04.02.2016

Received 4 February 2016

УДК 622.333:622.8

ЭФФЕКТИВНОСТЬ СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ АКСИ НА ИНТЕНСИФИКАЦИЮ ДЕГАЗАЦИИ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ В ЗОНАХ ПГД

THE EFFECTIVENESS OF SEISMIC-ACOUSTIC «AKSI» EFFECTS FOR THE INTENSIFICATION OF COAL STRATA DEGASSING IN THE PGD AREAS

Гончаров Евгений Владимирович,
старший научный сотрудник, e-mail: goncharovbox@mail.ru

Goncharov Evgenii V., Senior researcher

Цирель Сергей Вадимович,
д.т.н., главный научный сотрудник, e-mail: tsirel58@mail.ru

Tsirel Sergei V., D.Sc. (Engineering), Chief researcher

Зубков Виктор Васильевич,
д.т.н., главный научный сотрудник, e-mail: VVZubkov@yahoo.com

Zubkov Victor V., D.Sc. (Engineering), Chief researcher

Научный центр геомеханики и проблем горного производства «НМСУ «Горный», 199178, Россия, Санкт-Петербург, 21 линия, д. 2

Scientific Center for Problems of geomechanics and mining industry NMSU "Gornyi". 21 line, 2, 199178, St.-Petersburg, Russia

Аннотация. В статье представлены результаты аналитических и натурных исследований посвященных методам и средствам инициирования притоков метана в углесодержащих толщах с учетом коллекторских, фильтрационных и физико-механических свойств, а также, геодинамических и геомеханических процессах формирующих условия газоотдачи. Обоснован приоритет геодинамических процессов при формировании метановых коллекторов, применимость методов морфометрии и обработки данных дистанционного зондирования для их обнаружения. Обоснована актуальность исследований процессов активизирующих экзотермические реакции, приводящих к переходу метана в свободное состояние. Представлены результаты внедрения способа сейсмоакустического воздействия, как одного из практических подходов к решению этого вопроса. Результаты успешного промышленного опробования сопоставлены с результатами численного моделирования напряженно-деформированного состояния, управление которым также возможно с применением сейсмоакустического воздействия.

Abstract. The results of analytical and field studies on ways and means of initiating inflows of methane in carboniferous strata based on collection, filtration and physico-mechanical properties, as well as the geodynamic and geomechanical processes, for the formation of gas recovery conditions have been presented in an article.

The priority of geodynamic processes in the formation of methane reservoirs and applicability of morphometric methods and processing of remote sensing data to detect them have been substantiated.

The actuality of studying of processes for exothermic reactions activation leading to methane transition to a free state have been shown.

The results of the implementation of the method of seismic acoustic influence, as one of the practical approaches addressing this issue have been demonstrated.

The results of the successful industrial testing are compared with the results of numerical simulation of stress-strain state management which is also possible with the use of seismic-acoustic effects.

Ключевые слова: метан; угольные пласты; дегазация; геомеханические и геодинамические процессы; интенсификация газопритоков.

Keywords: methane; coal seams; degassing; geomechanical and geodynamic processes; intensification of gas inflows

Введение. Поиск новых способов интенсификации газоотдачи угольных пластов стимулируется реальной перспективой использования метана в качестве химического сырья и топлива. При разработке угольных месторождений России

мало шахт, проводящих промышленное извлечение метана, включая утилизацию в котельных. Это объясняется не только и не столько несовершенством методов дегазации, сколько особыми коллекторскими свойствами углей Воркутского и,