ISSN 2413–9858

Научная статья
УДК 624.132.3:624.042.8:519.63

ПАРАМЕТРЫ МОДЕЛИ ПОЛЗУЧЕСТИ КАМЕННОЙ НАБРОСКИ ДЛЯ РАСЧЁТОВ НАПРЯЖЁННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ

М.П. Саинов[1,*], А.А. Зузов[2]

[1] Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет, Москва, Россия
[2] Национальный исследовательский университет «МЭИ», Москва, Россия
* E-mail: SainovMP@mgsu.ru

Аннотация. Большая доля деформаций грунтовых плотин происходит за счёт ползучести, однако при расчётах напряжённо-деформированного состояния (НДС) этот важный фактор часто не учитывают. Анализ публикаций показал, что при расчётах плотин из каменной наброски используют простые модели ползучести, которые не всегда адекватно воспроизводят деформирование грунта во времени. В нашем исследовании для воспроизведения упругопластического поведения каменно-набросной плотины была применена модель ползучести Кельвина-Максвелла в сочетании с моделью Кулона-Мора. Для численного моделирования НДС был использован программный комплекс MIDAS. Объектом исследования явилась каменно-набросная плотина Tianshengqiao-I (Китай) высотой 178 м. Для оценки адекватности моделирования НДС были использованы данные натурных измерений деформаций этой плотины. Сравнение показало, что использование модели Кельвина-Максвелла позволяет хорошо отразить характер изменения деформаций плотины во времени.

Ключевые слова: *каменно-набросная плотина; железобетонный экрано; напряжённо-деформированное состояние; ползучесть; реология; осадки; период эксплуатации.*

Для цитирования: Саинов М.П., Зузов А.А. Параметры модели ползучести каменной наброски для расчётов напряжённо-деформированного состояния грунтовой плотины // *Вестник науки и образования Северо-Запада России*. 2025. Т. 11. № 3. С. 45–56.

Original article

PARAMETERS OF THE CREEP MODEL OF A ROCKFILL FOR CALCULATIONS OF THE STRESS-STRAIN STATE OF AN EMBANKMENT DAM

M.P. Sainov[1,*], A.A. Zuzov[2]

[1] Moscow State University of Civil Engineering (National Research University), Moscow, Russia
[2] National Research University «Moscow Power Engineering Institute», Moscow, Russia
* E-mail: SainovMP@mgsu.ru

Abstract. A large proportion of deformations of embankment dams occurs due to creep, but this important factor is often not taken into account when calculating the stress-strain state (SSS). An analysis of publications showed that simple creep models are used when calculating rockfill dams, which do not always adequately reproduce soil deformation over time. In our research, the

© Саинов М.П., Зузов А.А. 2025

Kelvin-Maxwell creep model in combination with the Coulomb-Mohr model was used to reproduce the elastic-plastic behavior of the rockfill dam. The MIDAS software package was used for numerical modeling of the SSS. The object of the research was the Tianshengqiao-I rockfill dam (China) with a height of 178 m. To assess the adequacy of the SSS modeling, data from experimental measurements of deformations of this dam were used. The comparison showed that the use of the Kelvin-Maxwell model allows for a fairly adequate description of the nature of changes in dam deformations over time.

Keywords: *concrete face rockfill dam; stress-strain state; creep; rheology; settlement; period of operation.*

For citation: Sainov M.P., Zuzov A.A. Parameters of the creep model of a rockfill for calculations of the stress-strain state of an embankment dam. *Journal of Science and Education of North-West Russia*. 2025. Vol. 11, No. 3, pp. 45–56.

Введение

Деформации ползучести могут иметь существенное значение для безопасности грунтовых плотин – оно может привести к недопустимым отклонениям конструкции плотины от проектной. По этой причине СП 39.13330.2012 Плотины из грунтовых материалов устанавливает, что при расчётах плотин I и II классов ответственности расчет осадок и их изменения во времени должен выполняться с учётом ползучести грунта.

Проявление ползучести при деформировании под нагрузкой характерно не только для мелкозернистых грунтов, но и для каменной наброски. Деформации ползучести в каменной наброске могут протекать длительное время. Например, известно, что деформации каменно-набросной плотины Paradela (Португалия) продолжались нескольких десятилетий в период в эксплуатации [1]. Именно длительные высокие деформации каменной наброски послужили одной из причин приостановки применения каменно-набросных плотин с железобетонным экраном в середине XX в., т.к. железобетонный экран очень восприимчив к деформациям насыпи [2].

В современных каменно-набросных плотинах достигается более качественное уплотнение каменного материала, поэтому деформации ползучести проявляются меньше. Например, осадки самой высокой в мире каменно-набросной плотине Shuibuya (Китай) практически стабилизировались через 3 года после завершения строительства, прирост максимальных осадок за год составил менее 5 см [3].

Но и деформации ползучести каменной наброски в период строительства также могут имеет большое значение для трещиностойкости железобетонного экрана, т.к. эти именно в этот период они протекают наиболее интенсивно. С деформациями ползучести связывают повреждение железобетонного экрана каменно-набросной плотины Tianshengqiao-I в Китае, в котором образовалась система горизонтально и вертикально ориентированных нарушений сплошности (трещин) [4, 5].

Поэтому изучение влияния реологических процессов в каменной наброске на напряжённо-деформированное состояние и безопасность каменно-набросных плотин уже много десятилетий сохраняет свою актуальность. Имеется ряд современных публикаций, посвящённых численному моделированию поведения каменно-набросных плотин с учётом ползучести [3, 4, 6-11]. В основном эти публикации выполнены китайскими учёными, т.к. в этой стране ведётся широкомасштабное строительство каменно-набросных плотин. В статьях [3, 8] описаны результаты исследований самой высокой плотины с железобетонным экраном Shuibuya, а статьи [4, 7] посвящены исследованиям напряжённо-деформированного состояния (НДС) плотины Tianshengqiao-I.

Проблема деформаций ползучести актуальна и для других типов плотин из каменной наброски, поэтому мы поставили себе цель подобрать такую математическую модель ползучести и её параметры, которые бы позволяли адекватно воспроизвести поведение реальной каменно-набросной плотины во времени.

В качестве объекта исследования была выбрана плотина Tianshengqiao-I, т.к. по этой сверхвысокой плотине опубликованы данные натурных измерений. Повышенный интерес к этой плотине вызван произошедшими на ней аварийными ситуациями, которые заключались в нарушении целостности железобетонного экрана.

Каменно-набросная плотина Tianshengqiao-I была построена в 1996-1999 гг. на реке Nanpan (Китай). Её высота составляет 178 м, длина по гребню – 1104 м [4]. Плотина имеет очень обжатый профиль – заложение верхового откоса составляет 1,4, низового – 1,25 (без учёта ширины берм) (рис.1).

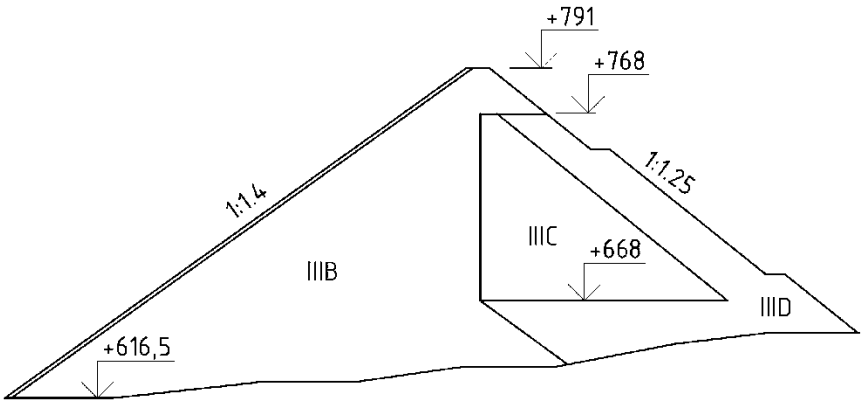


Рисунок 1 – Схема строения профиля плотины Tianshengqiao-I (Китай).
IIIB – каменная наброска известняка крупностью до 800 мм, IIIC – наброска аргиллитов и песчаников из полезных выемок, IIID – наброска известняка крупностью до 1600 мм

В железобетонном экране Tianshengqiao-I происходило образование целой системы горизонтальных и вертикальных трещин. Горизонтальные трещины образовались в строительный период в тех частях экрана, которые соответствует верхней, пригребневой зоне каждой из трёх очередей плотины. После наполнения водохранилища через 3-4 лет эксплуатации в экране образовались также и вертикальные трещины [5].

В этой связи интерес представляет изучение деформаций каменно-набросной этой плотины, которые привели к разрушению бетона экрана.

Данные натурных измерений деформаций плотины Tianshengqiao-I отражены в публикации [4]. Датчики осадок были установлены на 5 ярусах по высоте. Самый верхний ярус составляет датчик, установленный на гребне плотины. По результатам измерений максимальная строительная осадка плотины составила около 320 см (рис.2), что составляет примерно 1,8% от высоты плотины.

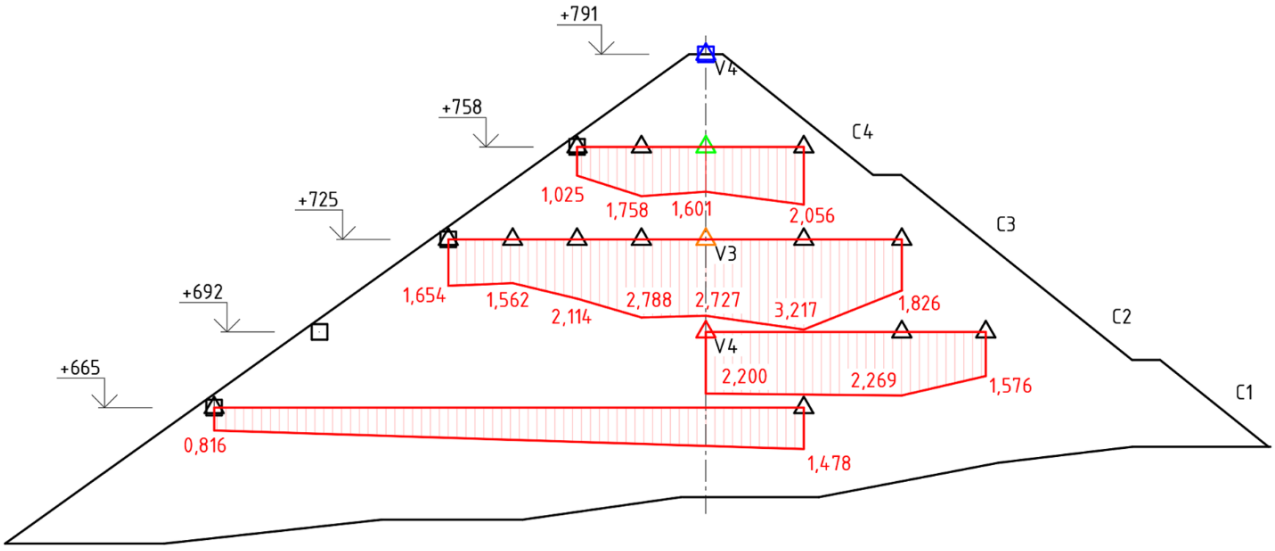


Рисунок 2 – Осадки точек плотины Tianshengqiao-I в августе 1999 г.

С целью изучения причин образования трещин в экране китайскими учёными выполнялись исследования НДС плотины Tianshengqiao-I путём численного моделирования. Их результаты отражены в публикациях [4, 7, 12, 13].

В этих исследованиях для моделирования нелинейного поведения каменной наброски использовалась гиперболическая модель Дункана-Чанга (вариант EB). Эта модель позволяет учитывать эффект «упрочнения» грунта при увеличении бокового обжатия, также повышения деформируемости грунта по мере снижения сдвиговой прочности.

В [12] было показано, что образование в железобетонном экране плотины Tianshengqiao-I горизонтальных трещин связано с последовательностью возведения сооружения очередями. Трещины образовались из-за повышенных прогибов экрана в пригребневой зоне каждой из очередей. Позже китайскими учёными были проведены более сложные исследования, в пространственной постановке [7, 13].

Особый интерес представляют исследования [4] и [7], которые проводились с учётом ползучести каменной наброски. В них использовалась эмпирическая модель ползучести, основанная на механической схеме W.Merchant. В модели принято экспоненциальное ядро ползучести, а скорость объёмных и сдвиговых деформаций выражается через константу и стабилизированные значения деформаций. Всего модель насчитывает 5 параметров.

Мы решили повторить исследование НДС каменно-набросной плотины с учётом ползучести, но с использованием другой реологической модели грунта.

Цель статьи – показать, что изменение во времени деформаций ползучести каменно-набросной плотины может быть смоделировано с помощью эмпирической реологической модели, встроенной в лицензионный программный комплекс. Задачей исследования является подбор параметров реологической модели для каменной наброски.

Материалы и методы

Изучение НДС каменно-набросной плотины Tianshengqiao-I с учётом ползучести наброски выполнялось путём численного моделирования методом конечных элементов. Для расчётов применялся программный комплекс MIDAS, который предоставляет возможность использовать несколько нелинейных моделей материалов.

В этом программном комплексе учёт ползучести может быть осуществлён в рамках модели Кулона-Мора. Это самая простая модель грунта, которая соответствует идеально пластическому деформированию, однако именно в рамках этой модели программный комплекс MIDAS даёт возможность выполнять расчёты с учётом ползучести.

Для описания ползучести используется модель Кельвина-Максвелла, которая позволяет воспроизвести как затухающий, так и не затухающий характер нарастания деформаций во времени (т.н. первичную и вторичную фазы ползучести). При расчётах имеется возможность использовать несколько вариантов функциональных зависимостей между деформацией ε, напряжением σ и временем t.

В расчётах была использована наиболее полная функциональная зависимость следующего вида

$$\varepsilon = a \cdot \sigma^b \, [\, 1 - exp(-c \cdot \sigma^d \cdot t)] + e \cdot exp(f \cdot \sigma) \cdot t,$$

где a, b, c, d – эмпирические параметры для описания затухающей ползучести, e, f – эмпирические параметры для описания незатухающей ползучести.

Как видим, для описания затухающих деформаций использовано экспоненциальное ядро ползучести.

Расчёты напряжённо-деформированного состояния (НДС) плотины выполнялись в плоской постановке для поперечного сечения плотины максимальной высоты. В конечно-элементной модели учитывалось только тело плотины, сложенное из каменной наброски, а наличие железобетонного экрана и деформируемость скального основания не учитывались. Конструкция плотины была разделена на 2562 твёрдотельных конечных элемента с линейной аппроксимацией перемещений внутри (рис.3).

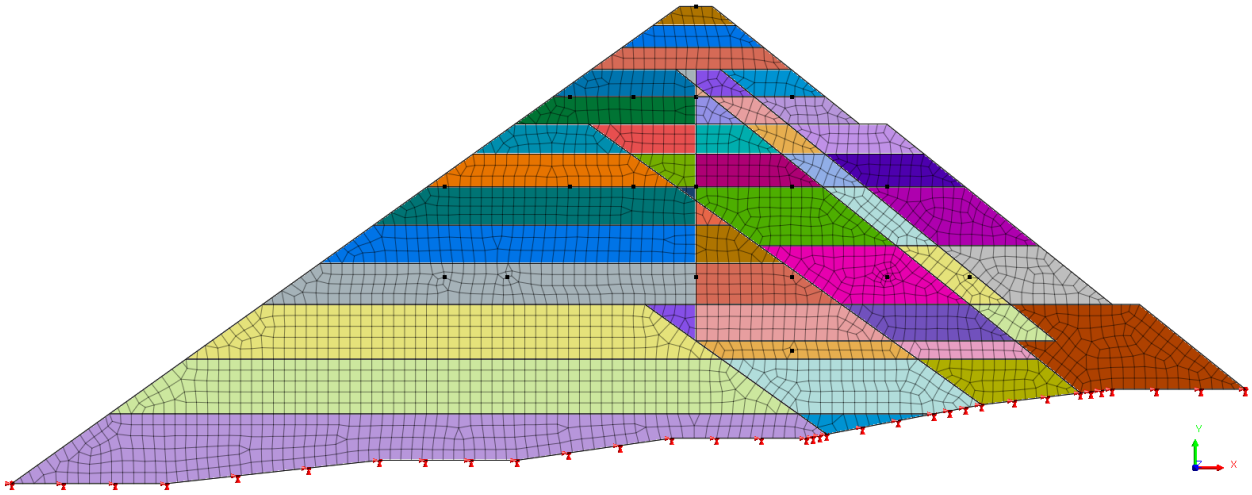


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель сечения плотины с выделением зон с разными свойствами и этапами возведения

При составлении конечно-элементной модели плотины учитывалось неоднородное строение насыпи. Проектом плотины предусматривалось, что в верховую часть профиля укладывалась горная масса известняка из карьера (максимальной крупностью 800 мм), а в низовую – горная масса аргиллитов и песчаников из полезных выемок. Низовой откос покрывался слоем каменной наброски известняка высокой крупности (до 1600 мм).

Расчёты НДС проводились на нагрузки от собственного веса и гидростатического давления на экран. Нагрузки прикладывались ступенями, сразу полностью и мгновенно на каждом из этапов расчёта.

При расчётах НДС воспроизводилась последовательность возведения плотины и наполнения водохранилища. Учитывалось, что плотина возводилась в четыре очереди с наращиванием в низовую сторону. Всего было рассмотрено 23 этапов отсыпки тела плотины и 13 этапов изменения уровня водохранилища, этапы изменения уровня перемежались с этапами отсыпки.

Удельный вес каменной наброски принимался в соответствии с данными [4]. Остальные параметры модели грунта определялись подбором из условия соответствия расчётных и натурных перемещений плотины. Полученные значения параметров деформируемости (модуль деформации E и коэффициент Пуассона ν) приведены в таблице 1, а подобранные параметры модели ползучести – в табл.2.

Таблица 1. Расчётные физико-механические свойства каменной наброски

Зоны профиля	удельный вес, кН/м^3	модуль деформации, МПа	коэффициент Пуассона
верховая зона	21,2	50	0,27
низовая зона	21,5	40	0,27
покрытие низовой откоса	20,5	40	0,27

Таблица 2. Расчётные параметры модели ползучести

Параметр	a	b	c	d	e	f
Значение	$2\cdot10^{-5}$	0,5	$1,5\cdot10^{-8}$	0,015	$1\cdot10^{-11}$	$1,5\cdot10^{-15}$

Расчёт НДС с учётом ползучести предусматривал рассмотрение множества интервалов времени моментов времени, относящихся как к периоду строительства, так и к периоду эксплуатации сооружения. Расчётный интервал (шаг) по времени составил 1 день. Всего было рассмотрено 3970 моментов времени, из них 1123 относятся к периоду строительства, когда происходит изменение нагрузок на сооружение. Начало расчёта соответствует январь 1996 г. Возведение плотины до гребня (∇791) было завершено в январе 1999 г., а наполнение водохранилища до ∇768 – в сентябре 1999 г. Далее рассматривался период эксплуатации общей продолжительностью 7 лет и 3 месяца.

Результаты и обсуждение

В результате расчётов было получено распределение перемещений и напряжений для ряда моментов времени строительного и эксплуатационного периодов. В этой статье показаны и проанализированы только перемещения (горизонтальные и вертикальные) сооружения.

На рис.4 и 5 показано распределение расчётных осадок и смещений тела плотины на момент окончания наполнения (август 1999 г.).

Строительные осадки плотины достигают своего максимума примерно в центре профиля (рис.4), что характерно для большинства грунтовых плотин. Максимальное значение осадки составило около 320 см, что соответствует результатам натурных измерений. По отношению к высоте плотины осадка составила 1,8%, что довольно много для современных каменно-набросных плотин [14] и свидетельствует о невысоком качестве уплотнения наброски.

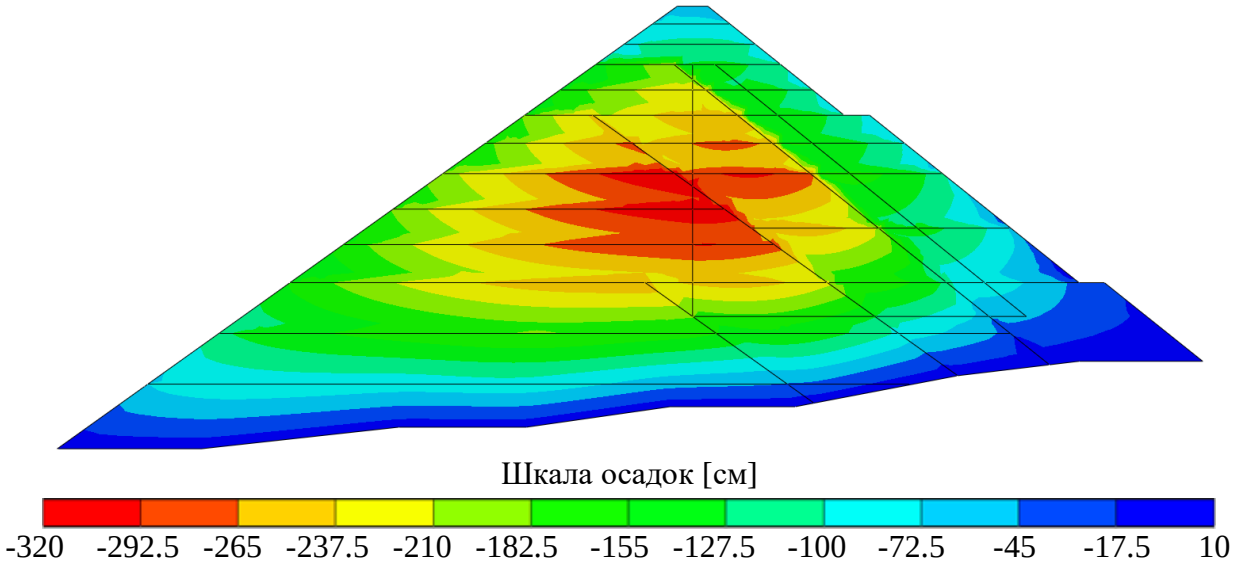


Рисунок 4 – Осадки плотины на август 1999 г. по результатам численного моделирования

Горизонтальные смещения большей части тела плотины направлены в сторону нижнего бьефа, за исключением нижней верховой части (рис.5). Своего максимума смещения в сторону нижнего бьефа достигают на границе третьей очереди строительства. Их максимальное значение составляет 155 см, т.е. примерно ½ от величины максимальных строительных осадок. Это достаточно высокие значения смещений учитывая то, что уровень верхнего бьефа (∇768 м) находится на 13 м ниже гребня плотины. Высокие значения смещений связаны со слишком обжатым профилем плотины и свидетельствуют о невысоком качестве уплотнения наброски.

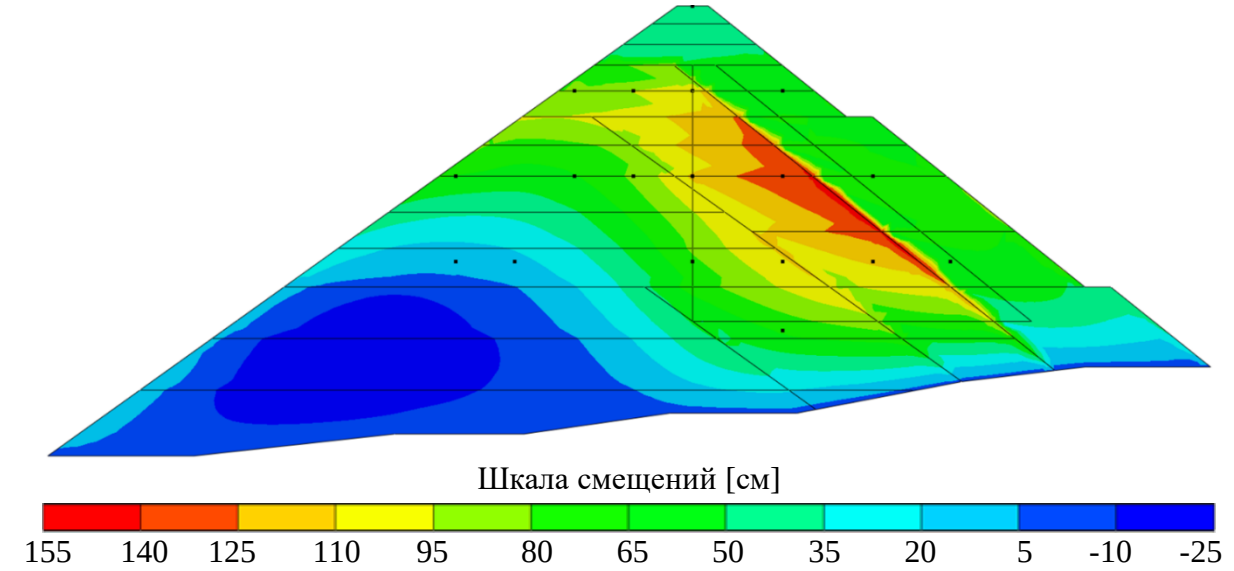


Рисунок 5 – Смещения плотины на август 1999 г. по результатам численного моделирования

На графиках рис.6 и рис.7 показано изменение во времени перемещений некоторых точек плотины. В этих точках имеются данные натурных измерений о накоплении перемещений во времени. Интервал времени охватывает строительный период и первые годы эксплуатации.

На рис.6 показаны осадки четырёх точек тела плотины, расположенных по оси плотины на разной высоте (∇692, ∇725, ∇758, ∇791). Начало отсчёта графиков соответствует моменту, в котором в процессе строительства профиль плотины достиг соответствующей отметки. Сравнение с данными натурных измерений, показывает, что в расчёте удалось хорошо отразить величины и характер изменения во времени осадок плотины.

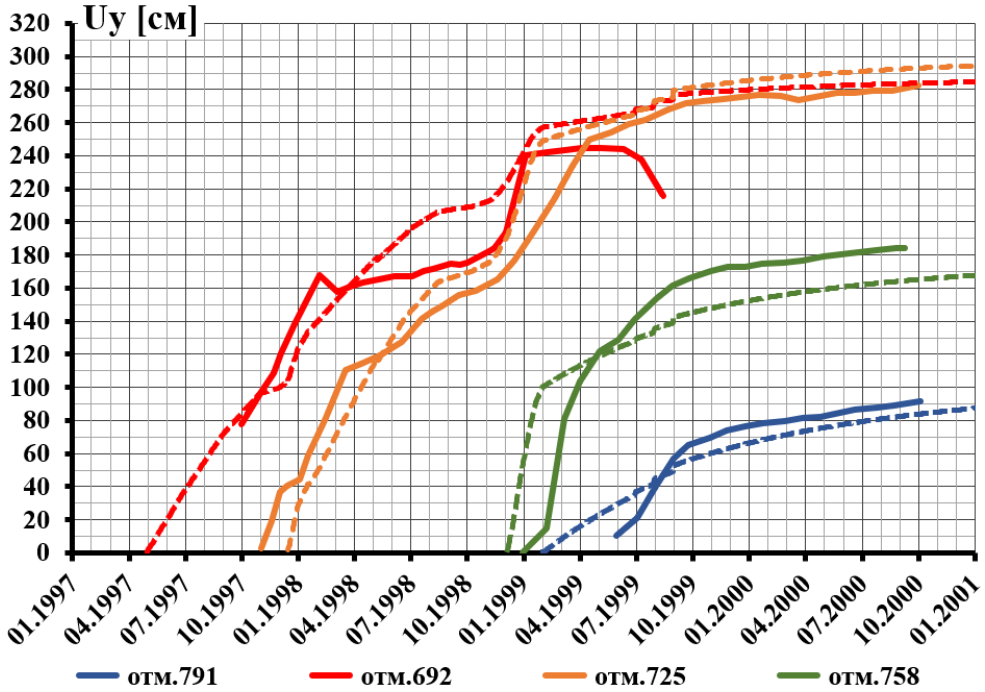


Рисунок 6 – Изменение осадок точек плотины во времени.
Сплошная линия соответствует натурным измерениям, пунктирная линия – результатам расчёта. На шкале времени даты соответствуют началу месяца

Самые высокие по величине осадки имеют точки, расположенные в нижней и средней части плотины и построенные раньше других (∇692, ∇725) (рис.6). Анализ показал, что в этих точках бóльшая часть осадок вызвана деформированием под действием внешних нагрузок, а не из-за ползучести каменной наброски. В эксплуатационный период осадки этих точек увеличиваются не более, чем 20 см за первые три года эксплуатации.

Напротив, в точках, расположенных в верхней части профиля (∇758, ∇791) (рис.6), бóльшая часть осадок вызвана ползучестью наброски, об этом свидетельствует непрекращающийся их рост после завершения наполнения водохранилища в августе 1999 г. Анализ показал, что на август 1999 г. 85% осадки гребня были вызваны ползучестью. После 7 лет эксплуатации осадка гребня увеличивается почти вдвое, примерно на 60 см.

Сравнение полученных нами графиков осадок, с теми, которые были получены китайскими учёными в [4], показывает, что нам удалось лучше отразить процессы деформирования плотины.

На рис.7 показано изменение во времени горизонтальных смещений гребня плотины. Основной вклад в них вносит ползучесть каменной наброски. На конец августа 1999 г. смещение гребня составило 40 см, а через 3 года эксплуатации превысило 65 см.

ISSN 2413–9858

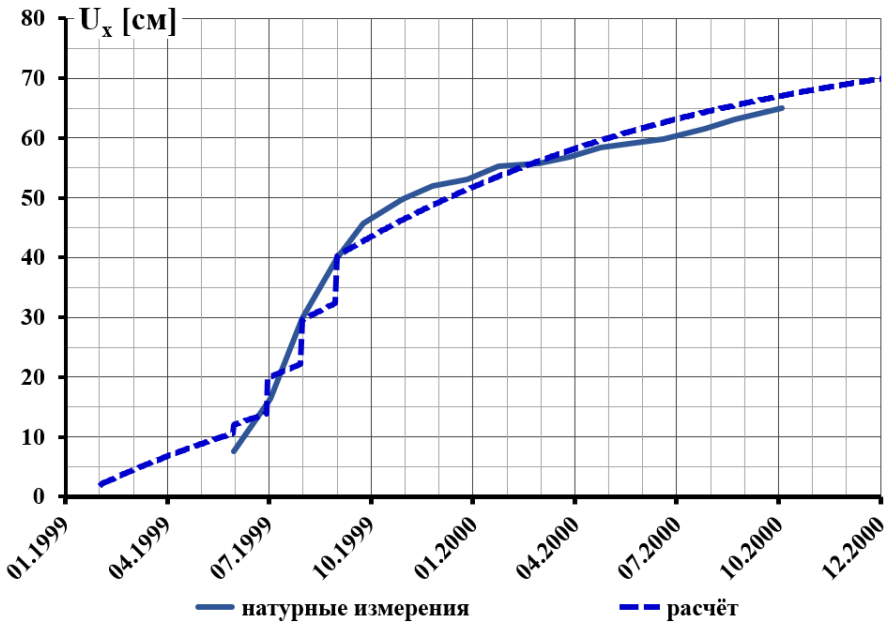


Рисунок 7 – Изменение смещения гребня плотины во времени.
На шкале времени даты соответствуют началу месяца

График смещений (рис.7), полученный нами, хорошо воспроизводит характер увеличения деформаций плотины, отличие составляет не более 4 см. У китайских учёных в [4] отличие расчётных и натурных смещений превышает 20 см. Это свидетельствует о преимуществах использованной нами реологической модели.

Следует отметить, что график смещений имеют незатухающий характер в первые годы эксплуатации, и выбранная модель ползучести хорошо его отражает.

Выводы

1. Рассмотренная в исследовании плотина Tianshengqiao-I имеет высокие деформации как в строительный, так и в эксплуатационный периоды, в формировании её напряжённо-деформированного состояния большую роль сыграли деформации ползучести. Повышенные деформации плотины связаны с несколькими факторами: излишне крутой низовой откос, использование в насыпи камня полускальных пород высокой крупности.

2. Использование эмпирической модели ползучести Кельвина-Максвелла в рамках простой модели пластического деформирования грунта Кулона-Мора позволило хорошо воспроизвести процессы деформирования плотины в строительный и эксплуатационный периоды. Близки к натурным как значения осадок, так и значений горизонтальных смещений. Этого удалось достичь благодаря тому, что модель Кельвина-Максвелла позволяет воспроизводить как затухающий, так и незатухающий характер ползучести. Применение этой модели, а также подобранных значений параметров модели может быть рекомендовано для моделирования других каменно-набросных плотин. Такую возможность предоставляет программный комплекс MIDAS.

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Pardo de Santayana F., Fortunato E., Pinto A.V. Behavior of Portuguese rockfill dams with upstream impervious membranes // Proceedings of the 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005-2006. C.1905-1908.

2. Саинов М.П., Юрьева Е.А. Конструкции каменно-набросных плотин с железобетонным экраном в исторической ретроспективе // Строительство уникальных зданий и сооружений. 2018. №9(72). С. 46-60.

3. Zhou W., Hua J., Chang X., Zhou C. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam // Computers and Geotechnics. 2011. No.38. P.269–280.

4. Zhang B. Wang J.G., Shi R. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer // Computers and Geotechnics. 2004. No.31. P.559–573.

5. Freitas M.S.Jr. Concepts on CFRDs leakage control – Cases and current experiences // ISSMGE Bulletin. 2009. Vol.3, No 4. P.11–18.

6. Gan L., Shen Z. Xu L. Long-term deformation analysis of the Jiudianxia concrete-faced rockfill dam // Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. No.39. P.1589–1598.

7. Zhou M., Zhang B., Jie Y. Numerical simulation of soft longitudinal joints in concrete-faced rockfill dam // Soils and Foundations. 2016. Vol. 56. No.3. P.379–390.

8. Zhou X., Sun X., Zheng J., Jiang H., Li Y., Li Z., Ma Z., Cao P., Zhan Q., Zhao Y. Long-term settlement of high concrete-face rockfill dam by field monitoring and numerical simulation // Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 1. P. 1-17.

9. Саинов М.П., Кириченко А.Ю. Влияние ползучести каменной наброски плотины на напряженно-деформированное состояние железобетонного экрана // Строительство: наука и образование. 2019. Т.9. Вып.1. Ст. 3.

10. Chen H., Zhang Y. Simulation of creep deformation of faced rockfill dam based on secondary development of ABAQUS. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 831(1). ID 012024.

11. Li J., Lu X., Chen J., Yang S., Kuang C., Yong Y., Hu K. Reliability-monitoring data coupled model for concrete slab safety evaluation of CFRD and its engineering application // Structures. 2022. No.35. P.520–530.

12. Zhang B., Shi R., Zhang Z. Contact analysis of separation between concrete slab and cushion layer in Tianshengqiao concrete-faced rockfill dam // International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2004. 26 [Electronic resource]. URL: https://scholarsmine.mst.edu/icchge/5icchge/session02/26 (access date: 06.06.2025).

13. Zhou M., Zhang B., Peng C., Wu Wei. Three-dimensional numerical analysis of concrete-faced rockfill dam using dual-mortar finite element method with mixed tangential contact constraints // International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2016. Vol. 40(15). [Electronic resource]. URL: https://doi.org/10.1002/nag.2524 (access date: 06.06.2025).

14. Сорока В.Б., Саинов М.П., Королев Д.В. Каменно-набросные плотины с железобетонным экраном: опыт исследований напряженно-деформированного состояния // Вестник МГСУ. 2019. Т. 14. Вып. 2. С. 207–224.

REFERENCES

1. Pardo de Santayana F., Fortunato E., Pinto A.V. Behavior of Portuguese rockfill dams with upstream impervious membranes. 16th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. 2005-2006, pp.1905-1908.

2. Sainov M., Yurieva E. *Konstrukcii kamenno-nabrosny`x plotin s zhelezobetonny`m e`kranom v istoricheskoj retrospektive* [Structures of concrete faced rockfill dams in historical retrospective]. *Stroitel`stvo unikal`ny`x zdanij i sooruzhenij*. 2018. No.9(72), pp.46-60.

3. Zhou W., Hua J., Chang X., Zhou C. Settlement analysis of the Shuibuya concrete-face rockfill dam. Computers and Geotechnics. 2011. No.38, pp.269–280.

4. Zhang B. Wang J.G., Shi R. Time-dependent deformation in high concrete-faced rockfill dam and separation between concrete face slab and cushion layer. Computers and Geotechnics. 2004. No.31, pp.559–573.

5. Freitas M.S.Jr. Concepts on CFRDs leakage control – Cases and current experiences. ISSMGE Bulletin. 2009. Vol.3, No 4, pp.11–18.

6. Gan L., Shen Z. Xu L. Long-term deformation analysis of the Jiudianxia concrete-faced rockfill dam. Arabian Journal for Science and Engineering. 2014. No.39, pp. 1589–1598.

7. Zhou M., Zhang B., Jie Y. Numerical simulation of soft longitudinal joints in concrete-faced rockfill dam. Soils and Foundations. 2016. Vol. 56. No.3, pp.379–390.

8. Zhou X., Sun X., Zheng J., Jiang H., Li Y., Li Z., Ma Z., Cao P., Zhan Q., Zhao Y. Long-term settlement of high concrete-face rockfill dam by field monitoring and numerical simulation. Advances in Civil Engineering. 2020. Vol. 1, pp. 1-17.

9. Sainov M.P., Kirichenko A.Yu. *Vliyanie polzuchesti kamennoj nabroski plotiny` na napryazhenno-deformirovannoe sostoyanie zhelezobetonnogo e`krana* [Impact of dam rockfill creep on reinforced concrete face stress-strain state]. *Stroitel'stvo: nauka i obrazovanie* . 2019. No. 1(9), p. 3.

10. Chen H., Zhang Y. Simulation of creep deformation of faced rockfill dam based on secondary development of ABAQUS. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science. 2021. Vol. 831. ID 012024

11. Li J., Lu X., Chen J., Yang S., Kuang C., Yong Y., Hu K. Reliability-monitoring data coupled model for concrete slab safety evaluation of CFRD and its engineering application. Structures. 2022. No.35, pp.520–530.

12. Zhang B., Shi R., Zhang Z. Contact analysis of separation between concrete slab and cushion layer in Tianshengqiao concrete-faced rockfill dam. International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering. 2004. 26 [Electronic resource]. URL: https://scholarsmine.mst.edu/icchge/5icchge/session02/26 (access date: 06.06.2025).

13. Zhou M., Zhang B., Peng C., Wu Wei. Three-dimensional numerical analysis of concrete-faced rockfill dam using dual-mortar finite element method with mixed tangential contact constraints. International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. 2016. Vol. 40(15). [Electronic resource]. URL: https://doi.org/10.1002/nag.2524 (access date: 06.06.2025).

14. Soroka V.B., Sainov M.P., Korolev D.V. *Kamenno-nabrosny`e plotiny` s zhelezobetonny`m e`kranom: opy`t issledovanij napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya* [Concrete-faced rockfill dams: experience in study of stressstrain state]. *Vestnik MGSU*. 2019. No.2(14), pp.207–224.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ	INFORMATION ABOUT THE AUTHORS
Саинов Михаил Петрович – доктор технических наук, доцент, Московский государственный строительный университет (Национальный исследовательский университет) (129337, Россия, г. Москва, Ярославское шоссе, д.26, e-mail: SainovMP@mgsu.ru)	*Sainov Mikhail Petrovich* – Dr. Sci. (Eng.), Assoc. Prof., Moscow State University of Civil Engineering (National Research University) (129337, Russia, Moscow, 26, Yaroslavskoe shosse, e-mail: SainovMP@mgsu.ru)
Зузов Алексей Анатольевич – ассистент. Национальный исследовательский университет «МЭИ» (111250, Россия, г. Москва, ул. Красноказарменная, д.14, стр.1, e-mail: ZuzovAA@mpei.ru)	*Zuzov Aleksei Anatolevich* – assistant, National Research University «Moscow Power Engineering Institute» (111250, Russia, Moscow, 14-1, Krasnokazarmennaya street, e-mail: ZuzovAA@mpei.ru)

ISSN 2413–9858

Статья поступила в редакцию 15.07.2025; одобрена после рецензирования 25.07.2025, принята к публикации 17.08.2025.
The article was submitted 15.07.2025; approved after reviewing 25.07.2025; accepted for publication 17.08.2025.