

УДК 627.8.03

**Е. В. Васильева** (ФГБОУ ВПО «НГМА»)

## **ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ГРУНТОВЫХ ВОДОПОДПОРНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

Разработана усовершенствованная технология борьбы с дефектами и повреждениями на грунтовых водоподпорных сооружениях, предусматривающая проведение ремонтных работ с использованием грунтосмесей, улучшенных добавлением высевки и золы, обеспечивающих образование в затвердевшей грунтосмеси высокопрочной и жесткой камневидной структуры, усиливающей сопротивляемость отремонтированных (восстановленных) элементов (откосов, гребня и др.) плотин и дамб к дефектообразованию, усовершенствованы отдельные технологические процессы. Разработана схема производства работ, осуществлен подбор состава грунтовых смесей с повышенными прочностными свойствами. Ремонт грунтовых плотин и дамб грунтовыми смесями, улучшенными высевкой и золой, обеспечит восстановленным (отремонтированным) откосам и гребню сооружений высокие показатели прочности (до 13-15 МПа) и водостойкости, повышая тем самым эффективность и качество проведенных ремонтно-восстановительных работ. 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. Использование высевки и золы-уноса для экономного расхода цемента в равнопрочных грунтобетонах в количестве соответственно 20-40 % и 4-6 % от массы грунтосмеси следует считать оптимальным. Уменьшение количества высевки ниже 20 % и увеличение дозировки золы свыше 6 % не обеспечивают затвердевшей грунтосмеси высокой прочности без увеличения расхода цемента.

Ключевые слова: технология, трещина, грунтосмесь, план эксперимента, уравнение регрессии.

**Ye. V. Vasilyeva** (FSBEE NPE “NSMA”)

## **REPAIR TECHNOLOGY FOR EARTH WATER-RETAINING CONSTRUCTIONS**

To control defects and damages of earth water-retaining constructions, the enhanced technology was developed. The technology includes repair works using soil mixtures improved by adding fines and ash. Those additives facilitate to form in hardened soil mixture high-strength and stiff calculus structure which reinforces the resistance of repaired (restored) elements (dam slope, crest of dam, and other) of dams for damage process. Several technological processes were improved as well. The scheme for work execution were developed, the selection of components for soil mixtures with high mechanical properties was made. The repair of earth dams using soil mixtures improved by adding fines and ash provides high indices of mechanical properties (up to 13-15 MPa) and water resistance, thereby increasing the efficiency and quality of carried out repair works. The dosage of cement and fines in high-strength (13-15 MPa) soil-concrete have to be not less than 8.0-10.0 % and not less than 25-30 % respectively. The optimal ratio of fines and fly ash for economic consumption of cement in full-strength soil-concretes is seemed to be 20-40 % and 4-6 % from the total mass of soil mixture respectively. While decreasing the ratio of fines lower than 20 % and increasing the dosage of ash higher than 6 %, high strength to hardened soil mixture can't be provided without increasing the content of cement.

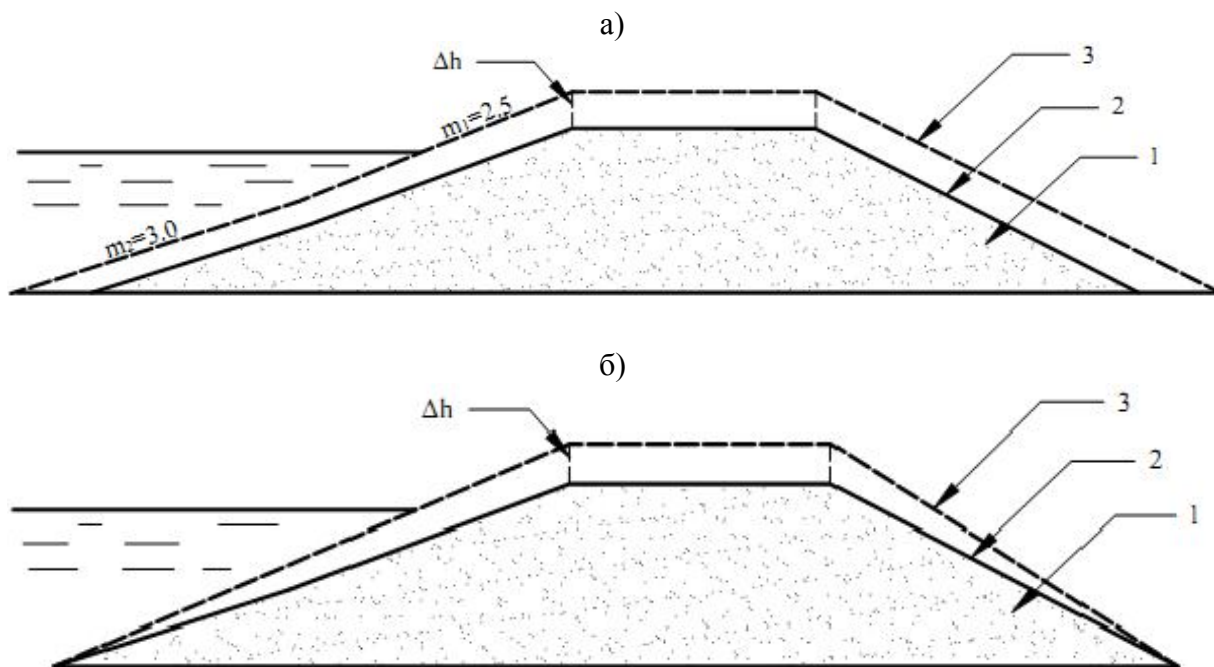
Keywords : technology, crack, soil mixture, experiment plan, regression equation.

Согласно мировому регистру плотин в мире построено более 100 тыс. водоподпорных сооружений. Среди них более 80 % составляют грунтовые плотины и дамбы, значительная часть которых относится к средне- и низконапорным [1, 2]. 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 [1-3].

Среди основных причин аварий и разрушений грунтовых водоподпорных сооружений следует назвать несвоевременное устранение дефектов (просадок гребня, обрушений и оползаний откосов, трещин, фильтрационных ходов и др.) и некачественное выполнение ремонтно-восстановительных работ из-за использования низкоэффективных технологий. Применяемые в настоящее время технологии ремонтно-восстановительных работ предусматривают производство досыпки тела плотин и восстановление обрушенных откосов грунтом того же состава, что и тело сооружения, а заделки трещин, фильтрационных ходов, нор и других подобных дефектов – им же или суглинком, глиной, смесью суглинка (глины) с навозом, мешками с грунтом и т. п. Но со временем из-за низких 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 путем их досыпки до требуемых отметок грунтосмесями, улучшенными высевкой и золой, способствующими образованию высокопрочной и водостойкой камневидной структуры в восстановленных элементах (откосах, гребне), обладающих повышенной сопротивляемостью к дефектообразованию [4].

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



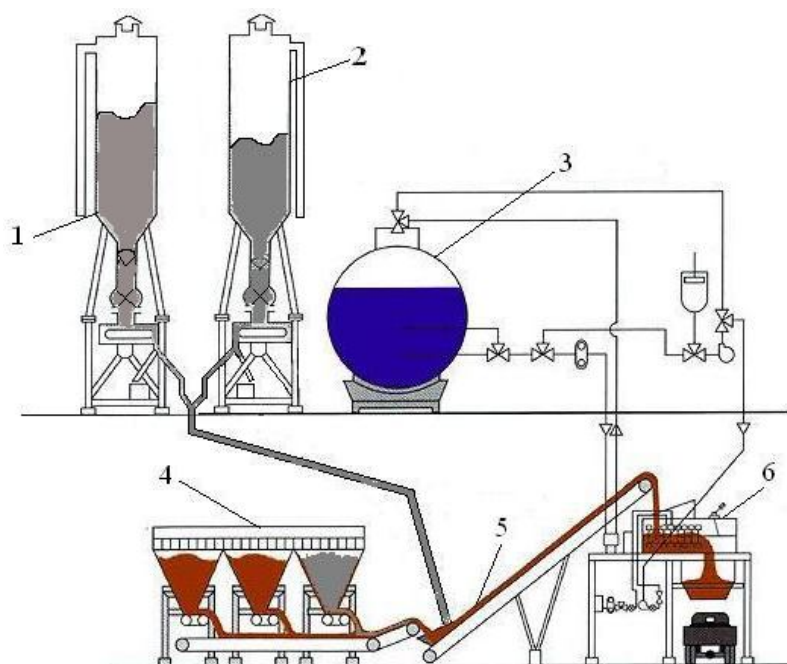
а, б – для случаев подъема высоты гребня плотины и ликвидации просадки гребня и откосов; 1 – плотина; 2, 3 – поперечное сечение плотины соответственно до и после проведения ремонтных работ

### Рисунок 1 – Схема поперечного сечения плотины

Целью исследования является разработка технологии ремонта низконапорных грунтовых плотин и дамб с использованием грунтоматериалов. Задачи исследований – усовершенствование отдельных технологических процессов, разработка схем производства работ, подбор состава грунтовых смесей с повышенными прочностными свойствами.

Для приготовления грунтосмеси рекомендуется использовать грунтосмесительную установку типа, например, ДС-50 с дополнительным бункером для золы (рисунок 2).

Перечень ремонтно-строительных операций по досыпке гребня и откосов плотины до требуемых (увеличенных, проектных) отметок приведен в таблице 1.



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

**Рисунок 2 – Технологическая схема модернизированной  
грунтосмесительной установки ДС-50**

Выбор средств механизации определяется размерами плотин (дамб) и их элементов, видом грунта, дальностью его перемещения и т. д.

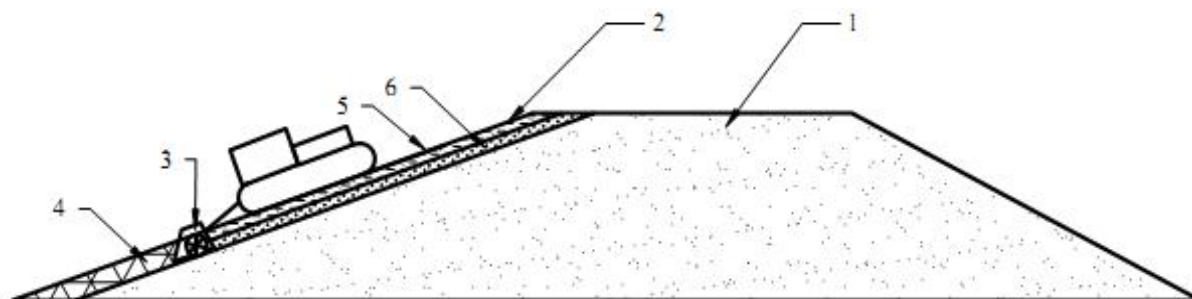
**Таблица 1 – Перечень ремонтно-восстановительных операций по  
досыпке гребня и откосов плотины до проектных отметок**

№ операции	Ремонтно-строительная операция	Средства механизации
1	2	3
1	Рыхление проезжего участка гребня в виде покрытия из гравийно-песчаной смеси	Навесной или прицепной рыхлитель на базе гусеничного 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	Вскрышные работы	Бульдозер или скрепер
6	Доувлажнение грунта в карьере до оптимальной влажности	Поливочная машина, автоцистерна
7	Разработка грунта в карьере и транспортирование его к грунтосмесительной установке	Скрепер, экскаватор и автосамосвалы, тракторные тележки

Продолжение таблицы 1

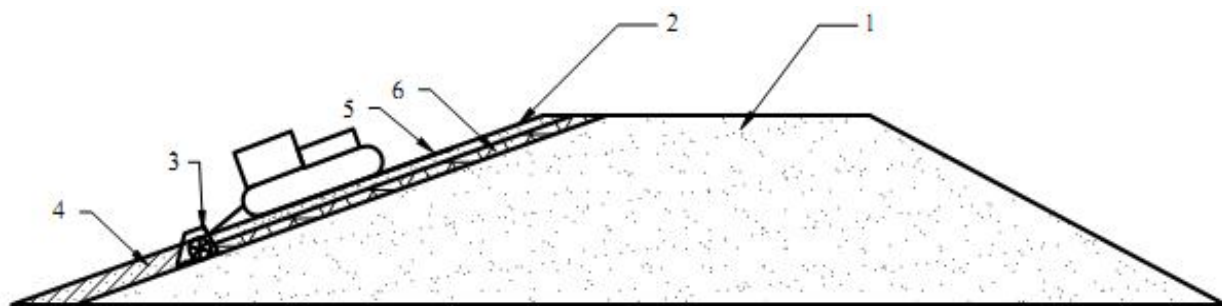
1	2	3
8	Доставка цемента, золы и высевки к месту приготовления грунтосмеси (к установке)	Автоцементовоз, автосамосвалы, тракторные тележки
9	Приготовление в грунтосмесительной установке грунтосмеси из грунтоцемента с добавлением золы и высевки	Грунтосмесительная установка
10	Доставка приготовленной грунтосмеси и укладка ее 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

При пологих откосах плотин ( $m = 4-6$ ) 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 высевок, 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 – измельченная и перемешанная фрезой смесь высевки с грунтом; 5 – высевок, 6 – грунт

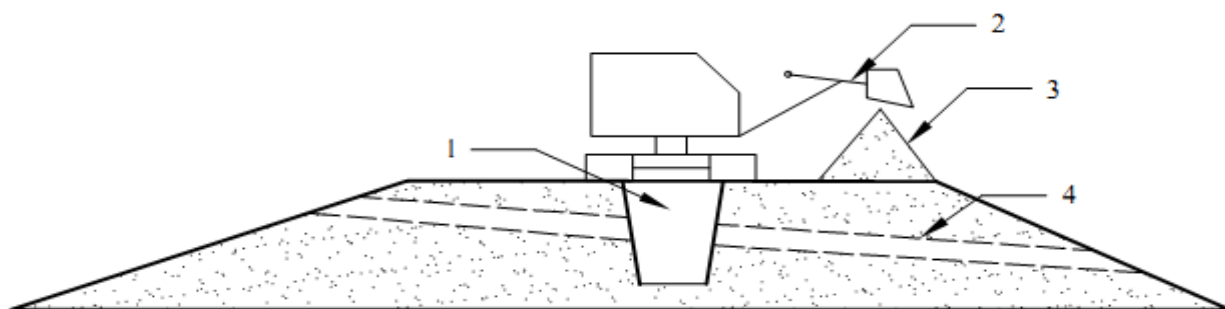
**Рисунок 3 – Схема перемишывания высевки с грунтом на откосе специальной фрезой**



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

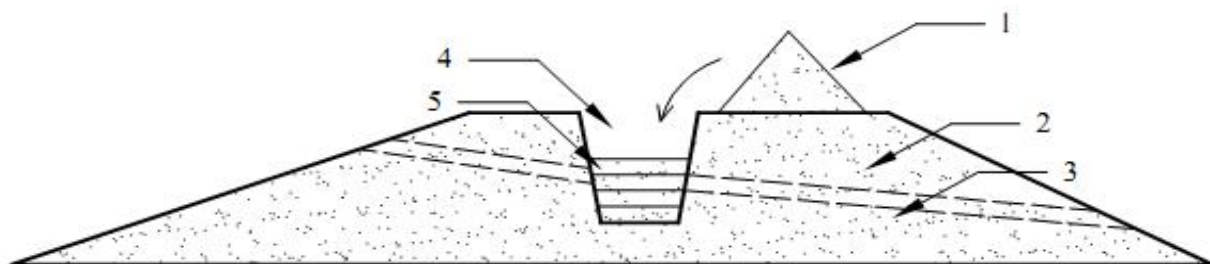
**Рисунок 4 – Схема перемешивания цемента и золы с высевкой и грунтом**

К опасным дефектам в грунтовых плотинах и дамбах относятся также норы землеройных животных и трещины, создающие условия для появления сосредоточенного движения воды и возможного прорыва плотин и дамб. Обнаруженные норы и трещины следует заделывать до поднятия уровня воды в верхнем бьефе (рисунки 5, 6).



1 – траншея; 2 – экскаватор; 3 – разработанный грунт; 4 – нора

**Рисунок 5 – Разработка грунта в траншее с превышением глубины над высотой норы (трещины)**



1 – доставленная грунтосмесь; 2 – плотина (дамба); 3 – нора (трещина); 4 – траншея; 5 – уплотненные слои грунтосмеси

**Рисунок 6 – Обратная засыпка траншеи (устройство замка) слоями**

При заделке нор и трещин эффективнее использовать не грунт, а грунтовую смесь в виде грунтоцемента с добавлением высевки и золы [4], что обеспечит высокие прочность, водо- и морозостойкость заделке (замку), а значит, снизит вероятность появления фильтрационных ходов, просачиваний воды через тело плотины или дамбы и их прорыва.

Состав ремонтно-строительных операций и средств механизации представлен в таблице 2.

**Таблица 2 – Перечень ремонтно-строительных операций по заделке нор и трещин**

№ операции	Ремонтно-строительная операция	Средства механизации
1	Выявление и обозначение нор или трещин	Лопаты, колья, мерная лента
2	Удаление разуплотненного грунта в местах их обнаружения	Лопаты, средства малой механизации
3	Укладка пластыря или устройство шпунтового ограждения (при высоком уровне воды в верхнем бьефе)	Брезент или пленка, пригрузка, шпунт, средства малой механизации
4	Разработка грунта в траншее с превышением глубины над высотой норы или трещины (рисунок 5)	Вручную или экскаватором
5	Доставка слабоводопроницаемого грунта, высевки, цемента и золы к грунтосмесительной установке	Автосамосвал, тракторная тележка, автоцементовоз
6	Приготовление в грунтосмесительной установке грунтосмеси из грунтоцемента с добавлением золы и высевки (рисунок 2)	Грунтосмесительная установка
7	Транспортирование грунтосмеси к траншее	Автосамосвал, тракторная тележка
8	Обратная засыпка траншеи (устройство замка) слоями (рисунок 6)	Вручную или средствами малой механизации
9	Послойное уплотнение грунтосмеси в траншее	Трамбовка ручная или механизированная
10	Разборка шпунтового ограждения, снятие пластыря	Автокран, экскаватор или вручную

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 [5] 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 от 3,0 до 15 % и от 40 до 85 % соответственно, что подтверждается результатами предварительных исследований и априорной информации о рациональном дозировании вышеуказанных компонентов грунтосмеси [6].

Для приготовления грунтовых смесей использовались материалы (компоненты) со следующими показателями: Новороссийский портландцемент марки 400; грунт – легкий слабоводопроницаемый суглинок; высевка – отход камнедробления известняка фракции 0-5 мм с модулем крупности  $M_{кр} = 2,98$ ; зола–унос сухого отбора с электрофильтров Новочеркасской ГРЭС. При этом соблюдались следующие условия: цемент + зола = 15 %, грунт + высевка = 85 %. В связи с этим состав грунтосмеси по опыту № 1 включал цемент, золу, грунт и высевку в следующем соотношении: 9,0 %; 6,0 %; 62,5 %; 22,5 %, по опыту № 2 – 3,0 %; 12,0 %; 62,5 %; 22,5 %, и т. д.

Условия кодирования и варьирования факторов представлены в таблице 3.

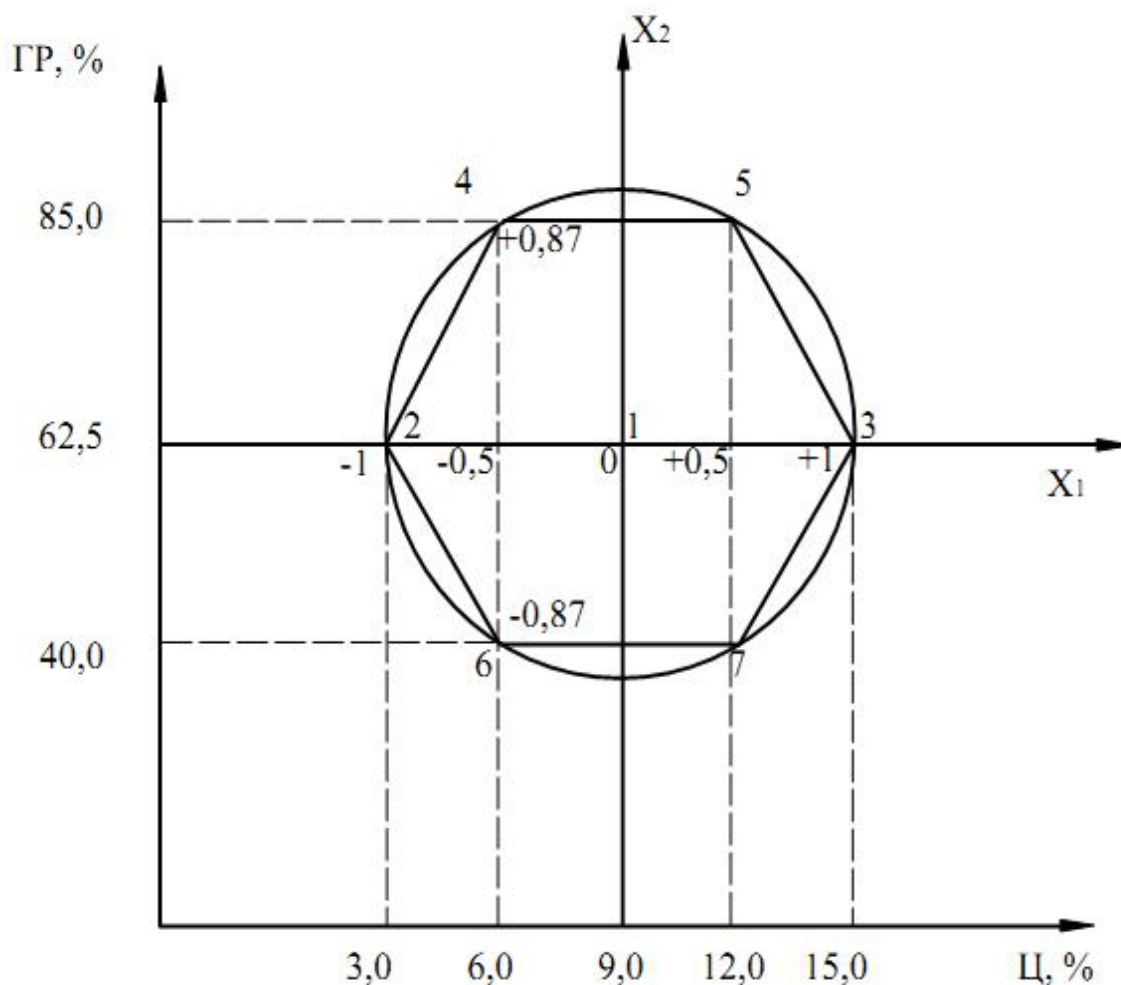
**Таблица 3 – Кодирование и варьирование факторов**

Фактор	Код $X_i$	Основной уровень $X_0$ , %	Интервал варьирования $\Delta X_i$	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 7.

Из рисунка 7 видно, что точки принятого плана эксперимента имеют координаты вершин правильного шестиугольника, построенного в пределах варьирования факторов  $\pm 1$  в кодированной форме. План удобен тем, что переход от кодированных значений факторов к натуральным и наоборот можно осуществить графически по соответствующим осям.





**Рисунок 7 – План эксперимента на шестиугольнике**

По результатам семи опытов (шесть вершин и центр шестиугольника) вычисляются неизвестные коэффициенты уравнения регрессии второго порядка:

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

где

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

$$b_i = \frac{1}{3} (i y); \quad (2)$$

$$b_{ij} = \frac{4}{3} (i j y); \quad (3)$$

$$b_{ii} = \frac{2}{3} (i i y) + \frac{5}{6} \sum_{i=1}^k (i i y) - (0 y). \quad (4)$$

Матрица и результаты эксперимента приведены в таблице 4.

**Таблица 4 – Реализация плана эксперимента**

Номер опыта	План		$X_1^2$	$X_2^2$	$X_1X_2$	Факторы		Прочность через 28 суток и после полного водонасыщения	
	$X_1$	$X_2$				$X_1$ (Ц)	$X_2$ (ГР)	$\bar{y}_R$	$\hat{y}_R$
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
$\sum x_i, y_i$	14,69	-6,28	31,26	33,72	0,62			78,19	

По формулам (1-4) 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:

$$\hat{y}_R = 13,21 + 4,90X_1 - 2,09X_2 - 3,2X_1^2 - 1,56X_2^2 + 0,83X_1X_2. \quad (5)$$

Анализ модели (5) произведен после определения ее типа и построения геометрического образа. Для этого использована общая теория поверхностей второго порядка. Принято:

$$b_0 - y = a_0, \quad b_{ij} = 2a_{ij}, \quad b_i = 2a_i, \quad b_{ii} = a_{ii}. \quad (6)$$

Инварианты кривой второго порядка составили:

- сумма коэффициентов при квадратичных членах:

$$S = b_{11} + b_{22} = -3,20 - 1,56 = -4,76;$$

- определитель, составленный из коэффициентов при старших членах:

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3,2 & 0,415 \\ 0,415 & -1,56 \end{vmatrix} = 4,82; \quad (7)$$

- определитель третьего порядка, составленный из всех коэффициентов:

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -3,2 & 0,415 & 2,45 \\ 0,415 & -1,56 & -1,05 \\ 2,45 & -1,05 & 13,21 \end{vmatrix} = 74,42. \quad (8)$$

С использованием инвариантов (6), (7) и (8) уравнение (5) приведено к удобной для анализа и геометрической интерпретации канонической форме:

$$\lambda_{1,2} = \frac{S}{2} \pm \sqrt{\frac{S^2}{4} - \delta} = -2,38 \pm 0,92. \quad (9)$$

Коэффициенты канонической формы вычислены через инварианты:

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

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

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

$$C = \frac{\Delta}{\delta} = \frac{74,42}{4,82} = 15,44. \quad (10)$$

С геометрической точки зрения переход к уравнению (9) означает перенос начала координат в центр кривой (поверхности) и поворот их на некоторый угол до совмещения с главными осями кривой (поверхностями) второго порядка.

С учетом вычисленных коэффициентов каноническая форма уравнения (5) примет вид:

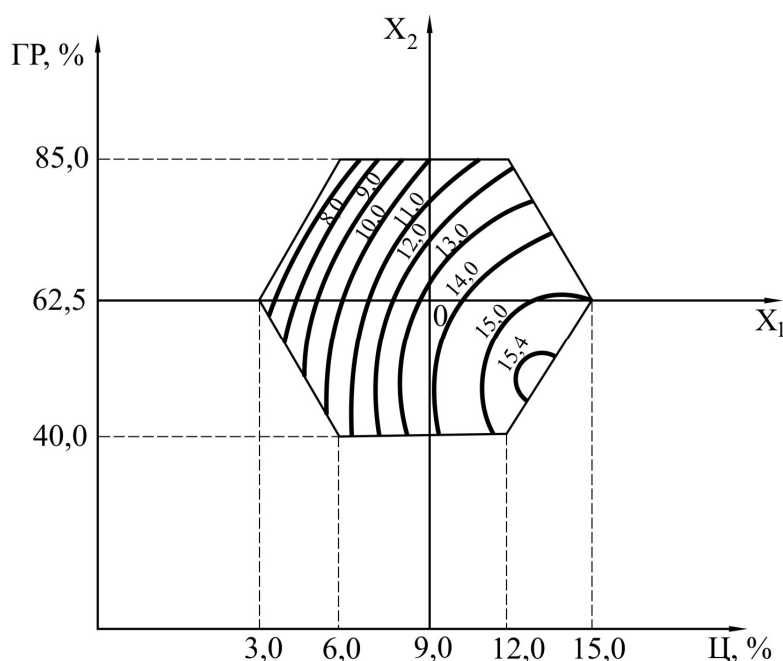
$$-1,46\bar{X}_1^2 - 3,30\bar{X}_2^2 + 15,44 = R_{28}. \quad (11)$$

По канонической форме (11) полуоси эллипсов определены следующим образом:

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

$$b = \sqrt{\frac{15,44 - R_{28}}{3,3}}. \quad (12)$$

Геометрический образ модели  $\hat{y}_R (R_{28})$  изображен на рисунке 11.



**Рисунок 8 – Геометрический образ модели  $\hat{y}_R$  прочности грунтобетона через 28 суток твердения и полного водонасыщения**

Анализ математической модели и ее графического представления 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) грун-

тобетонах 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 нижеприведенными 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–уноса 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.

#### **Список использованных источников**

1 Щедрин, В. Н. Вопросы контроля технического состояния и безопасности гидротехнических сооружений / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, Г. А. Сенчуков // Сб. тр. ФГНУ « РосНИИПМ». – Новочеркасск, 2003. – Ч. 1. – С. 207-220.

2 Щедрин, В. Н. О проблемах безопасности гидротехнических сооружений мелиоративного назначения / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 5. – С. 33-38.

3 Ачкасов, Г. П. Технология и организация ремонта мелиоративных гидротехнических сооружений / Г. П. Ачкасов, Е. С. Иванов. – М.: Колос, 1984. – 174 с.

4 Пат. 2419705 Российская Федерация, МПК № E02B 3/16 (2006.01). Способ устранения дефектов в дамбах из однородного грунта / Василье-

Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 1(13), 2014 г., [189-202]

ва Е. В., Федоров В. М.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «НГМА». – № 2009147689/21; заявл. 21.12.2009; опубл. 27.05.11, Бюл. № 15. – 4 с.

5 Вознесенский, В. А. Статистические методы планирования эксперимента в технико-экономических исследованиях / В. А. Вознесенский. – М.: Финансы и статистика, 1981. – 262 с.

6 Горельшев, Н. В. Материалы и изделия для строительства дорог / Н. В. Горельшев, И. Л. Гурячкова, Э. Р. Пинус. – М.: Транспорт, 1986. – 287 с.

---

**Васильева Елена Викторовна** – Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» (ФГБОУ ВПО «НГМА»), младший научный сотрудник.

Контактный телефон: 89085080528.

E-mail: karalenka5@yandex.ru

**Vasilyeva Yelena Viktorovna** – Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “Novocherkassk State Meliorative Academy” (FSBEE HPE “NSMA”), Junior Researcher.

Contact telephone number: 89085080528.

E-mail: karalenka5@yandex.ru