

УДК 626.01-047.58:502.1(575.23)
DOI: 10.36979/1694-500X-2022-22-12-100-106

**ОЦЕНКА УСТОЙЧИВОСТИ ДАМБЫ ХВОСТОХРАНИЛИЩА
ЗОЛОТОИЗВЛЕКАЮЩЕЙ ФАБРИКИ РУДНИКА КУМТОР
НА ОСНОВЕ ДАННЫХ МОНИТОРИНГА
И ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ РЕОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ**

К.К. Абдыгазиев, Р.Б. Чукин, Э.Р. Исаков

Аннотация. Выполнено обоснование надежности и безопасности дамбы хвостохранилища на основе расчетов напряженно-деформированного состояния системы «сооружение-основание» с применением численных методов механики сплошной среды с учетом реальных свойств материалов и пород оснований. Для расчета коэффициента устойчивости использовалась стандартная процедура, реализованная в программе FLAC. Оценка устойчивости дамбы хвостохранилища выполнена на основе данных мониторинга и численного моделирования реологических процессов с учетом изменения прочностных свойств суглинистого прослоя от сформировавшихся деформаций сдвига во времени. Моделирование показало, что принятые меры по удалению слабого суглинистого прослоя в основании дамбы и его замена на более прочные себя оправдывают. Деформации контрольных точек, расположенных в основании и теле дамбы, носят затухающий характер, т. е. выполняется условие предельного состояния по второй группе.

Ключевые слова: дамба; надежность; безопасность; численные методы; устойчивость; прочность; реология; деформации сдвига.

**РЕОЛОГИЯЛЫК ПРОЦЕССТЕРДИ САНДЫК МОДЕЛДӨӨНҮН
ЖАНА МОНИТОРИНГДИН МААЛЫМАТТАРЫНЫН НЕГИЗИНДЕ
КУМТӨР КЕНИНИН АЛТЫН ЫЛҒООЧУ ФАБРИКАСЫНЫН
КАЛДЫКТАРДЫ САКТООЧУ ДАМБАСЫНЫН ТУРУКТУУЛУГУН БААЛОО**

К.К. Абдыгазиев, Р.Б. Чукин, Э.Р. Исаков

Аннотация. Калдыктарды сактоочу жайдын дамбасынын ишенимдүүлүгүн жана коопсуздугун негиздоо «курулма-негиз» системасынын чыңалуу-деформациялык абалын материалдардын жана негиздердин реалдуу касиеттерин эске алуу менен үзгүлтүксүз механиканын сандык ыкмасын колдонуу менен эсептөөлөрдүн негизинде аткарылды. Туруктуулук коэффициентин эсептөө үчүн FLAC программасында ишке ашырылган стандарттуу процедура колдонулган. Калдыктарды сактоочу жайдын дамбасынын туруктуулугун баалоо мониторингдин жана реологиялык процесстерди сандык моделдөөнүн маалыматтарынын негизинде, убакыттын өтүшү менен пайда болгон жылышуу деформацияларынан саздак катмардын бекемдик касиеттеринин өзгөрүшүн эске алуу менен аткарылган. Моделдөө дамбанын түбүндөгү начар чопо катмарын алып салуу жана аны кыйла бышык катмарга алмаштыруу боюнча көрүлгөн чаралар өзүн актай турганын көрсөттү. Дамбанын негизинде жана тулкусунда жайгашкан контролдук чекиттердин деформациялары өчүп бараткан мүнөздө, б.а. экинчи топ үчүн чектик абалдын шарты канааттандырылат.

Түйүндүү сөздөр: дамба; ишенимдүүлүк; коопсуздук; сандык ыкмалар; туруктуулук; бекемдик; реология; жылышуу деформациялары.

EVALUATION OF THE KUMTOR GOLD PROCESSING FACTORY TAILING FACILITY DAM STABILITY ON THE BASIS OF MONITORING DATA AND NUMERICAL SIMULATION OF RHEOLOGICAL PROCESSES

K.K. Abdygaziev, R.B. Chukin, E.R. Isakov

Abstract. The reliability and safety of the tailings dam is substantiated on the basis of calculations of the stress-strain state of the "structure-base" system using the numerical method of continuum mechanics, taking into account the real properties of materials and foundation bedrock. The standard procedure implemented in the FLAC program was used to calculate the stability coefficient. The stability assessment of the tailings dam was made on the basis of monitoring data and numerical modeling of rheological processes, taking into account changes in the strength properties of the loamy interlayer from the formed shear deformations over time. Modeling showed that the measures taken to remove the weak loamy layer at the base of the dam and replace it with stronger ones are justified. Deformations of the control points located in the base and body of the dam are damped, i.e. the limit state condition for the second group is satisfied.

Keywords: dam; reliability; safety; numerical methods; stability; strength; rheology; shear deformations.

Обеспечение устойчивости грунтовых дамб хвостохранилищ является одной из актуальных задач строительства гидротехнических сооружений (ГС). Обеспечение надежности и безопасности ГС обосновывается расчетами по методу предельных состояний [1]. Для всех расчетов должно выполняться условие, обеспечивающее недопущение наступления предельных состояний:

$$Y_{lc} F \leq \frac{R}{Y_n}, \quad (1)$$

где Y_{lc} – коэффициент сочетания нагрузок; F – расчетное значение силового воздействия или деформации; R – расчетное значение несущей способности или предельной деформации; Y_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения.

Критерием устойчивости откоса дамбы при расчетах по первой группе предельных состояний является коэффициент устойчивости (k_s):

$$k_s = \frac{R}{F} \geq Y_{lc} Y_n. \quad (2)$$

Для сооружения II класса [1], к которому относится дамба хвостохранилища золотоизвлекающей фабрики (ЗИФ) рудника Кумтор, $k_s = 1,20$. При расчетах по второй группе предельных состояний критерием устойчивости откоса дамбы является условие:

$$\frac{R}{F} \geq Y_{lc} Y_n = 1,0. \quad (3)$$

Для обоснования надежности и безопасности ГС должны выполняться расчеты напряженно-деформированного состояния (НДС) системы «сооружение-основание» на основе применения *современных, главным образом, численных методов механики сплошной среды с учетом реальных свойств материалов и пород оснований* [1].

Оценка устойчивости дамбы с учетом реологических процессов, происходящих в основании, через k_s не производится. Это вызвано тем, что соотношение $\frac{R}{F} < 1,0$. В данных условиях оценку

устойчивости дамбы необходимо проводить по следующей методике.

На первом этапе осуществляем калибровку модели, чтобы результаты расчетов по смещениям расчетных контрольных точек максимально приближались к наблюдаемым смещениям.

Методология калибровки модели в данной ситуации остается единственно оправданной, так как отсутствуют параметры реологической модели грунта, определяемые лабораторными методами.

На рисунке 1 показано сечение, где дамба имеет максимальную проектную высоту – 49,5 м. На этом же рисунке показано размещение инклинометров (INC) и пьезометров (PZ).

Калибровку модели для подбора реологических параметров суглинистого прослоя осуществляли по данным INC98-1 и INC04-8.

Физико-механические свойства грунтов основания и тела дамбы определяли по результатам инженерно-геологических изысканий, выполненных специалистами КыргызГИИЗ, лабораторных исследований грунтов, выполненных в НОЦ «Геотехника» при Московском государственном строительном университете (МГСУ) и компании BGC Engineering (Канада). Физико-механические свойства грунтов приведены в таблице 1.

Реологическая модель грунтов описывается зависимостью Нортона [2]:

$$\dot{\sigma}_{cr} = A\bar{\sigma}^n, \quad (4)$$

где $\dot{\sigma}_{cr}$ – скорость деформации ползучести; σ – интенсивность напряжений; A и n – параметры грунтов.

Калибровку реологической модели осуществляли подбором параметра A при неизменном параметре $n = 3,0$. В результате ряда численных экспериментов по подбору параметра A была получена следующая зависимость:

$$A = 8 * 10^{-26} * \exp(30 * ssi), \quad (5)$$

где ssi – деформации сдвига.

Расчетные значения горизонтальных смещений контрольных точек с данными наблюдений по INC98-1 и INC04-8, а также прогноз смещений представлены на рисунках 2 и 3, соответственно.

Расчетные значения горизонтальных смещений хорошо согласуются с наблюдаемыми по данным INC98-1 (рисунок 2). На рисунке 3 видно, что подобранные свойства суглинистого прослоя по данным INC98-1 приводят к незначительному превышению смещений на участке, где расположен INC04-8. В частности, на 2014 г. в выбранной контрольной точке на отметке 3620.8 м наблюдаемые смещения составили 0,092 м, а расчетные – 0,104 м. Отмечается и хорошее приближение характера очертания графиков наблюдаемых смещений с расчетными.

Оценку устойчивости дамбы с реологическими процессами необходимо производить с учетом изменения прочностных свойств суглинистого прослоя от сформировавшихся ssi во времени. После достижения предельной величины ssi грунты суглинистого прослоя больше не сопротивляются сдвигу. Величина предельных ssi принята равной 8.3 % на основании результатов исследований лаборатории МГСУ.

Характер деформирования контрольных точек позволит установить устойчивость по второй группе предельных состояний. Дамба считается неустойчивой, если графики скоростей смещений расчетных контрольных точек показывают увеличением скорости смещений, т. е., если условие (3) не выполняется. Если контрольные точки деформируются с постоянной скоростью или с затухающей деформацией, то условие по второй группе предельных состояний выполняется, и дамба считается устойчивой.

Расчет развития реологических процессов выполнялся до 2040 года. После чего переходили ко второму этапу оценки устойчивости дамбы через k_s для любого периода времени. Для этого определяли область в суглинистом прослое, в которой величины $ssi \geq 8.3\%$. Вся область в суглинистом прослое, где выполняется условие $ssi \geq 8.3\%$, считается не способной более сопротивляться сдвигу, и в ней прочностные свойства $C = 0$ и $\phi = 0$. Следует отметить, что грунтов с нулевыми значениями прочности в природе не существуют. Тем самым, мы заведомо снижаем значение k_s .

На рисунке 4 представлено распределение ssi в теле дамбы и в основании на 2040 год. Наибольшие значения ssi сосредоточены в суглинистом прослое в основании под дамбой.

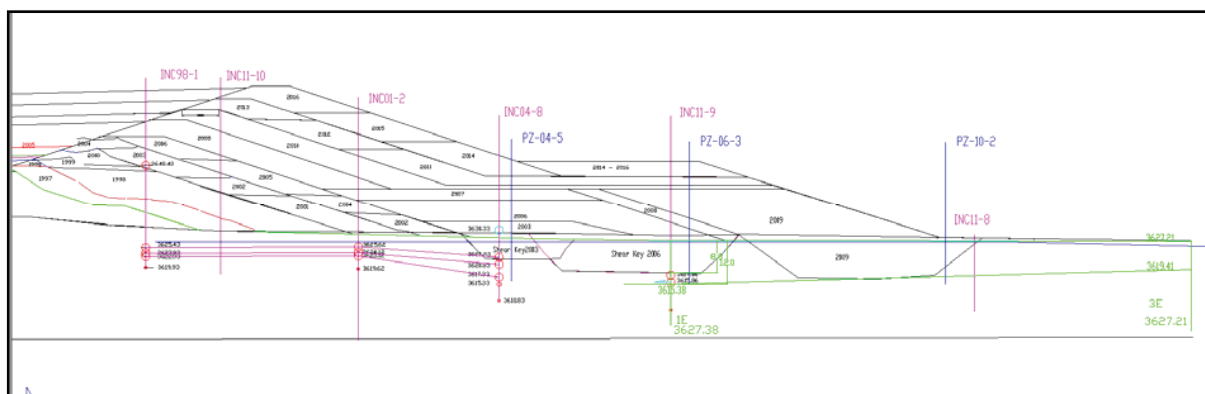


Рисунок 1 – Сечение дамбы и размещение инклинометров, пьезометров

Таблица 1 – Физико-механические свойства грунтов основания и тела дамбы

Материал	Местоположение	Плотность, ρ , т/м ³	Модуль Деформации, E, Па	Коэффициент Пуассона, ν	Сцепление, C, кПа	Угол внутреннего трения, ϕ°
Галечник	Тело дамбы, упорный клин, пригруз	2.10	$19 \cdot 10^6$	0.16	143	26
Грунт выше суглинистого прослоя, супесь	Основание	2.00	$3.27 \cdot 10^7$	0.3	0	35
Суглинистый прослой	Основание	1.91	$9 \cdot 10^6$	0.3	6.0	0
ИГЭ-3 (дно клина)	Основание	2.04	$20 \cdot 10^6$	0.16	99.0	33
Хвосты	Чаша хвостохранилища	1.887	$3.5 \cdot 10^7$	0.3	0	24

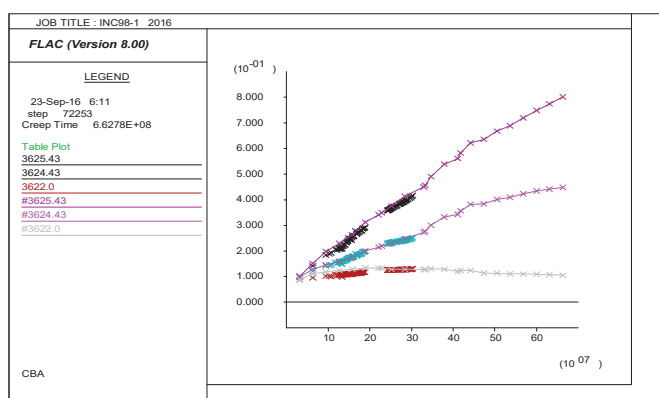


Рисунок 2 – Сопоставление результатов расчета с данными мониторинга за смещениями в INC98-1 и прогноз смещений

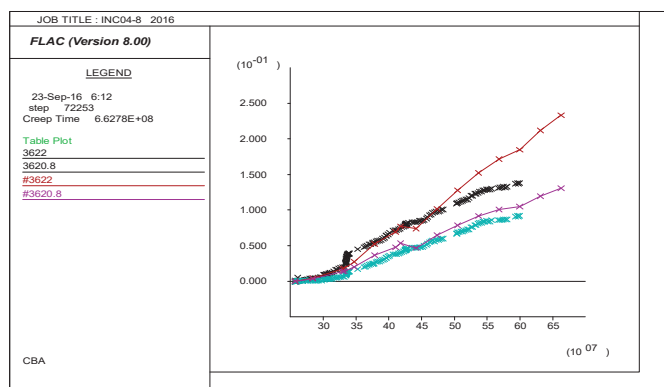


Рисунок 3 – Сопоставление результатов расчета с данными мониторинга за смещениями в INC04-8 и прогноз смещений

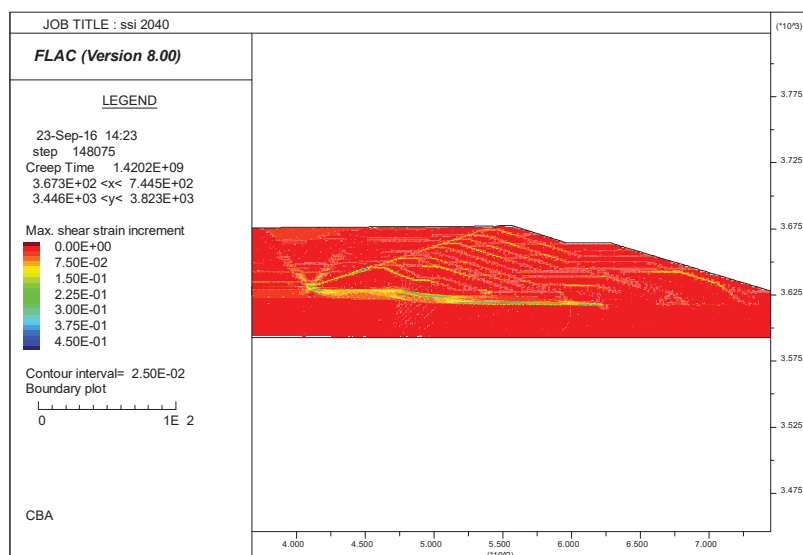


Рисунок 4 – Положение поверхности сдвига на 2040 г.

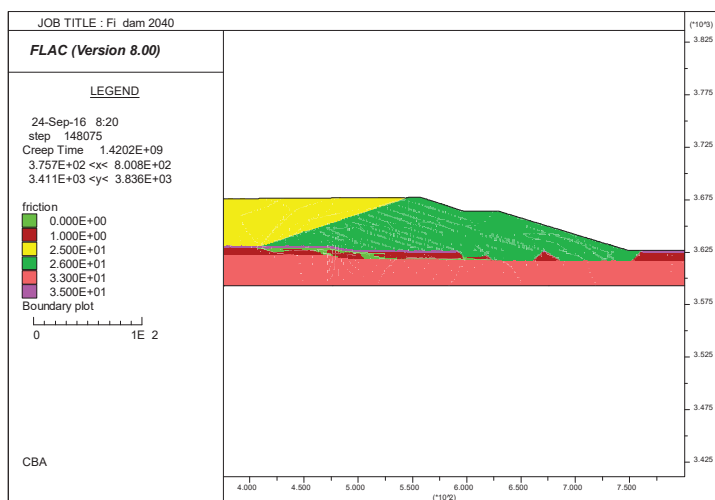


Рисунок 5 – Распределение значений ϕ , град. (2040 г.)

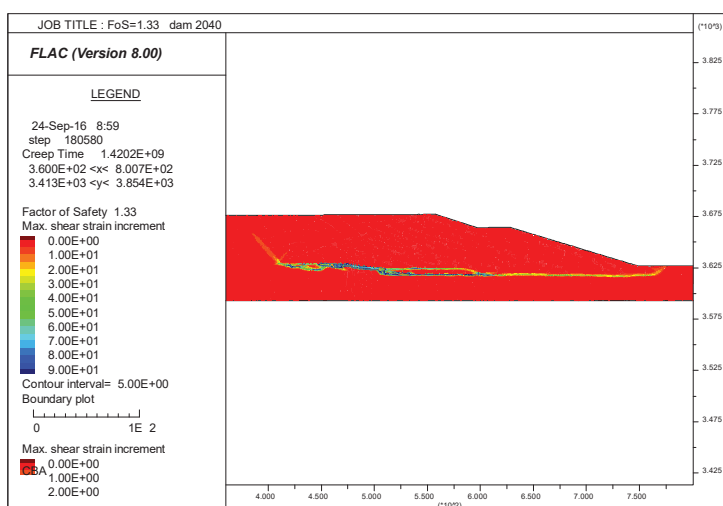


Рисунок 6 – Положение поверхности сдвига с минимальным значением коэффициента устойчивости $K_y = 1,33$

Результаты обнуления прочностных значений в суглинистом прослое представлены на примерах распределения ϕ (рисунок 5). В результате была получена модель с распределенными значениями прочности с учетом реологических процессов.

Для расчета коэффициента устойчивости использовали стандартную процедуру, реализованную в программе FLAC.

Расчеты устойчивости дамбы показали, что условие (2) обеспечивается, так как расчетное значение $K_y=1,33$ (рисунок 6) больше нормативного для сооружения II класса ($k_s=1,20$).

Выводы. Выполнено обоснование надежности и безопасности дамбы хвостохранилища ЗИФ рудника Кумтор на основе расчетов НДС системы «сооружение-основание» с применением численных методов механики сплошной среды с учетом реальных свойств материалов и пород оснований.

Оценка устойчивости дамбы хвостохранилища ЗИФ рудника Кумтор выполнена с учетом данных мониторинга и численного моделирования реологических процессов.

Моделирование показало, что принятые меры по удалению слабого суглинистого прослоя в основании дамбы и его замена на более прочные себя оправдывают. Деформации контрольных точек, расположенных в основании и теле дамбы, носят затухающий характер, т. е. выполняется условие предельного состояния по второй группе.

В расчетах устойчивости дамбы учитывалось изменение прочностных свойств суглинистого прослоя от деформаций сдвига. Расчеты устойчивости показали, что значения коэффициентов устойчивости во всех случаях превышают нормативное значение для ГТС II класса.

Поступила: 30.05.22; рецензирована: 13.06.22; принята: 15.06.22.

Литература

1. Межгосударственные строительные нормы. Гидротехнические сооружения. Основные положения. МСН 3.04-01-2005. 43 с. URL: <https://www.scribd.com/document/527080528/Mch-3-04-01-2005-%D0%93%D0%B8%D0%B4%D1%80%D0%BE%D1%82%D0%B5%D1%85%D0%BD%D0%B8%D1%87%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%B8%D0%B5-%D0%A1%D0%BE%D0%BE%D1%80%D1%83%D0%B6%D0%B5%D0%BD%D0%B8%D1%8F> (дата обращения: 01.05.2022).
2. Norton F.H. The creep of steel at high temperatures / F.H. Norton // McGraw-Hill. New York, NY, 1929. 110 p. URL: https://openlibrary.org/books/OL23291700M/The_creep_of_steel_at_high_temperatures (дата обращения: 01.05.2022).