

ТЕХНОЛОГИЯ РАБОТ ПРИ ДОСЫПКЕ ГРУНТОВЫХ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ

Васильева Е.В.

Согласно мирового регистра плотин, в мире построено более 100тыс. водоподпорных сооружений. Среди них более 80% составляют грунтовые плотины и дамбы, значительная часть которых относится к средне- и низконапорным [1-7].

По данным Росприроднадзора и Ростехнадзора продолжительность эксплуатации этих сооружений составляет 30-50 лет, средний процент износа более 50%, их аварийность превысила среднемировой показатель более чем в два раза, ежегодно на них происходит 50-60 аварий, ущерб от которых исчисляется миллиардами рублей [3,7].

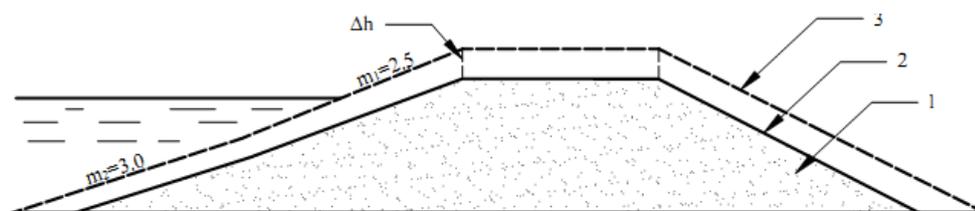
К числу основных причин аварий и разрушений грунтовых водоподпорных сооружений следует отнести несвоевременное устранение дефектов (просадок гребня, размывов, обрушений и оползаний откосов, трещин, фильтрационных ходов и др.) и некачественное выполнение ремонтно-восстановительных работ, из-за использования низкоэффективных технологий. Ведь применяемые в настоящее время технологии ремонтно-восстановительных работ предусматривают досыпку тела плотин и восстановление обрушенных откосов производить грунтом того же состава что и тело сооружения, а заделку трещин, фильтрационных ходов, нор и других подобных дефектов осуществлять им же или суглинком, глиной, смесью суглинка (глины) с навозом, мешками с грунтом и т.п. Но со временем, из-за низкой прочности, водо- и морозостойкости досыпанных и восстановленных элементов плотин (дамб), их защитные свойства (прочностные, противофильтрационные, теплоизоляционные и др.) будут утрачены и дефекты появятся вновь.

Ниже предложены технологии ремонтно-строительных работ по восстановлению грунтовых плотин и дамб путём их досыпки до требуемых отметок грунтосмесями, улучшенных высевкой и золой, способствующих образованию высокопрочной и водостойкой камневидной структуры в восстановлен-

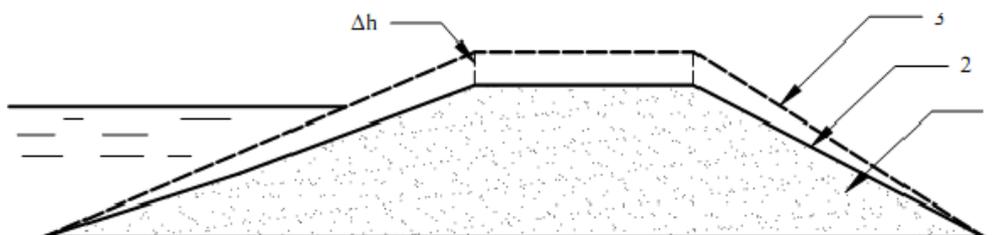
ных элементах (откосах, гребне), обладающих повышенной сопротивляемостью к дефектообразованию [8].

Необходимость досыпки (наращивания) гребня и откосов плотины возникает в случае потребности в увеличении высоты плотины или при просадке её тела ниже проектных отметок (рисунок 1).

а)



б)



а, б – для случаев, соответственно, подъёма высоты гребня плотины и ликвидации просадки гребня и откосов

1-плотина; 2,3 –поперечное сечение плотины, соответственно, до и после проведения ремонтных работ

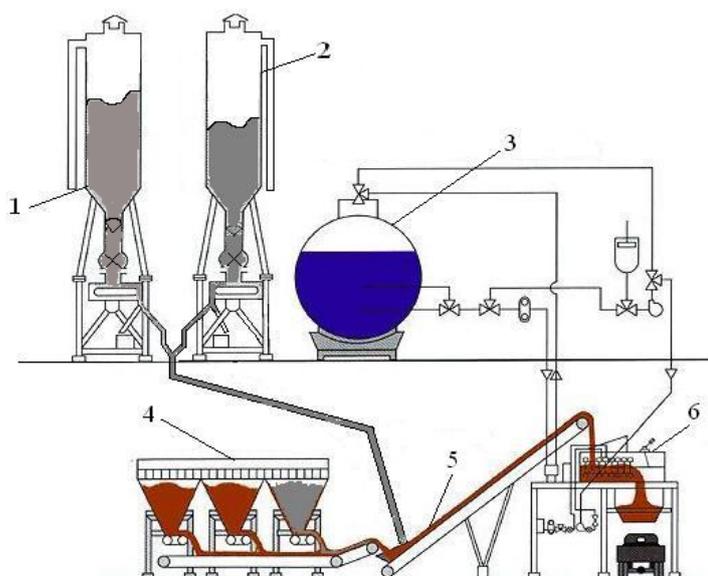
Рисунок 1 - Схема поперечного сечения плотины

Для приготовления грунтосмеси рекомендуется использовать грунто-смесительную установку типа, например, ДС-50 с дополнительным бункером для золы (рисунок 1). Перечень ремонтно-строительных операций по досыпке гребня и откосов плотины до требуемых (увеличенных, проектных) отметок приведён в таблице 1.

Таблица 1 – Перечень ремонтно-восстановительных операций по досыпке гребня и откосов плотины до проектных отметок

№ № операции	Ремонтно-строительные операции	Средства механизации
1.	Рыхление проезжего участка гребня в виде покрытия из гравийно-	Навесной или прицепной рыхлитель на базе гусе-

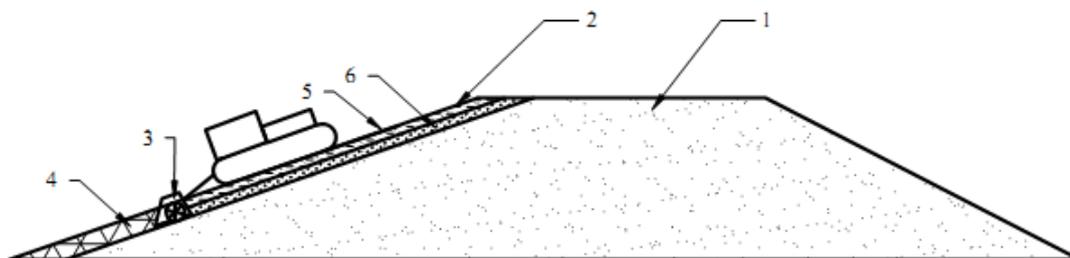
	песчаной смеси	ничного трактора
2.	Разработка на гребне и перемещение гравийно-песчаной смеси во временные отвалы	Бульдозер или грейдер
3.	Планировка верха (гребня, части откосов) плотины, боронование	Грейдер, бульдозер + бороны
4.	Доувлажнение грунта верхней части плотины до оптимальной влажности	Автоцистерна или поливочная машина
5.	Вскрыша карьера	Бульдозер или скрепер
6.	Доувлажнение грунта в карьере до оптимальной влажности	Полivочная машина, автоцистерна
7.	Разработка грунта в карьере и транспортирование его к грунтосмесительной установке	Скрепер, экскаватор и автосамосвалы, тракторные тележки
8.	Доставка цемента, золы и высевки к месту приготовления грунтосмеси (к установке)	Автоцементовоз, автосамосвалы, тракторные тележки
9.	Приготовление в грунтосмесительной установке грунтосмеси из грунтоцемента с добавлением золы и высевки	Грунтосмесительная установка
10.	Доставка приготовленной грунтосмеси и укладка её слоями на гребень и частично откосы	Автосамосвалы, бульдозер или грейдер
11.	Послойное разравнивание и уплотнение грунтосмеси оптимальной влажности до проектной плотности	Бульдозер, грейдер, каток или вальцовая трамбовка
12.	Устройство «корыта» под покрытие	Грейдер(прицепной или автогрейдер)
13.	Отсыпка в «корыто» гравийно-песчаной смеси (или устройство покрытия из другого материала)	Автосамосвал, бульдозер
14.	Разравнивание и уплотнение гравийно-песчаной смеси с приданием проезжей части плотины выпуклой двухскатной формы	Грейдер, каток
15.	Рекультивация карьера	Бульдозер или скрепер



1-бункер цемента; 2- бункер золы; 3- цистерна с насосными установками;
4- бункера грунта и заполнителей; 5- транспортёр; 6 –смесительный агрегат

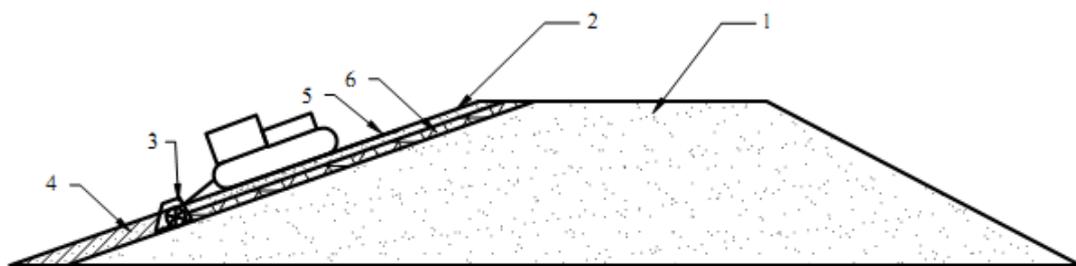
Рисунок 2- Технологическая схема модернизированной
грунтосмесительной установки ДС-50

При пологих откосах плотин ($m = 4 \div 6$) смешивание высевки с грунтом (рисунок 3), а затем с цементом и золой (рисунок 4) может производиться и на месте проведения работ – откосе или гребне. Для этого грунт на откосе измельчают, подвозят и равномерно распределяют по нему высевку, перемешивают фрезой, по принятым дозировкам вносят цемент и золу, вновь перемешивают, увлажняют до оптимальной влажности и уплотняют.



1 - плотина; 2 - верховой откос; 3 - фреза; 4 -измельчённая и перемешанная фрезой смесь высевки с грунтом; 5- высевка, 6- грунт

Рисунок 3- Схема перемешивания высевки с грунтом на откосе
специальной фрезой



1 - плотина; 2 - верховой откос; 3 - фреза; 4 –перемешанная фрезой смесь высевки и грунта с цементом и золой; 5- цемент, зола, 6- смесь высевки с грунтом.

Рисунок 4 - Схема перемешивания цемента и золы с высевкой и грунтом

Для определения прочностных свойств затвердевшей грунтосмеси были проведены экспериментальные исследования, позволяющие с помощью математических моделей, изменяя входные параметры, оценивать качество грунтосмеси.

В основу решения был положен двухфакторный [9] симплекс - суммируемый план типа правильного шестиугольника. В качестве двух варьируемых факторов были выбраны: расход цемента – Ц, % от массы грунтосмеси; расход (количество) грунта – ГР, % от массы грунтосмеси.

Расход цемента и количество грунта в плане эксперимента варьировались, соответственно, от 3,0 % до 15% и от 40% до 85%, что соответствует результатам предварительных исследований и априорной информации о рациональном дозировании вышеуказанных компонентов грунтосмеси [10].

Для приготовления грунтовых смесей использовались материалы (компоненты) со следующими показателями: Новороссийский портландцемент марки 400; грунт – лёгкий слабопроницаемый суглинок; высевка – отход камнедробления известняка фракции 0-5мм с модулем крупности $M_{кр}=2,98$; зола- унос сухого отбора с электрофильтров Новочеркасской ГРЭС.

Условия кодирования и варьирования факторов представлены в таблице 2.

Таблица 2- Кодирование и варьирование факторов

Факторы	Код X_i	Основной уровень, X_0 , %	Интервал варьирования, ΔX_i	Нижний уровень, «-»	Верхний уровень, «+»
Цемент	X_1	9,0	6,0	3,0	15,0
Грунт	X_2	62,5	22,5	40,0	85,0

Графический план эксперимента представлен на рисунке 5.

Из рисунка видно, что точки принятого плана эксперимента имеют координаты вершин правильного шестиугольника, построенного в пределах варьирования факторов ± 1 в кодированной форме. План удобен тем, что переход от кодированных значений факторов к натуральным и наоборот можно осуществить графически по соответственным осям. По результатам семи опытов (шесть вершин и центр шестиугольника) вычислялись неизвестные коэффициенты уравнения регрессии второго порядка:

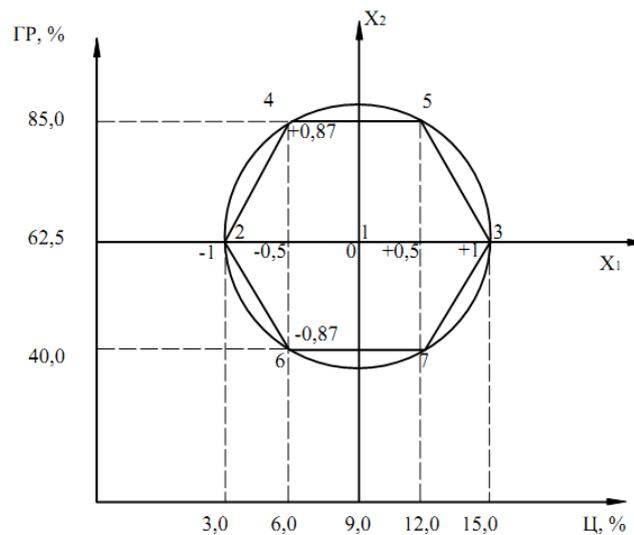


Рисунок 5 –План эксперимента на шестиугольнике

$$\hat{y}_R = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2, \text{ где}$$

$$b_0 = (0y) - \sum_{i=1}^k (i^2 y);$$

$$b_i = \frac{1}{3}(iy);$$

$$b_{ij} = \frac{4}{3}(ijy);$$

$$b_{ii} = \frac{2}{3}(i iy) + \frac{5}{6} \sum_{i=1}^k (i iy) - (0y).$$

(1.1)

Матрица и результаты эксперимента приведены в таблице 3.

Таблица 3– Реализация плана эксперимента

Номер опыта	План		X_1^2	X_2^2	$X_1 X_2$	Факторы		Прочность через 28 суток и полного водонасыщения	
	X_1	X_2				$X_1(\text{Ц})$	$X_2(\text{Гр})$	\bar{y}	\hat{y}_R
1	0	0	0	0	0	9,0	62,5	13,21	13,21
2	-1	0	1	0	0	3,0	62,5	5,49	5,11
3	1	0	1	0	0	15,0	62,5	14,53	14,91
4	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43	6,0	85,0	6,25	6,62
5	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43	12,0	85,0	12,62	12,23
6	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	6,0	40,0	10,58	10,96
7	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	12,0	40,0	15,51	15,15
	14,69	-6,28	31,26	33,72	0,62			78,19	

По формулам (1.1) были подсчитаны коэффициенты уравнения регрессии второго порядка:

$$b_0 = 78,19 - (31,26 + 33,72) = 13,21;$$

$$b_1 = \frac{14,69}{3} = 4,90;$$

$$b_2 = \frac{-6,28}{3} = -2,09;$$

$$b_{12} = \frac{4}{3}(0,62) = 0,83;$$

$$b_{11} = \frac{2}{3}(31,26) + \frac{5}{6} \sum_{i=1}^k (31,26 + 33,72) - (78,19) = -3,20;$$

$$b_{22} = \frac{2}{3}(33,72) + \frac{5}{6} \sum_{i=1}^k (31,26 + 33,72) - (78,19) = -1,56;$$

Для прочности образцов через 28 суток твердения и полного водонасыщения получено регрессионное уравнение вида:

$$\hat{y}_R = 13,21 + 4,90 X_1 - 2,09 X_2 - 3,2 X_1^2 - 1,56 X_2^2 + 0,83 X_1 X_2$$

(1.2)

Регрессионный анализ модели (1.2) произведём после определения ошибки эксперимента и расчёта ошибок коэффициентов уравнения. С учётом 3-ёх кратной повторности опытов дисперсия воспроизводимости и ошибка эксперимента по воспроизводимости составят:

$$S_{y^2}^2 = 0,15, S_{эв} = \sqrt{S_{эв}^2} = 0,387.$$

Таблица 4 -Расчет ошибок коэффициентов

ϵ_M	ϵ_0	ϵ_i	ϵ_{ij}	ϵ_{ij}
T_i	1,0	0,577	1,224	1,155
$T_i \cdot S_{эв}$	0,387	0,223	0,474	0,447
$t \cdot T_i \cdot S_{эв}$	0,682	0,393	0,835	0,787

где T_i – расчётные коэффициенты для оценки ошибок коэффициентов регрессии;

t – критерий Стьюдента, $t=1,761$ [2].

Таблица 5 -Регрессионный анализ модели

ϵ_M	Начальная модель	$\epsilon_{кр}$	Конечная модель	$ij \cdot y$	$\epsilon_{ij} (ij \cdot y)$
ϵ_0	13,21	0,682	13,21	78,19	1032,89
ϵ_1	4,9	0,393	4,9	14,69	71,98
ϵ_2	-2,09	0,393	-2,09	-6,28	13,13
ϵ_{11}	-3,2	0,835	-3,2	31,26	-100,03
ϵ_{22}	-1,56	0,835	-1,56	33,72	-52,61
ϵ_{12}	0,83	0,787	0,83	0,62	0,52

Сумма квадратов SS:

$$SS = SS_{mod} + SS_{эв} = 966,18.$$

Средний результат каждого опыта возводим в квадрат и эти величины суммируем:

$$(yy) = 174,50 + 30,14 + 211,12 + 39,06 + 159,26 + 111,94 + 240,56 = 966,59$$

Проводим проверку адекватности модели при риске $\alpha = 0,05$, и числе степеней свободы $f_{на} = 7-6=1$ и $f_3 = N (n-1) = 14$. Сумма квадратов $SS_{на}$:

$$SS_{na} = (yy) - (SS_{mod} + SS_{эв}) = 966,59 - 966,18 = 0,41,$$

дисперсия неадекватности S_{ia}^2 :

$$S_{na}^2 = \frac{SS_{na}}{f_{na}} = \frac{0,41}{7-6} = 0,41,$$

критерий Фишера:

$$F_a = \frac{S_{na}^2}{S_{эв}^2} = \frac{0,41}{0,15} = 2,73,$$

$$F_a = 2,73 < F_{\alpha} = 4,62$$

Таким образом, можно допустить, что модель (1.2) с риском $\alpha = 0,05$ адекватно описывает результаты эксперимента.

Инварианты кривой второго порядка составят:

- сумма коэффициентов при квадратичных членах:

$$S = b_{11} + b_{22} = -3,20 - 1,56 = -4,76; \quad (1.3)$$

- определитель, составленный из коэффициентов при старших членах:

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3,2 & 0,415 \\ 0,415 & -1,56 \end{vmatrix} = 4,82;$$

(1.4)

- определитель третьего порядка, составленный из всех коэффициентов:

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3,2 & 0,415 & 2,45 \\ 0,415 & -1,56 & -1,05 \\ 2,45 & -1,05 & 13,21 \end{vmatrix} = 74,42.$$

(1.5)

Коэффициенты канонической формы вычисляем через инварианты:

$$\lambda_{1,2} = \frac{S}{2} \pm \sqrt{\frac{S^2}{4} - \delta} = -2,38 \pm 0,92;$$

$$\lambda_1 = -1,46;$$

$$\lambda_2 = -3,30;$$

$$C = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{74,42}{4,82} = 15,44.$$

1.6)

С учётом вычисленных коэффициентов каноническая форма уравнения (1.2) примет вид:

$$-1,46\bar{X}_1^2 - 3,30\bar{X}_2^2 + 15,44 = R_{28},$$

(1.7)

а полуоси эллипсов определяются следующим образом:

$$a = \sqrt{\frac{15,44 - R_{28}}{1,46}}; b = \sqrt{\frac{15,44 - R_{28}}{3,3}}.$$

(1.8)

Геометрический образ модели $\hat{y}_R (R_{28})$ изображен на рисунке 6.

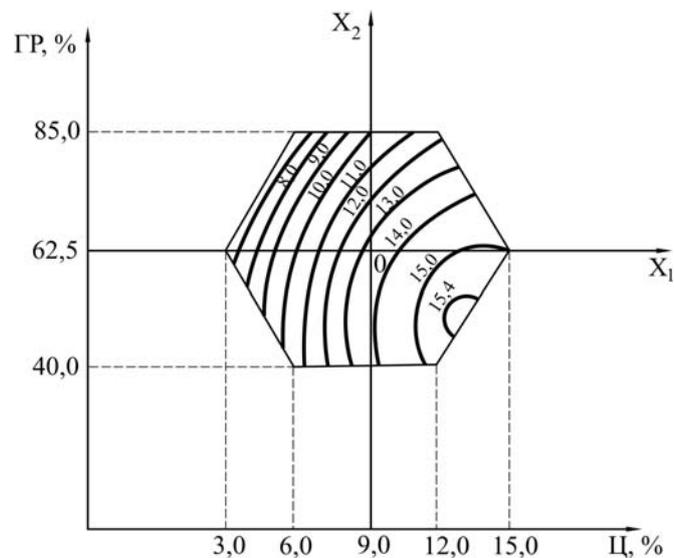


Рисунок 6 – Геометрический образ модели \hat{y}_R прочности грунтобетона через 28 суток твердения и полного водонасыщения

Анализ математической модели и её графического представления (рис.5) позволяет сделать следующие выводы:

1. Прочность затвердевшей через 28 суток грунтосмеси (грунтобетона) повышается при уменьшении количества грунта в составе грунтосмеси и увеличении расхода цемента и высевки.

2. Дозировка цемента и высевки в высокопрочных (13-15 МПа) грунтобетонах должна быть, соответственно, не менее 8,0-10,0% и не менее 25-30% от массы грунтосмеси.

3. Уменьшение дозировки цемента в равнопрочных грунтобетонах следует компенсировать увеличением расхода высевки в составе грунтосмеси. Одинаковыми прочностными свойствами обладают затвердевшие грунтосмеси с нижеприведёнными расходами компонентов (цемента, грунта, высевки, золы):

Ц=9,0% , ГР=46-48%, Выс=37-39%, З=6,0%;

Ц=10,5% , ГР=63-65%, Выс=20-22%, З=4,5%;

Ц=12,0% , ГР=69-71%, Выс=14-16%, З=3,0% и т.д.

4. Использование высевки и золы-унос для экономного расхода цемента в равнопрочных грунтобетонах в количестве, соответственно, 20-40% и 4-6% от массы грунтосмеси, следует считать оптимальным.

5. Уменьшение количества высевки ниже 20% и увеличение дозировки золы свыше 6%, не обеспечивают затвердевшей грунтосмеси высокой прочности без увеличения расхода цемента.

Ниже, в таблице 6 представлены результаты сравнительных испытаний образцов цилиндров после 28 суток твердения и 50 циклов замораживания - оттаивания. Определены пределы прочности образцов при сжатии $R_{мор}$ и коэффициенты морозостойкости, подтвердившие соответствие грунтосмесей с высевкой критериям морозостойкости ($R_{мор}/R_{28} > 0,95$) [3].

Таблица 6 – Результаты испытаний стандартных образцов

Дозировка компонентов, % от массы грунтосмеси				Прочность, МПа		Коэффициент морозостойкости, $R_{мор}/R_{28}$
Цемент	Грунт	Высевка	Зола	Через 28 суток и полного водонасыщения, R_{28}	После 50 циклов замораж.-оттаив., $R_{мор}$	
12	55	30	3	15,31	14,85	0,97
12	85	0	3	11,70	9,24	0,79
10	55	30	5	14,30	13,73	0,96
10	85	0	5	10,57	8,14	0,77
8	55	30	7	12,72	12,21	0,96

8	85	0	7	8,85	6,55	0,74
---	----	---	---	------	------	------

Как следует из приведённых в таблице данных наличие в составе грунто-смеси высевок не только обеспечивает повышение прочности на 30-40%, но и даёт существенный прирост водо- и морозостойкости (на 20-30%), что предотвратит или существенно снизит фильтрационные просачивания воды через тело водоподпорных сооружений, так как высокопрочный и морозостойкий грунтобетон, будучи уложенным на откос (при восстановлении обрушенных откосов) и гребень (при досыпке и наращивании до или сверх проектных отметок), надёжно защитит тело плотин (дамб) от просадки, размыва, выпучивания, суффозии и других деформаций.

Литература

1. Бандурин М.А. Проблемы оценки остаточного ресурса длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений [Текст] // Инженерный вестник Дона 2012 № 3. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n3y2012/891> (доступ свободный) – Загл. с экрана. – Яз. рус.
2. Бандурин М.А. Особенности технической диагностики длительно эксплуатируемых водопроводящих сооружений [Текст] // Инженерный вестник Дона 2012 №2. – Режим доступа: <http://www.ivdon.ru/magazine/archive/n2y2012/861> (доступ свободный) - Загл. с экрана. – Яз. рус.
3. Шкура В.Н., Мордвинцев М.М. Мелиорация вод и водных объектов. Терминология и классификация. Новочеркасск: изд. НГМА, 1999. - 34с.
4. Bruun P. Breakwaters for Coastal Protection, Hydraulic Principles in Design. Sec. 2, Question 1, XVIII International Congress, Rome, 1953. - SII - Q1
5. Leila Sharifi, Mohamad Karami. Assessment of suitable Location for Construction of groundwater dams. Life Science Journal 2012;9(4). - p.p. 1233 - 1236
6. Ачкасов Г.П., Иванов Е.С. Технология и организация ремонта мелиоративных гидротехнических сооружений. - М.: Колос, 1984. - 174с.

7. Щедрин В.Н., Косиченко Ю.М. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения.// Гидротехническое строительство, 2011, №5. – С. 33 - 38.
8. Патент 2419705, РФ. Способ устранения дефектов в дамбах из однородного грунта / Е.В. Васильева, В.М.Федоров. Опубл.27.05.2011. - Бюл. № 15.
9. Вознесенский В.А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях. – М.: Финансы и статистика, 1981. - 262с.
10. Горелышев Н.В., Гурячкова И.Л., Пинус Э.Р. Материалы и изделия для строительства дорог. - М.: Транспорт, 1986. - 287с.