

state of retaining walls of the first tier of the intake of the Zagorskaya PSPP // Environmental Engineering. – 2011. – 5. – S. 51-55.

6. **Lisichkin S.E., Lyapin O.B.** Transverse reinforcement of massive structures of power structures // Energy construction. – 1989. – No. 11. – S. 40-43.

7. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Pashchenko F.A.** Development of methods for calculating the stress state in horizontal sections of hydraulic engineering retaining walls of a corner type // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 019. – T. 15. – 5. – FROM. 339-344.

8. **Shcherbina V.I., Rubin O.D., Ni V.E.** Operation, assessment and development of the measures to improve the reliability of the Moscow Canal locks // Collection of scientific papers. Hydroelectric power stations. M.: Informenergo. – 1989. – Issue. 7. – 56 p.

9. **Serdyuk A.I., Chernyavsky V.L.** The experience of strengthening building structures with composite materials during the reconstruction of the Baksan hydroelectric station // Hydrotechnics. – 2013. – 3 (32). – FROM. 115-117.

10. New technology for repairing hydraulic structures by means of reinforcing with composite materials / Rubin O.D., Lisichkin S.E., Balagurov V.B., et al. // Izv. VNIIG. – 2016. – t. 280. – S. 3-10.

11. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic structures with block joints reinforced by an external reinforcement system // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 2018. – № 3. – S. 198-204.

12. **Frolov K.E.** Experimental studies of reinforced concrete structures of hydraulic

structures with an external reinforcement system with carbon composite lamellas // Environmental Engineering. – 2017. – № 1. – FROM. 56-61.

13. **Frolov K.E.** The results of experimental studies of flexible reinforced concrete structures of hydraulic structures reinforced with carbon tapes for the second group of limiting states // Environmental Engineering. – 2017. – № 2. – FROM. 42-47.

14. **Rubin O.D., Lisichkin S.E., Frolov K.E.** Method for calculating the strength of reinforced concrete structures of hydraulic structures reinforced with composite materials // Structural Mechanics of Engineering Structures and Structures. – 2017. – № 1. – S. 42-48.

The material was received at the editorial office  
30.11.2019

#### Information about the authors

**Rubin Oleg Dmitrievich**, doctor of Technical Sciences, Director of the branch of JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES”; e-mail: info@niies.ru

**Lisichkin Sergey Evgenievich**, doctor of Technical Sciences, Chief Researcher of the branch of JSC “Institute Hydroproject” – “NIIES”; e-mail: cskte@mail.ru

**Frolov Kirill Evgenievich**, Project Manager of JSC «Rusatom Automated Control Systems»; 109507, Moscow, st. Ferghanskaya, 25; e-mail: kefrolov@gmail.com

**Pashchenko Fedor Aleksandrovich**, general Director of JSC «Lenaeroproect»; e-mail: lenair@lenair.ru

**Zyuzina Oksana Valerievna**, engineer 1 categories of JSC “Vedeneev VNIIG”; e-mail: ZyuzinaOV@vniig.ru

УДК 502/504:627.43:550.834

DOI 10.34677/1997-6011/2020-1-79-88

**Д.А. КРУТОВ**

Казахстанско-Немецкий университет, г. Алматы, Республика Казахстан

## СЕЙСМОУСИЛЕНИЕ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ: ПРОЕКТ И РАСЧЕТНОЕ ОБОСНОВАНИЕ

*В связи с повышением сейсмичности в районе расположения гидроузла проведен анализ сейсмостойчивости грунтовой плотины и по результатам этого анализа выполнен проект усиления. Целью расчетных исследований является нахождение такого высотного положения пригрузки и таких заложений ее низового откоса, при которых будет обеспечиваться нормативное значение коэффициента запаса устойчивости. В статье рассмотрены проектные решения и технологические мероприятия по ремонту плотины в условиях продолжающейся эксплуатации.*

*При уширении поперечного профиля плотины в ее нижней части с целью сейсмоусиления возникает необходимость удлинения водоотводящих труб от дренажа и организации новой водоотводящей канавы. Предложено расширить профиль плотины на более высоких отметках. Такое конструктивное решение обосновано расчетами горизонтальных ускорений в теле плотины, выполненными по линейно-спектральной теории. Расчеты позволили установить влияние конструктивных параметров различных пригрузок со стороны нижнего бьефа на распределение ускорений в теле плотины при сейсмическом событии. Для плотины с пригрузкой, уширяющей поперечный профиль плотины в ее нижней части, горизонтальные ускорения достигают  $0.75 \text{ м/с}^2$  на гребне и  $0.03 \text{ м/с}^2$  в подошве. На основе проведенных расчетов выбрано оптимальное проектное решение, которое обеспечит минимальную стоимость ремонта при достаточном запасе устойчивости низового откоса. Запас устойчивости составляет 6.4% при основной и 10.4% при особой (сейсмическое воздействие) нагрузках. Экономия средств при реализации конструктивного решения, предложенного автором, составит около 50% по сравнению с конструктивным решением, которое предусматривает уширение поперечного профиля плотины в ее нижней части.*

*Сейсмоусиление, горизонтальные ускорения, повышение сейсмичности района, уширение профиля плотины, пригрузка низового откоса, реконструкция дренажа.*

**Введение.** Создание в 90-х годах прошлого столетия новой сети современных цифровых станций по периметру Казахстана позволило уточнить реальную сейсмическую опасность территории Центрально-Азиатской республики и открыть ряд ранее неизвестных сейсмоактивных районов в разных частях страны [1, 2]. Так, исходная сейсмичность района расположения плотины Тасоткель была повышена с 6 до 7 баллов при МРЗ (максимальное расчетное сейсмическое землетрясение) с расчетным периодом повторяемости таких сотрясений 1 раз в 5000 лет [3]. Это вынудило провести анализ сейсмоустойчивости плотины Тасоткель с учетом вновь открытых данных.

При оценке сейсмического эффекта на сооружение учитывается изменение параметров землетрясения в зависимости от геологических условий. При этом сейсмический эффект может быть меньше для скальных оснований или больше для глинистых водонасыщенных оснований, чем для средних грунтовых условий. Грунты основания плотины Тасоткель относятся к III-му классу и поэтому расчетная сейсмичность принята равной 8 баллам.

Оценка устойчивости и эксплуатационного состояния плотины Тасоткель выполнялись в рамках проекта «Вторая фаза проекта по усовершенствованию ирригационных и дренажных систем». Заказчик проекта – Комитет по водным ресурсам Республики Казахстан. Проект стартовал в 2016 году и реализуется в настоящее время с привлечением национальных и международных экспертов с использованием

проектных материалов Института Казгипроводхоз (Казахстан). Общий срок реализации проекта составляет 7 лет.

Плотина Тасоткель построена по проекту Казгипроводхоза в южной части республики на реке Шу и принята в эксплуатацию в декабре 1974 года. Цель строительства плотины – сельскохозяйственное орошение. Объем водохранилища при НПУ (519.0 м) составляет 620 миллионов  $\text{м}^3$ . Длина водохранилища 18 км, максимальная ширина – 8.5 км, максимальная глубина – 23 м.

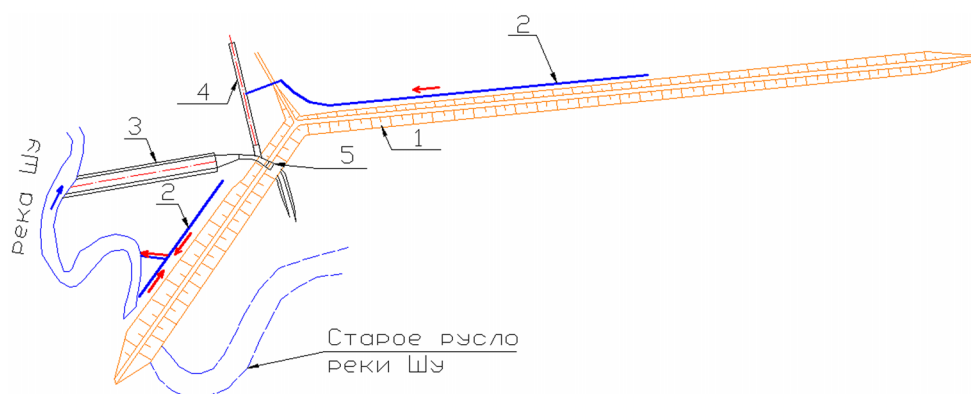
По указанию областного Комитета по чрезвычайным ситуациям Республики Казахстан наполнение водохранилища разрешается только до отметки 516.0 м, что соответствует объему 420 млн  $\text{м}^3$ . Данное ограничение обусловлено необходимостью повышения устойчивости плотины Тасоткель.

Плотина Тасоткель грунтовая, однородная, имеет криволинейный вид в плане (рис. 1). В русловой части плотина имеет высоту 25...28 м, в пойменной – 10...12 м. Ширина гребня 7.5 м, проезжей части 4.5 м.

Заложение верхового откоса плотины переменное: от 1:3 до 1:3.5. Заложение низового откоса от гребня плотины до отметки 511.4 м – 1:2.5. На отметке 511.4 устроена берма шириной 3 м. Ниже бермы до подошвы плотины заложение откоса 1:3.25.

Верховой откос закреплен железобетонными плитами по сплошной гравийно-песчаной подготовке, толщина плит 20 и 15 см. Низовой откос закреплен посевом трав.

По гребню плотины в высоконапорной ее части устроен железобетонный парапет с отметкой верха 523.3 м.



**Рис 1. Схематичный план плотины Тасоткель:**

1 – плотина; 2 – водосборная открытая канава; 3 – водовыпуск-водосброс; 4 – магистральный канал; 5 – башня управления затворами

Дренаж плотины выполнен перфорированными асбоцементными трубами диаметром 0.25 и 0.4 м с обсыпкой трехслойным обратным фильтром, толщина каждого слоя 0.2 м. Ось дренажной трубы проходит на глубине 1.0...1.5 м от поверхности земли. От дренажа вода отводится тринадцатью отводами (коллекторами) в открытую дренажную канаву, расположенную вдоль низового откоса плотины. Коллектора выполнены из железобетонных труб диаметром 0.4 м. Также дренажная система представлена смотровыми колодцами (для осмотра и ремонта дренажа).

В теле плотины устроен водовыпуск-водосброс, сооруженный из монолитного железобетона и представляющий собой пятиочковую трубу.

В 2015 году в нижнем бьефе плотины Тасоткель, по правой стороне от водовыпуска-водосброса, была построена и введена в эксплуатацию малая ГЭС. Электроэнергию на ГЭС вырабатывают 4 генератора по 2.25 МВт. Общая максимальная мощность ГЭС составляет 9 МВт. В настоящее время по левой стороне водовыпуска-водосброса строится еще одно здание ГЭС.

Тело плотины на высоконапорном участке сложено в основном супесчаными грунтами с числом пластичности 4...5.8. Суглинистые грунты встречаются в виде прослоек на некоторых пикетах, главным образом в нижней части плотины. Супеси и суглинки тела плотины находятся в основном в сильно уплотнённом состоянии с плотностью сухого грунта более 1,87 г/см<sup>3</sup> и коэффициентом пористости 0.445.

Прочностные характеристики грунтов тела плотины достаточно высоки: угол внутреннего трения ( $\varphi$ ) находится в пределах 18...35°, величина сцепления (С) превышает 30 кПа. Коэффициент фильтрации Кф с учетом

средневзвешенных значений для связных грунтов плотины составляет 0.5 м/сутки.

Основанием плотины служат аллювиальные грунты долины р. Шу, представленные в основном песчано-гравелистыми грунтами. Мощность толщи этих рыхлообломочных грунтов превышает 40 м. Осредненные прочностные характеристики грунтов основания плотины характеризуются углами внутреннего трения 31...36° и величиной сцепления 2 кПа. Коэффициент пористости грунтов основания составляет 0.699, а коэффициент фильтрации 35 м/сут.

По поручению Комитета по водным ресурсам республики Казахстан были выполнены в 2019 году (Институтом Казгипроводхоз) поверочные расчеты устойчивости плотины Тасоткель с учетом следующих фактических характеристик:

- уточненной сейсмичности района;
- физико-механических свойств грунтов тела и основания плотины;
- положения кривой депрессии по данным натурных наблюдений.

По результатам проведенных расчетов Комитет по водным ресурсам принял принципиальное решение повысить устойчивость плотины Тасоткель как на статические, так и на сейсмические воздействия. Для реализации проекта повышения устойчивости плотины, Казгипроводхоз предложил выполнить пригрузку плотины со стороны нижнего бьефа.

В рабочем проекте Казгипроводхоза были разработаны основные технологические мероприятия повышения устойчивости с учетом использования местных строительных материалов. Основным мероприятием усиления низового откоса плотины для предотвращения сползания в период проявления сейсмичности является увеличение объема его низового клина.

Проектом Казгипроводхоза предусматривается проведение строительных работ по усилению плотины на участке около 1.1 км путем пригрузки откоса гравийно-песчаной смесью. В качестве материала усиления откоса предлагается использовать гравийно-песчаные грунты, разведанные в карьерах в пойме реки Шу.

На месте проектируемой упорной призмы размещены дренажные устройства – смотровые колодцы, отводящие коллекторы в виде железобетонных труб и открытые каналы. Поэтому все эти элементы необходимо реконструировать при условии сохранения их функций (рис. 2).

Дренажные колодцы наращиваются до отметок, превосходящих отметки земли намечаемой присыпки.

Железобетонные плиты крепления действующей водосборной дренажной канавы демонтируются, и канава засыпается. В этой связи необходимо устроить новую открытую

водосборную дренажную канаву на расстоянии 25...30 м от ее современного положения и удлинить существующие коллекторные выводы (в проекте Казгипроводхоза приняты асбоцементные трубы диаметром 400 мм).

Новая водосборная канава устраивается в монолитном железобетоне с укладкой на подготовку из гравийно-песчаного грунта и геотекстиля.

Коллекторные выводы прокладываются по песчаной подготовке толщиной 10 см в засыпке из гравия диаметром 10...20 мм и перфорируются отверстиями с обертыванием геотекстилем с нахлестом в 20 см.

При производстве работ по устройству усиления низового откоса по проекту Казгипроводхоза придется выполнить ряд специфических условий: работы должны производиться при максимальной сработке водохранилища, в теплый период года в течение 2-3 месяцев с применением вахтового метода.

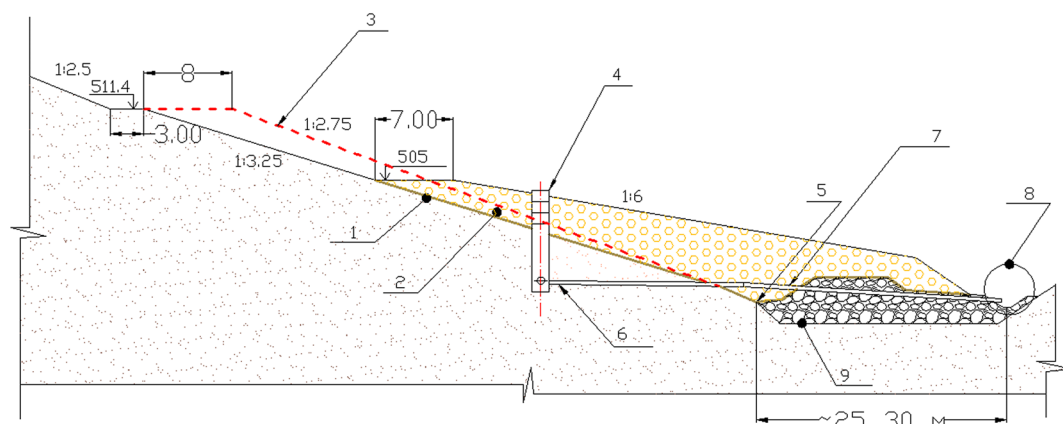


Рис. 2. Усиление низового откоса по проекту Института Казгипроводхоз:

- 1 – срезка грунта, 20 см; 2 – гравийно-песчаная пригрузка;  
 3 – пригрузка, предложенная автором; 4 – наращивание смотрового колодца;  
 5 – существующая канава; 6 – существующий коллектор; 7 – проектируемый коллектор;  
 8 – проектируемая канава; 9 – гравий 10...20 мм

Рекомендуемая очередность производства работ по усилению плотины предусматривает:

- подготовку территории к строительству (расчистка от кустарников территории средней шириной 40 м, прилегающей к низовому откосу);
- устройство временных подъездных дорог, площадок складирования материалов;
- снятие и складирование растительного грунта для последующего использования;
- отсыпку гравия 10...20 мм слоем толщиной 3 м на участке удлинения коллекторных труб;
- монтаж коллекторных труб и окончательную отсыпку гравия;

- устройство новой водосборной канавы (отводящей дренажные воды) с оформлением выходных оголовков коллекторов;

- установку дополнительных колец смотровых колодцев и монтаж оголовков с люками;
- послойную отсыпку гравийно-песчаного грунта (пригрузка) слоями толщиной 30 см с уплотнением кулачковыми катками на собственном ходу.

**Материалы и методы.** Учитывая дорогие и сложные мероприятия по организации строительства в обводненных условиях, связанные с удлинением водоотводящих труб от дренажа и организацией новой водоотводящей канавы, предлагается расположить

пригрузку на более высоких отметках. В этом случае от некоторых выше перечисленных операций можно будет отказаться.

Ниже проанализировано расположение и параметры пригрузки на более высоких отметках, поскольку при сейсмическом событии могут возрасти ускорения в теле плотины. Также принято во внимание необходимость увеличения заложения откоса пригрузки при ее новом положении.

Таким образом, целью расчетных исследований является нахождение такого высотного положения пригрузки и таких заложений ее низового откоса, при которых будет обеспечиваться нормативное значение коэффициента запаса устойчивости.

Предварительно была выполнена серия расчетов устойчивости откосов с учетом

сейсмического воздействия 8 баллов при различных заложениях откосов и расширениях бермы. В качестве оптимального конструктивного варианта было выбрано решение, показанное красным пунктиром на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, новое положение пригрузки потребует расширения бермы на отметке 511.4 м на 8 метров и организации низового откоса с заложением 1:2.75.

Объем пригрузки для нового проектного решения составит 63.2 м<sup>3</sup> на 1 п.м. Объем пригрузки по проекту Казгипроводхоза составляет 230.7 м<sup>3</sup> на 1 п.м.

Важно, что в случае обеспечения нормативных коэффициентов запаса устойчивости при новом положении пригрузки можно уменьшить объемы работ, а от некоторых видов работ можно вовсе отказаться (табл. 1).

Таблица 1

**Основные объемы работ по усилению плотины Тасоткель по проекту Казгипроводхоза**

Виды работ	Един.изм.	Объем работ	Прим.*
Срезка грунта толщиной t = 0.2 м	м <sup>2</sup> /м <sup>3</sup>	58600/11720	3
Выемка грунта в обводненных условиях с отвозкой на 1 км	м <sup>3</sup>	9888	1
Планировка откосов водосборной канавы (всего):			
- горизонтальная	м <sup>3</sup>	770	1
- откосная		330	
		440	
Насыпь гравийно-песчаного грунта с уплотнением (пригрузка низового откоса)	м <sup>3</sup>	135055	2
Демонтаж плит крепления водосборной канавы с отвозкой на 3 км, 30% складирование	м <sup>3</sup>	303	1
Засыпка коллекторных труб привозным гравием (d = 10...20 мм) 3-метровым слоем	м <sup>3</sup>	24352	1
Вскрышные работы по карьерам гравийно-песчаных грунтов	м <sup>3</sup>	42875	2
Труба коллекторная асбестоцементная ø400 мм	п.м.	180	1
Песчаная привозная подготовка толщиной 10 см под коллекторные трубы	м <sup>3</sup>	18	1
Гравийно-песчаная подготовка из карьерного грунта толщиной 10 см под новую водосборную канаву	м <sup>3</sup>	770	1
Сборные ж/б кольца для смотровых колодцев ø1.5 м	шт/м <sup>3</sup>	37/12.05	2
Трубы оцинкованные ø50 мм для наращивания пьезометров	п.м./кг	16/78	2
Геотекстиль для оборачивания коллекторных труб и в качестве подготовки под водосбросную канаву	м <sup>2</sup>	4,461	1
Проволока для скрутки геотекстиля	п.м./кг	230/6.5	1
Монолитный ж/б В15 для водосбросной канавы	м <sup>3</sup>	693	1
Арматурная сетка сварная для армирования бетона водосбросной канавы	м <sup>2</sup> /кг	4500/39600	1
Устройство деформационных швов в монолитном бетоне водосбросной канавы (доска 20×100 мм)	м <sup>3</sup>	1.9	1

*Примечание.* Изменение объема работ при новом положении пригрузки (1 – можно отказаться; 2 – можно уменьшить объем работ; 3 – необходимо увеличить объем работ).

Сметная стоимость усиления плотины Тасоткель составляет 122 миллиона 440 тысяч рублей или 1 миллион 860 тысяч долларов США (на март 2019 года). С учетом нового проектного положения пригрузки сметная

стоимость может быть уменьшена приблизительно на 50%.

Расчетные исследования, выполненные автором статьи, предусматривали определение ускорений в теле плотины

с использованием программного комплекса ANSYS в плоских условиях по линейно-спектральной теории. Число учитываемых форм собственных колебаний принято равным 25. Максимальное пиковое ускорение основания плотины при повторяемости МРЗ 1 раз в 5000 лет составляет  $1.57 \text{ м/с}^2$ .

Исследования выполнены для горизонтального направления сейсмического воздействия в сторону нижнего бьефа. В исследованиях были учтены нагрузки от подвижной нагрузки на гребне плотины путем введения в модель массовых конечных элементов.

В последующем для расчетов устойчивости низового откоса плотины использовалась эпюра ускорений, полученная в ANSYS.

Определение устойчивости низового откоса выполнялось методом Бишопа по круглоцилиндрическим поверхностям с поиском наиболее опасной, имеющей минимальный коэффициент устойчивости.

Было получено распределение ускорений в теле плотины при сейсмическом воздействии 8 баллов (для каждого расчетного случая была разработана конечно-элементная модель, рис. 3):

- плотина, выполненная по первоначальному проекту 1974 года;
- плотина с пригрузкой, предложенная Казгипроводхозом;
- плотина с пригрузкой, предложенная автором.

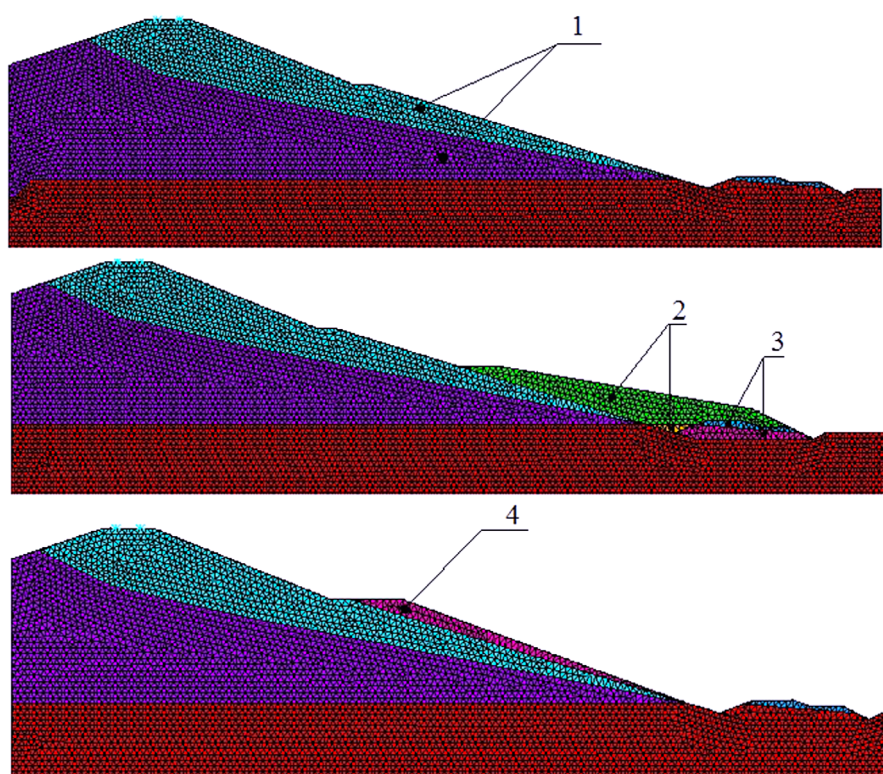


Рис. 3. Конечно-элементные модели:

- 1 – грунт плотины естественной влажности и насыщенный водой;
- 2 – гравийный грунт пригрузочной призмы (по проекту Казгипроводхоза) естественной влажности и насыщенный водой;
- 3 – гравий под укладку коллекторных труб естественной влажности и насыщенный водой;
- 4 – гравийный грунт пригрузочной призмы по предложению автора

Устойчивость откосов определялась для трех выше перечисленных моделей, как на статические, так и на сейсмические воздействия.

Принимались следующие физико-механические характеристики грунтов плотины и основания:

- грунт тела плотины естественной влажности (модуль деформации  $E = 39000 \text{ кН/м}^2$ ;

коэффициент Пуассона  $\nu = 0.35$ ; вес грунта  $\gamma = 20.3 \text{ кН/м}^3$ ; угол внутреннего трения  $\varphi = 25^\circ$ ; сцепление  $C = 31 \text{ кПа}$ );

- грунт тела плотины, насыщенный водой ( $E = 20000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.35$ ;  $\gamma = 20.6 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 18^\circ$ ;  $C = 24 \text{ кПа}$ );

- гравийный грунт пригрузочной призмы естественной влажности ( $E = 40000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 19.1 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 31^\circ$ ;  $C = 1 \text{ кПа}$ );

- гравийный грунт пригрузочной призмы насыщенный водой ( $E = 30000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 31^\circ$ ;  $C = 1 \text{ кПа}$ );

- песчано-гравийный грунт основания естественной влажности ( $E = 40000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 19.1 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 33^\circ$ ;  $C = 2 \text{ кПа}$ );

- песчано-гравийный грунт основания, насыщенный водой ( $E = 30000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 20 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 33^\circ$ ;  $C = 2 \text{ кПа}$ );

- гравий под укладку коллекторных труб естественной влажности ( $E = 40000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 23 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 40^\circ$ ;  $C = 1 \text{ кПа}$ );

- гравий под укладку коллекторных труб, насыщенный водой ( $E = 40000 \text{ кН/м}^2$ ;  $\nu = 0.27$ ;  $\gamma = 25 \text{ кН/м}^3$ ;  $\varphi = 40^\circ$ ;  $C = 1 \text{ кПа}$ ).

**Результаты и обсуждение.** Результаты расчетов ускорений сводятся к следующему. Для первоначального

состояния плотины без пригрузки горизонтальные ускорения на гребне развиваются до  $0.76 \text{ м/с}^2$ ; на отметке  $516.9 \text{ м}$  до  $0.62 \text{ м/с}^2$ ; в подошве до  $0.04 \text{ м/с}^2$ . Для плотины с пригрузкой по проекту Казгипроводхоза горизонтальные ускорения ожидаемо незначительно уменьшаются ( $0.75 \text{ м/с}^2$  на гребне;  $0.62 \text{ м/с}^2$  на отметке  $516.9 \text{ м}$ ;  $0.03 \text{ м/с}^2$  в подошве). Для плотины с пригрузкой, предложенной автором и расположенной на более высоких отметках, горизонтальные ускорения незначительно увеличиваются ( $0.76 \text{ м/с}^2$  на гребне;  $0.66 \text{ м/с}^2$  на отметке  $516.9 \text{ м}$ ;  $0.05 \text{ м/с}^2$  в подошве). Результаты расчетов горизонтальных ускорений в теле плотины представлены на рисунке 4, а результаты расчетов устойчивости откосов приведены в таблице 2.

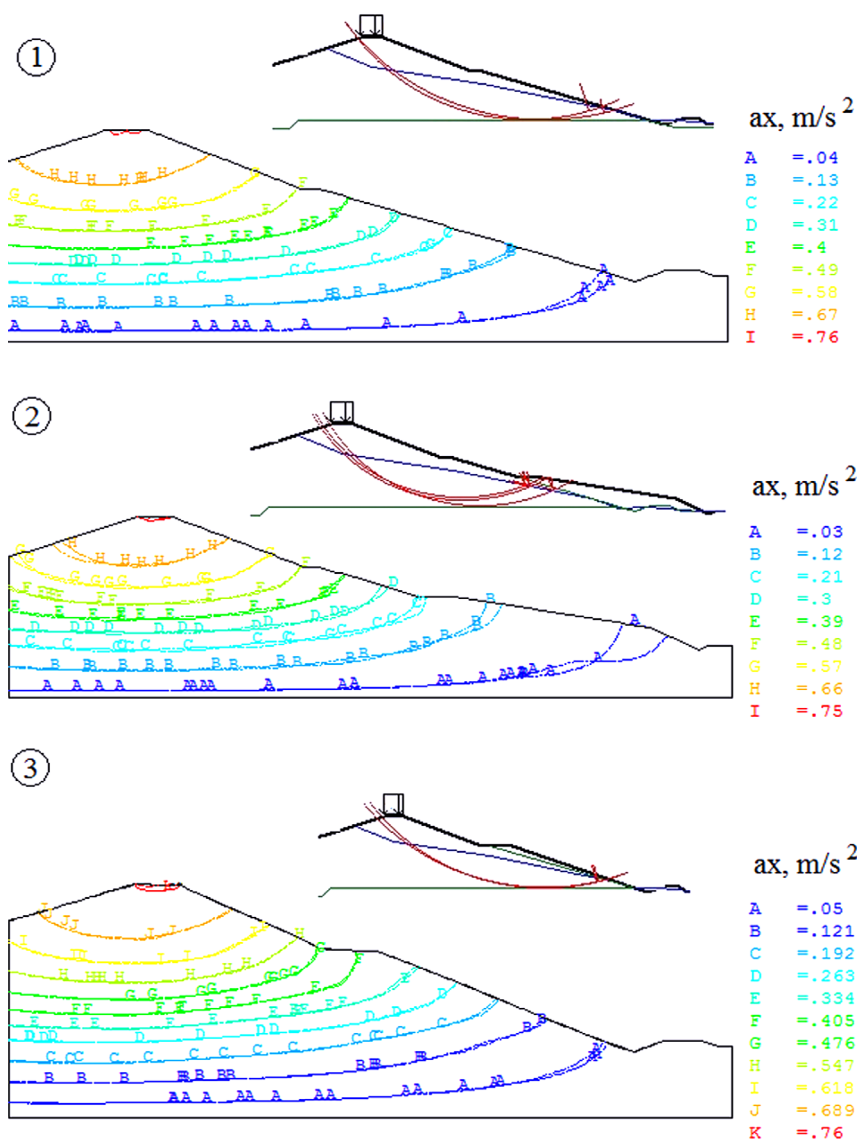


Рис. 4. Горизонтальные ускорения ( $a_x, \text{ м/с}^2$ ) и положение кривой скольжения при сейсмическом воздействии 8 баллов:  
 1 – первоначальное состояние; 2 – пригрузка по проекту Казгипроводхоза;  
 3 – пригрузка по предложению автора

## Нормативные и расчетные коэффициенты устойчивости откосов

Сочетания нагрузок		Расчетные значения	Нормативные значения
Плотина без пригрузки	Основное	1.23	1.25
Плотина с пригрузкой (по проекту Казгипроводхоза)		1.34	
Плотина с пригрузкой (по предложению автора)		1.33	
Плотина без пригрузки	Особое, 8 баллов	1.096	1.06
Плотина с пригрузкой (по проекту Казгипроводхоза)		1.18	
Плотина с пригрузкой (по предложению автора)		1.17	

Проектные решения, предусматривающие ремонт плотин с использованием пригрузок, расширяющих профиль плотины, в том числе в верхней и средней ее части, встречаются часто. Цель таких ремонтов заключается в повышении устойчивости низовых откосов, повышении общей фильтрационной прочности грунта тела плотины [4], реконструкции дренажных систем [5], недопущения подтопления нижнего бьефа [6], недопущения перелива воды через гребень путем наращивания гребня плотины [7]. Поэтому важно оценить влияние таких пригрузок на устойчивость плотин в сейсмоопасных районах, принимая во внимание возможность увеличения ускорений. Исследования, проведенные автором статьи, на примере плотины Тасоткель позволяют дать нижеследующую оценку использования таких пригрузок.

### Заключение

1. Моделирование сейсмоусиления плотины в программе ANSYS с проведением параметрического анализа позволило установить влияние различных параметров (конструктивные особенности пригрузки) на распределение ускорений в теле плотины. Проведенные расчеты наглядно показывают незначительное влияние расширения поперечного профиля плотины Тасоткель на уменьшение горизонтальных ускорений в ее теле.

2. Уширение поперечного профиля плотин в их нижней части является надежным средством повышения их сейсмостойкости, но это сейсмоусиление достигается гораздо больше за счет уположения низового откоса (увеличения удерживающих сил), чем за счет уменьшения ускорений в теле плотины.

3. Размещение пригрузок в средней части низовых откосов плотин, эксплуатирующихся в сейсмически опасных районах, вполне допустимо при соответствующем расчетном обосновании.

4. Оптимальной пригрузкой для повышения устойчивости плотины Тасоткель (в том числе на сейсмическое воздействие) является нагружение низового откоса, при котором будет расширена промежуточная берма с дальнейшим распространением по откосу с заложением 1:2.75. Объем пригрузки составит 63.2 м<sup>3</sup> на 1 п.м., что в 3.6 раза меньше объема пригрузки по проекту Казгипроводхоза.

5. Предложенное конструктивное решение (пригрузка на более высоких отметках) обеспечивает достаточный запас устойчивости низового откоса, как при основной (6.4%), так и при особой (сейсмическое воздействие) (10.4%) нагрузках.

6. Возможна комбинация конструктивных решений, рассмотренных в статье.

7. Усиление плотины Тасоткель пригрузкой, расположенной на более высоких отметках, позволит отказаться от производства работ в обводненных условиях, связанных с удлинением водоотводящих труб от дренажа и организацией новой водоотводящей канавы. Экономия средств при реализации нового конструктивного предложения составит около 50% по сравнению с конструктивным решением, которое предусматривает уширение поперечного профиля плотины в ее нижней части.

### Библиографический список

1. Михайлова Н.Н., Полешко Н.Н. Сейсмичность и характер напряженно-деформированного состояния в слабосейсмичных районах Казахстана // Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстан. – 2013. – вып. 2. – С. 140-153.

2. Михайлова Н.Н., Неделков А.И., Соколова И.Н. О сейсмических событиях в малоактивных и асейсмичных районах Казахстана / Современная геодинамика, глубинное строение и сейсмичность платформенных территорий и сопредельных регионов. – Воронеж: Изд-во Воронеж. гос. ун-та, 2001. – С. 131-133.



3. Михайлова Н.Н. Новые данные о землетрясениях в «сейсмичных» районах Казахстана и карта сейсмического районирования / Исследования сейсмостойкости сооружений и конструкций. Труды Казах. НИИССА. Вып. 20(30). – Алма-Ата: Каз НИИССА, 2001. – С. 80-88.

4. Srinivas T., Chandrashekar K.S.S., Srinivasulu S. Seepage control in embankments – a case study Akkampally balancing reservoir // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019, Vol. 2, p. 557-560.

5. Plunnecke C., Marcelino J. Rehabilitation of the Massingir Embankment Dam: A Concept Based on Finite Element Seepage Analysis // Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. Sept. 2016, Vol. 5, Issue 3, p. 147-153.

6. Крутов Д.А. Ремонт дренажных систем грунтовых плотин // Вестник МГСУ. – 2019. – Т. 14. – Вып. 7. – С. 901-911.

7. Mathur C.S., Bikram P., Verma V.K., Vaibhav S. Major structural measures for dam safety under DRIP from hydrological considerations // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019, Vol. 2, p. 875-884.

Материал поступил в редакцию 15.12.2019 г.

#### Сведения об авторе

**Крутов Денис Анатольевич**, кандидат технических наук, приглашенный профессор, Казахстанско-Немецкий университет; 050010, Казахстан, г. Алматы, ул. Пушкина, 111, e-mail: dkrutov@rambler.ru

#### D.A. KRUTOV

The Kazakhstan – German university, Almaty, Republic of Kazakhstan

## SEISMIC STRENGTHENING OF THE EARTHEN DAM: DETAIL DESIGN AND CALCULATIONS

*The analysis of seismic stability of the earth dam was made due to seismicity increasing in the area of the hydraulic unit. The design of seismic amplification was fulfilled based on the results of this analysis. The purpose of the estimated research was to find such a high position of loading and location of its downstream face under which the normative coefficient value of stability margin would be ensured. The article considers design decisions and technological measures on the dam repairing under the conditions of its operating. It is necessary to extend the outlet pipes from the drainage and arrange a new water diversion ditch when broadening the dam cross section in its lower part for improving seismic stability. The author proposed to broaden the dam profile on higher levels. This design decision is justified by the calculations of horizontal accelerations in the dam body performed according to the linear-spectral theory. The calculations allowed establishing the influence of design parameters of various loading from the downstream on distribution of accelerations in the dam body during a seismic event. For the dam with a loading which broads the cross section of the dam in its lower part horizontal accelerations reach  $0.75 \text{ m/s}^2$  on the crest and  $0.03 \text{ m/s}^2$  in the foot. Horizontal accelerations increase (expectedly but not significantly) for the dam with a loading located on higher levels ( $0.76 \text{ m/s}^2$  on the crest and  $0.05 \text{ m/s}^2$  in the foot). Based on the fulfilled calculations, the optimal design solution was chosen that would ensure the minimum repair cost. At the same time, a sufficient margin of stability of the downstream face will be ensured. The margin of stability is 6.4% for the usual and 10.4% for specific (seismic impact) loads. The cost saving will be about 50% in comparison with the design solution which provides broadening of the dam profile in its lower part.*

*Soil dam, seismic amplification, horizontal accelerations, seismicity increase of the region, dam profile broadening, downstream face loading, drainage reconstruction.*

#### References

1. Mikhailova N.N., Poleshko N.N. Seismichnost i haracter napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya v slaboseismichnyh rajonah Kazahstana // Vestnik Natsionalnogo yadernogo tsentra Respubliki Kazahstan. – 2013. – vyp. 2. – S. 140-153.

2. Mikhailova N.N., Nedelkov A.I., Sokolova I.N. O seismicheskikh sobytyiyah v maloaktivnyh i asejsmichnyh rajonah Kazahstana / Sovremennaya geodinamika, glubinnoye stroenie i seismichnost platformennyh territorij i sopredelnyh regionov. – Voronezh: Izd-vo Voronezh. gos. un-ta, 2001. – S. 131-133.

3. **Mikhailova N.N.** Novye dannye o zemletryaseniyah v «asejsmicheskikh» rajonah Kazahstana i karta sejsmicheskogo rajonirovaniya / Issledovaniya seismostojkosti sooruzhenij i konstruksij. Trudy Kaz. NIISSA. Vyp. 20(30). – Alma-Ata: Kaz. NIISSA, 2001. – S. 80-88.

4. **Srinivas T., Chandrashekar K.S.S., Srinivasulu S.** Seepage control in embankments – a case study Akkampally balancing reservoir // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019, Vol. 2, p. 557-560.

5. **Plunnecke C., Marcelino J.** Rehabilitation of the Massingir Embankment Dam: A Concept Based on Finite Element Seepage Analysis // Journal of Water Resource and Hydraulic Engineering. Sept. 2016, Vol. 5, Issue 3, p. 147-153.

6. **Krutov D.A.** Remont drenaznyh sistem gruntovyh plotin // Vestnik MGSU. – 2019. – Т. 14. – Vyp. 7. – S. 901-911.

7. **Mathur C.S., Bikram P., Verma V.K., Vaibhav S.** Major structural measures for dam safety under DRIP from hydrological considerations // International Dam Safety Conference. Bhubaneswar, Odisha. February 2019, Vol. 2, p. 875-884.

The material was received at the editorial office  
15.12.2019

#### Information about the author

**Krutov Denis Anatoljevich**, candidate of technical sciences, visiting professor, the Kazakhstan – German university; 050010, Almaty, ul. Pushkina, 111; e-mail: dkrutov@rambler.ru

УДК 502/504:626.82.691.11

DOI 10.34677/1997-6011/2020-1-88-93

**В.Я. ЖАРНИЦКИЙ, П.А. КОРНИЕНКО**

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Российская Федерация

## ОБОСНОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СДВИГОВОГО ТЕЧЕНИЯ БЕТОННОЙ СМЕСИ ПОД ДЕЙСТВИЕМ СИЛЫ ТЯЖЕСТИ ПО НАКЛОННОЙ ПОВЕРХНОСТИ ОТКОСА

*Мировой опыт строительства каналов показывает, что помимо вновь возводимых сооружений выполняются значительные объёмы работ по ремонту и восстановлению существующей сети. При этом не достаточно исследованы основные закономерности гидродинамического сдвигового течения плоскопараллельного слоя бетонной смеси, находящейся на плоской поверхности земляного склона, бетонная смесь укладываемая на откосы, рассматривается как однослойная жидкость, что не вполне адекватно отражает её реальную работу. Предлагается математическая модель стационарного сдвигового течения плоского слоя вязкой жидкости (бетонной смеси), стекающей вдоль откоса под действием сил тяжести по наклонной поверхности, что позволяет устанавливать гидродинамические параметры потока, вязкие напряжения, давление и скорость движения частиц вязкой жидкости. Уточнение расчетных моделей и их экспериментальная проверка позволят правильно формулировать технические требования к способам и средствам механизации укладки бетона в монолитные крепления каналов.*

*Каналы, строительство, сооружения, восстановление гидротехнических сооружений, монолитные облицовки каналов, бетонные смеси, гидродинамика, откосы, расчетные модели, вязкость бетона, система дифференциальных уравнений, физические поля, кинематическая вязкость, сила тяжести, двумерный поток бетонной смеси.*

**Введение.** Возведение каналов различного назначения является эффективным способом решения разнообразных водохозяйственных задач.

Протяженность каналов Российской Федерации составляет около 35 тыс. км.

Ежегодно вводится в эксплуатацию около 1,5 тыс. км каналов и, не смотря на некоторый спад, наблюдается тенденция к наращиванию объемов строительства таких объектов. Помимо вновь возводимых сооружений выполняются значительные объёмы