

УДК 624.131.37+624.131.54

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ДАМБЫ
ХВОСТОХРАНИЛИЩА
НА ЭТАПЕ ЕЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ
С УЧЕТОМ РЕОЛОГИЧЕСКИХ СВОЙСТВ
ГРУНТОВ ОСНОВАНИЯ**

Коршунов А.А.

*Северный (Арктический) федеральный университет,
г. Архангельск, Россия*

В статье представлены результаты изучения реологических свойств песчано-глинистых промышленных отходов. Установлены основные зависимости изменения параметров ползучести. Выполнено численное моделирование работы ограждающей дамбы с использованием реологической модели Soft Soil Creep в программе PLAXIS. Определены параметры ползучести, оказывающие наибольшее влияние на коэффициент запаса устойчивости дамбы. Оценена надежность дамбы в краткосрочном и долгосрочном прогнозе с учетом реологических свойств основания.

The article deals with the results of a study of the rheological properties of the sandy-clay industrial wastes. The key relationships of changing rheological properties are presented. The numerical simulation of the dam with use of Soft Soil Creep model is implemented in PLAXIS. The parameters of the creep with the greatest impact on the safety factor of the dam are obtained. The reliability of the dam in the short and long-term period is assessed.

Освоение месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова, разрабатываемого в Архангельской области, предусматривает устройство специальных накопителей промышленных отходов, так называемых хвостохранилищ. Одним из основных инженерных сооружений хвостохранилища является многоярусная ограждающая дамба (рис. 1), выполненная насыпным способом. В процессе эксплуатации хвостохранилища выполнялось постепенное наращивание ограждающей дамбы, и осуществлялся намыв отходов обогащения кимберлитовых руд на ее верховой откос. Отходы обогащения в виде песчано-глинистых грунтов со специфическими физическими и механическими свойствами сформировали основание для 2-го и последующих ярусов сооружения. Учитывая длительные сроки эксплуатации и степень ответственности сооружения, специфические свойства отходов обогащения и их изменение во времени, оценка состояния (надежности) ограждающей дамбы с учетом реологических свойств основания является актуальной задачей.

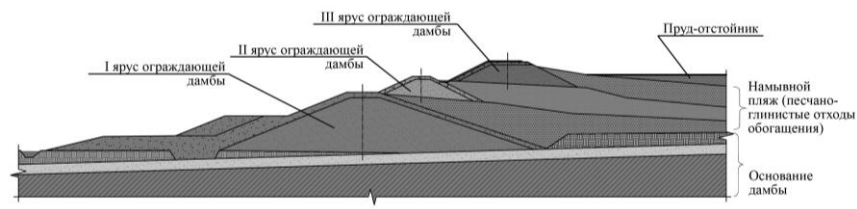


Рис. 1. Поперечный разрез по ограждающей дамбе

Одним из проявлений реологических свойств является ползучесть – процесс развития деформаций во времени при постоянной нагрузке. В качестве параметров ползучести используют коэффициент первичной (C_v) и вторичной консолидации (C_α). Первый параметр характеризует сжимаемость грунтов на фазе фильтрационной консолидации, второй — деформируемость скелета грунта во времени при постоянной нагрузке [1]. Заметим, что уже на этапе фильтрационной консолидации проявляются деформации ползучести.

Коэффициент вторичной консолидации определяли по результатам компрессионных испытаний при полном водонасыщении образцов песчано-глинистых отходов обогащения и в условиях двухстороннего дренирования на автоматизированных комплексах LoadTrac-II (рис. 2).



Рис. 2. Автоматизированная система LoadTrac-II для проведения компрессионных испытаний

Образец имел следующие размеры: диаметр – 73 мм, высота – 20,85 мм. При испытаниях прикладывали нормальное давление (300 кПа), которое соответствует характерному давлению на песчано-глинистые отложения при эксплуатации ограждающей дамбы. Для вычисления времени начала вторичной фильтрационной консолидации, соответствующего 100 % консолидации образца, строили кривую консолидации в координатах: относительная деформация (ε) – время (t , мин), откладываемое на логарифмической шкале. По пересечению двух касательных: к участку кривой первичной консолидации и к конечному линейному участку кривой, определили точку начала вторичной консолидации (рис. 3).

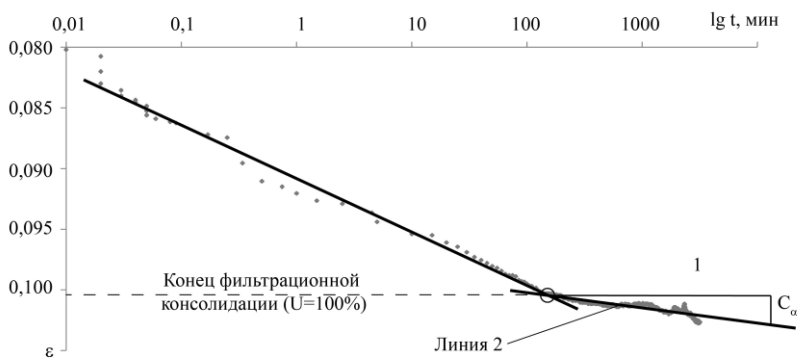


Рис. 3. Определение фильтрационного этапа консолидации образца при нормальном давлении 300 кПа

Коэффициент вторичной консолидации определяли как тангенс угла между линейным отрезком кривой на участке вторичной консолидации (линия 2, см. рис. 3) и прямой, параллельной оси абсцисс.

Коэффициент вторичной консолидации вычислили по результатам испытаний 12 образцов песчано-глинистых отложений, имеющих разные начальные коэффициенты пористости. Начальный коэффициент пористости изменялся в пределах от 0,72 до 0,91. Данный интервал включает все значения коэффициента пористости, полученные по результатам лабораторных испытаний песчано-глинистых отложений при проведении геотехнического контроля ограждающей дамбы хвостохранилища [3, 4].

На основе исследований установлена линейная зависимость между начальным коэффициентом пористости e_0 и C_α :

$$C_\alpha = 4,3937 - 0,9789e_0 \cdot 10^{-3}. \quad (1)$$

Зависимость коэффициента вторичной консолидации от начального коэффициента пористости при постоянном давлении 300 кПа представлена на рис. 4.

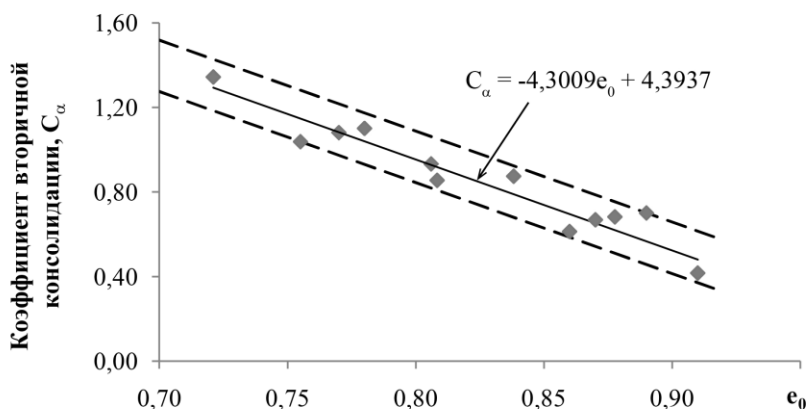


Рис. 4. Зависимость коэффициента вторичной консолидации от начального коэффициента пористости

Исследования процесса деформирования песчано-глинистых отложений во времени показали, что первичная консолидация завершается в течение 100–150 мин после приложения нормального давления. В связи с тем, что период первичной консолидации значительно меньше рассматриваемого периода вторичной консолидации (5000–6000 мин), актуальным является определение коэффициента компрессии (C_c), характеризующего деформируемость отложений под нагрузкой.

Для определения коэффициента компрессии на образец прикладывали нормальные давления 12,5; 25; 50; 100; 200; 300 кПа, выдерживая до условной стабилизации деформаций образца.

Коэффициент компрессии C_c определили для каждого значения начального коэффициента пористости полулогарифмическим методом путем построения аппроксимирующей прямой на прямолинейном участке зависимости коэффициента пористости от логарифма нормального давления (рис. 5). Зависимость коэффициента компрессии от начального коэффициента пористости для промышленных отходов представлена на рис. 6.

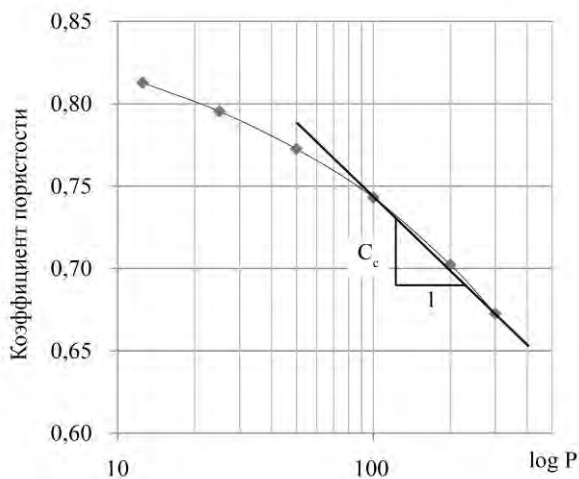


Рис. 5. К определению коэффициента компрессии C_c

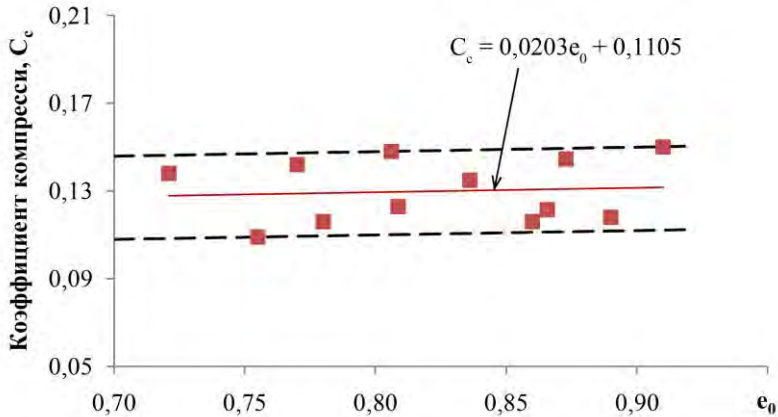


Рис. 6. Зависимость коэффициента компрессионности от начального коэффициента пористости

По результатам исследований получена линейная зависимость между начальным коэффициентом пористости e_0 и C_c :

$$C_c = 0,0203 \cdot e_0 + 0,1105. \quad (2)$$

Для оценки надежности ограждающей дамбы с учетом реологических свойств основания использован программно-вычислительный комплекс PLAXIS 2D 2012 с численной моделью Soft Soil Creep. Основными параметрами модели ползучести грунта являются: модифицированный коэффициент компрессионности (modified compression index) λ^* , модифицированный коэффициент рекомпрессионности (modified swelling index) κ^* , модифицированный коэффициент вторичной консолидации (modified creep index) μ^* . Первые два параметра определяются по кривой консолидации в координатах: относительная деформация (ϵ) – натуральный логарифм нормального давления ($\ln P$), при этом коэффициент κ^* вычисляется при повторном нагружении образца после разгрузки. Коэффициент μ^* определяется по кривой консолидации в координатах: относительная деформация (ϵ) – натуральный логарифм времени ($\ln t$).

В качестве альтернативных параметров PLAXIS использует коэффициент компрессионности (C_c), коэффициент рекомпрессионности (C_r), ин-

декс вторичной консолидации (C_α'). Индекс C_α' определяется по кривой консолидации в координатах: коэффициент пористости (e) – логарифм времени ($\lg t$) и может быть вычислен путем умножения коэффициента вторичной консолидации (C_α) на $(1 + e_0)$. Альтернативные параметры связаны с основными характеристиками ползучести следующими выражениями[6]:

$$\lambda^* = \frac{C_c}{2,3 \ 1+e}; \quad (3)$$

$$\kappa^* = \frac{2}{2,3} \cdot \frac{C_r}{1+e}; \quad (4)$$

$$\mu^* = \frac{C_\alpha'}{2,3 \ 1+e}. \quad (5)$$

По результатам геотехнического контроля за качеством намыва хвостовых отложений установлено, что среднее значение коэффициента пористости песчано-глинистых отложений составило 0,86. Параметры C_c и C_α соответствующие установленному коэффициенту пористости представлены в табл. 1.

В виртуальной лаборатории PLAXIS были смоделированы одометрические испытания с принятыми по табл. 1 коэффициентами. Результаты представлены на рис. 7, а. Как видно, кривая консолидации, построенная по результатам моделирования отличается от кривой, полученной по результатам лабораторных испытаний. Для корректного моделирования поведения песчано-глинистых отходов обогащения в основании 2 и 3-го ярусов дамбы необходимо провести оптимизацию параметров численной модели Soft Soil Creep по данным лабораторных испытаний.

Оптимизация параметров выполнена в виртуальной лаборатории PLAXIS по следующим параметрам λ^* , μ^* , а также c – удельному сцеплению и φ – углу внутреннего трения. Зависимость $\varepsilon = f(t)$ после оптимизации практически полностью совпадает с кривой консолидации, построенной по данным лабораторных испытаний (рис 7, б).

Коэффициенты C_c и C_α
песчано-глинистых отложений при $e_0 = 0,86$

Значение	C_c	$C_\alpha \times 10^3$
Среднее	0,128	0,695
Минимальное	0,111	0,586
Максимальное	0,149	0,830

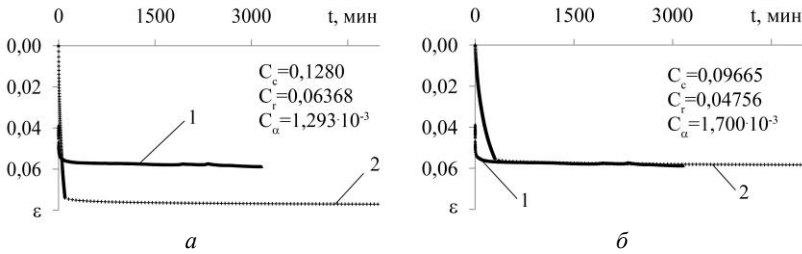


Рис. 7. Зависимости $\varepsilon = f(t)$ при выполнении оптимизации модели:

a – до оптимизации; *б* – после оптимизации;

1 – результаты лабораторных испытаний; 2 – результаты испытаний в виртуальной лаборатории PLAXIS;

Для оценки напряженно-деформированного состояния ограждающей дамбы и определения коэффициента ее устойчивости было выполнено моделирование методом конечных элементов в программном комплексе PLAXIS 2D (рис. 8). Для моделирования грунтов основания и тела дамбы, кроме реологической модели (Soft Soil Creep), использована модель упрочняющего грунта (Hardening soil). Параметры модели определены по результатам геотехконтроля за процессами возведения, наращивания и эксплуатации ограждающей дамбы.

Моделировались следующие процессы:

- 1) возведение пионерной (1-го яруса) ограждающей дамбы и намыв хвостовых отложений;
- 2) наращивание 2-го яруса и намыв хвостовых отложений;
- 3) наращивание 3-го яруса и намыв хвостовых отложений;
- 4) оценка надежности дамбы через 1 год и 15 лет ее эксплуатации после завершения наращивания 3-го яруса

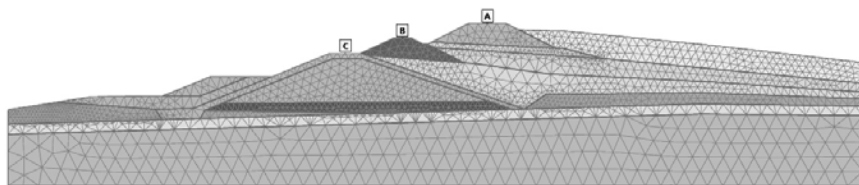


Рис. 8. Конечно-элементная модель ограждающей дамбы

Расчеты устойчивости дамбы, выполненные на этапе эксплуатации после завершения наращивания 3-го яруса дамбы показали, что коэффициенты запаса устойчивости составили 1,369 и 1,373 через 1 год и 15 лет соответственно.

На значение коэффициента устойчивости дамбы оказывают влияние различные параметры численной модели, оценка степени влияния таких параметров на безопасность представляет актуальную задачу в плане планирования и проведения дополнительных исследований грунтов и песчано-глинистых отходов обогащения.

В программе PLAXIS выполнено сопоставление параметров модели Soft Soil Creep по степени влияния на безопасность в краткосрочной и долгосрочной перспективах. Коэффициенты λ^* , μ^* варьировали для песчано-глинистых отложений, намывных на откос 1-3 ярусов ограждающей дамбы. Распределение по степени влияния λ^* , μ^* на коэффициент устойчивости представлено на рис. 9 и в табл. 2. Для дальнейшего анализа выбраны 4 параметра: λ^* – для хвостовых отложений 2 и 3 ярусов; μ^* – для отложений 1 и 2 ярусов, максимально влияющих на коэффициент запаса устойчивости.

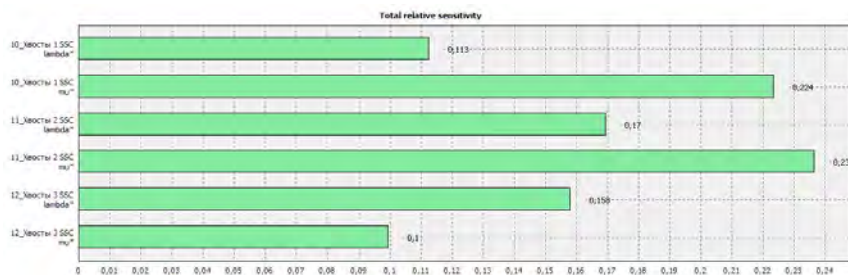


Рис. 9. Степень влияния λ^* , μ^* на коэффициент устойчивости дамбы

Степень влияния λ^* , μ^* на коэффициент устойчивости дамбы

Песчано-глинистые отложения, намытые на откос	Коэффициенты	Относительная чувствительность
1-го яруса	λ^*	0,1128
	μ^*	0,2236
2-го яруса	λ^*	0,1695
	μ^*	0,2366
3-го яруса	λ^*	0,1580
	μ^*	0,0995
		1,0000

Примечание. Наибольшее значение соответствует максимальному влиянию на коэффициент устойчивости.

В PLAXIS выполнено моделирование дамбы при таких сочетаниях коэффициентов λ^* , μ^* , которые позволили вычислить максимальный и минимальный коэффициенты запаса устойчивости с учетом заданного варьирования реологических свойств песчано-глинистых отложений. Максимальный коэффициент запаса через 15 лет эксплуатации составил 1,375, минимальный – 1,348 (рис. 10).

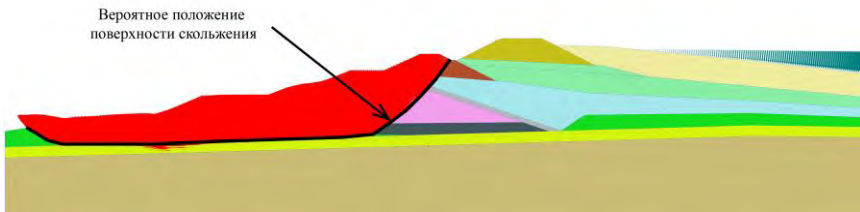


Рис. 10. Вероятный механизм потери устойчивости дамбы с учетом реологических свойств песчано-глинистых отходов обогащения через 15 лет эксплуатации.

Выводы. При использовании численных моделей грунта Soft Soil Среер в PLAXIS необходимо выполнять адаптацию модели по результатам лабораторных испытания. Так, установлено, что первоначальные параметры численной модели изменились: C_c уменьшился

на 24,5 %, C_α увеличился на 31,5 % и составили 0,10 и $1,70 \times 10^{-3}$ соответственно.

Моделирование возведения, наращивания и эксплуатации ограждающей дамбы с учетом варьирования реологических характеристик грунтов основания, полученных по результатам лабораторных испытаний, является целесообразным. Это позволяет получить качественную и количественную оценку изменения коэффициентов устойчивости во времени, а также установить пределы их варьирования в зависимости от исходных реологических свойств грунтов.

Применение такого подхода при моделировании позволит оценить влияние различных факторов (например, деформационно-прочностных и фильтрационных свойств) независимо друг от друга на безопасность ограждающей дамбы.

Литература

1. Вялов, С.С. Реологические основы механики грунтов : учеб. пособие для строительных вузов. – М. : Высш. школа, 1978. – 447 с. : ил.

2. Грунты. Методы лабораторного определения характеристик прочности и деформируемости : ГОСТ 12248-2010. – Взамен ГОСТ 12248-96 и ГОСТ 24143-80 ; введ. 2011-01-01. – М. : МНТКС: Изд-во стандартов, 2010. – 162 с.

3. Результаты геотехнического контроля строительства и эксплуатации ограждающей дамбы хвостохранилища / А.Л. Невзоров [и др.] // Надежность и долговечность строительных материалов, конструкций, оснований и фундаментов : матер. V междунар. науч.-техн. конф. – Волгоград : ВолгГАСУ, 2009. – Ч. III. – С. 94–100.

4. Nevzorov, A. Results of geotechnical monitoring for the erection and operation of the tailing dam at the diamond deposit named after M.V. Lomonosov / A. Nevzorov, V. Koptyev, A. Korshunov : Proceedings of the 15th European conference on Soil Mechanics and Geotechnical engineering, ISSMGE, Athens, Greece. – P. 1177–1184.

5. V.N.S. Murthy Geotechnical Engineering: principles and practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering/ V.N.S. Murthy-Marcel Dekker Inc. –NY, 2003. – 1029 p.

6. User Guide Plaxis 2D 2012, Plaxis bv, Netherlands, 2012.