

УДК 631.459:631.434.6

UDC 631.459:631.434.6

**ПОДБОР ОПТИМАЛЬНОГО СОСТАВА
КОМПОЗИЦИИ ИЗ СТРУКТУРООБРАЗУЮ-
ЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ БОРЬБЫ С ИРРИ-
ГАЦИОННОЙ ЭРОЗИЕЙ**

**SELECTING THE OPTIMAL COMPOSITION
OF STRUCTURE-FORMING MATERIALS TO
CONTROL IRRIGATION EROSION**

Нозадзе Леван Резоевич
м.н.с., аспирант
ФГБНУ «РосНИИПМ» г. Новочеркасск, Россия

Nozadze Levan Resoyevich
junior researcher, postgraduate student
*Russian Research Institute of Land Improvement Prob-
lems, Novocherkassk, Russia*

В статье для борьбы с ирригационной эрозией предложено использовать искусственное оструктурирование почв с помощью структурообразующих материалов. Проведены исследования по выявлению влияния процентного содержания фракционного состава каждого из компонентов на емкость поглощения почвы

To control irrigation erosion, the artificial aggregation of soil by structure-forming materials was proposed in the article. The research was conducted for establishing the impact of the percent content of each fraction on soil cation exchange capacity

Ключевые слова: КОМПОЗИЦИЯ, МЕЛИОРАНТ, СТРУКТУРООБРАЗОВАТЕЛЬ, ГРАНУЛЫ, ФРАКЦИОННЫЙ СОСТАВ, ИРРИГАЦИОННАЯ ЭРОЗИЯ

Keywords: COMPOSITION, SOIL AMENDMENT, STRUCTURE-FORMING MATERIAL, GRAN-ULES, FRACTIONAL CONTENT, IRRIGATION EROSION

Одной из главных экологических проблем земледелия Ростовской области является истощение почв. Это связано с тем, что вынос питательных веществ из почв с урожаями сельскохозяйственных культур лишь на 20-40 % компенсируется за счет удобрений. По сравнению с 1990 годом в несколько раз сократилось применение минеральных удобрений, а органических – в 17-20 раз. Диспаритет цен на сельскохозяйственную продукцию и удобрения делает непосильным их приобретение многими сельхозтоваропроизводителями. Также под воздействием плоскостной эрозии происходят процессы выноса органических и минеральных удобрений из почв с образованием поверхностных стоков [1].

В связи с этим возникает вопрос о поисках альтернативных источников элементов питания и средств для улучшения свойств почв из местных природных ресурсов и техногенного сырья. В Ростовской области к числу наиболее распространенных местных материалов относятся бентонитовая глина, терриконовая порода и известняк-ракушечник. Положительный опыт применения данных материалов имеется на черноземах южном и обыкновенном.

Для защиты почв от водной эрозии нами предлагается использовать в составе противоэрозионного комплекса такое мероприятие, как искусственное оструктурирование почвы с помощью композиции из структурообразующих материалов, состоящей из: терриконовой породы, бентонитовой глины, известняка-ракушечника, керамзитового отсева, разработанной сотрудниками ФГБНУ «РосНИИПМ». Оптимальный состав структурообразующих материалов: терриконовая порода – 10 %, бентонитовая глина – 30 %, известняк-ракушечник – 55 %, керамзитовый отсев – 5 % [2].

Известно, что максимальный эффект по оструктурированию почвы в результате применения композиции из структурообразующих материалов можно достичь за счет подбора оптимального фракционного состава. Для решения данной задачи нами были проведены исследования по выявлению влияния процентного содержания фракционного состава каждого из ее компонентов на емкость поглощения почвы.

Так по результатам проведенных исследований и на основании априорной информации установлено, что на емкость поглощения почвы существенное влияние оказывают все компоненты композиции [3]:

- бентонитовые глины, которые обладают высокой связующей способностью и водопоглощаемостью, увеличивают почвенную емкость поглощения нитратов и способствуют предотвращению их вымывания;

- терриконовая порода, отличительным признаком которой является содержание в ней кальция, железа, серы, что при внедрении в почвенно-поглощительный комплекс благоприятно влияет на оструктурирование почвы и тем самым увеличивает влагоемкость почвы, делают ее более водопроницаемой;

- известняк-ракушечник обогащает почвы коллоидными частицами, увеличивает ее влагоемкость, улучшает механическую структуру почвы, влажность и аэрируемость;

- керамзитовый отсев, который получают путем обжига легкоплав-

кой глины, имеет пористую структуру, легко впитывает воду и отдает влагу, если в почве ощущается ее недостаток.

Далее проведем исследования по выявлению оптимального фракционного состава каждого из компонентов композиции.

Подбор размера гранул бентонитовой глины.

При использовании бентонитовых глин в качестве компонента сорбент-мелиоранта фракционный состав ее рассматривается как трехкомпонентная система, состоящая из трех фракций: первая – с размером частиц от 0,315 до 1,5 мм; вторая – от 1,5 до 2,5 мм и третья – от 2,5 до 5 мм. Для такой системы можно построить треугольную диаграмму типа «состав-свойство» методом планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе [4], если относительное содержание в общем количестве гранул каждой из трех указанных фракций рассматривать как одну из переменных x_i при выполнении условия:

$$\sum_{1 \leq i \leq 3} x_i = 1, \quad x_i \geq 0. \quad (1)$$

Для трехкомпонентных смесей используется симплекс в виде правильного треугольника. Каждой точке такого симплекса соответствует смесь определенного состава, и наоборот, любой комбинации относительных содержаний (от 0 до 1) каждого из трех компонентов смеси соответствует определенная точка симплекса.

Если изучаемая трехкомпонентная смесь удовлетворяет условию (1), симплекс-решетчатые планы Шеффе позволяют в результате постановки сравнительно небольшого числа опытов получать математические модели изучаемой функции отклика в виде так называемого приведенного полинома, который позволяет построить требуемую диаграмму «состав-свойство». Для изучения влияния неоднородности гранул бентонитовых глин на емкость поглощения были выбраны пределы варьирования содержания отдельных фракций с учетом их фактического колебания в Тарасов-

ском месторождении по данным многолетних наблюдений: относительное содержание первой фракции (x_1) – 0,2...0,6; второй фракции (x_2) – 0,3...0,7; третьей фракции (x_3) – 0,1...0,5.

Поскольку при такой постановке задачи не выполняется условие (1), исследованию подлежит не весь симплекс, а только некоторая симплексная подобласть. Для построения диаграммы «состав-свойство» на выделенной симплексной подобласти необходима ее предварительная трансформация путем перехода к новой системе координат (z_1, z_2, z_3).

Если в трехкомпонентной системе все переменные имеют нижние границы (в нашем случае $x_1 \geq 0,2$; $x_2 \geq 0,3$; $x_3 \geq 0,1$), то подобластью является равносторонний треугольник, стороны которого параллельны сторонам обычного симплексного (концентрационного) треугольника. Приняв вершины выделенной треугольной подобласти за самостоятельные компоненты (псевдокомпоненты), для подобласти получим:

$$\begin{aligned} 0 \leq z_i \leq 1, \quad (i = 1, 2, 3), \\ z_1^{(u)} + z_2^{(u)} + z_3^{(u)} = 1, \end{aligned} \quad (2)$$

где i – любая точка подобласти.

Относительно новых переменных z_1, z_2, z_3 , удовлетворяющих условиям (2) могут быть использованы любые планы, применяемые при исследовании полного симплекса. Однако реализация экспериментов по таким условным планам, построенным в системе координат псевдокомпонентов, невозможна. Для проведения экспериментов необходимо задать условия проведения каждого опыта в координатах реальных исходных компонентов x .

Трансформирующая зависимость между координатными системами (x_1, x_2, x_3) и (z_1, z_2, z_3) в общем виде задается матричным уравнением:

$$x = A \cdot z. \quad (3)$$

В нашем случае при указанных выше ограничениях переменных

трансформирующие соотношения будут выглядеть как:

$$z_1 = \frac{x_1 - 0,2}{1 - (0,2 + 0,3 + 0,1)}; z_2 = \frac{x_2 - 0,3}{1 - (0,2 + 0,3 + 0,1)}; z_3 = \frac{x_3 - 0,1}{1 - (0,2 + 0,3 + 0,1)}. \quad (4)$$

Таким образом, матрица планирования для локальных симплексов, характеризующих изучаемую симплексную подобласть, состоит из двух частей: с одной стороны экспериментальные точки даются в координатах псевдокомпонентов, что позволяет с использованием известных формул симплекс-решетчатых планов определить коэффициенты приведенного полинома, но с переменными z_i вместо x_i ; с другой – координаты этих же экспериментальных точек приводятся в исходных координатах x_i , чтобы можно было составлять реальные смеси с натуральными компонентами.

Используя трансформирующие соотношения (4), можно перейти от приведенного полинома в псевдокомпонентах к полиномиальной модели исследуемой системы в исходных координатах, более удобной для практических расчетов.

С учетом изложенного решалась задача изучения влияния неоднородности бентонитовых глин по гранулометрическому составу на емкость поглощения.

В качестве отклика была принята емкость поглощения бентонитовых глин, которая определялась из условия обеспечения адсорбционной способности по результатам двух дублирующих опытов в каждой точке плана.

В таблице 1 представлены матрицы планирования в псевдокомпонентах z_i и в исходной системе координат x_i .

Таблица 1 – Композиционное планирование эксперимента

№ опыта	План в псевдокомпонентах			План в исходных компонентах			Отклики y_i
	z_1	z_2	z_3	x_1	x_2	x_3	
1	1	0	0	0,60	0,30	0,10	y_1
2	0	1	0	0,20	0,70	0,10	y_1
3	0	0	1	0,20	0,30	0,50	y_1
4	0,5	0,5	0	0,40	0,50	0,10	y_{12}
5	0	0,5	0,5	0,20	0,50	0,30	y_{23}
6	0,5	0	0,5	0,40	0,30	0,30	y_{13}
7	0,333	0,333	0,333	0,34	0,43	0,23	y_{123}
8	0,167	0,666	0,167	0,15	0,25	0,60	y_8
9	0,666	0,167	0,167	0,40	0,45	0,15	y_9
10	0,167	0,167	0,666	0,25	0,45	0,30	y_{10}

Особенностью представленного в таблице 1 планирования эксперимента является его композиционность, учитывающая принцип «максимальной простоты» [4]. В данной таблице первые три опыта, соответствующие координатам вершин симплексного треугольника в псевдокомпонентах z_i (рисунок 1), дают возможность получить линейную модель функции отклика вида:

$$y = \sum_{1 \leq i \leq 3} \beta_i \cdot z_i \cdot \tag{5}$$

В случае неадекватности модели по t -критерию ставятся дополнительное три опыта в точках №№ 4, 5, 6. Совокупность полученных в опытах точек соответствует симплексному плану для получения квадратичной модели вида:

$$y = \beta_1 z_1 + \beta_2 z_2 + \beta_3 z_3 + \beta_{12} z_1 z_2 + \beta_{13} z_1 z_3 + \beta_{23} z_2 z_3 \cdot \tag{6}$$

Расходы бентонитовой глины при изготовлении композиции из структурообразующих материалов, вычисленные в соответствии с относительным содержанием размеров гранул по плану в исходных компонентах x_i , а также результаты реализации плана эксперимента, приведены в таблице 2.

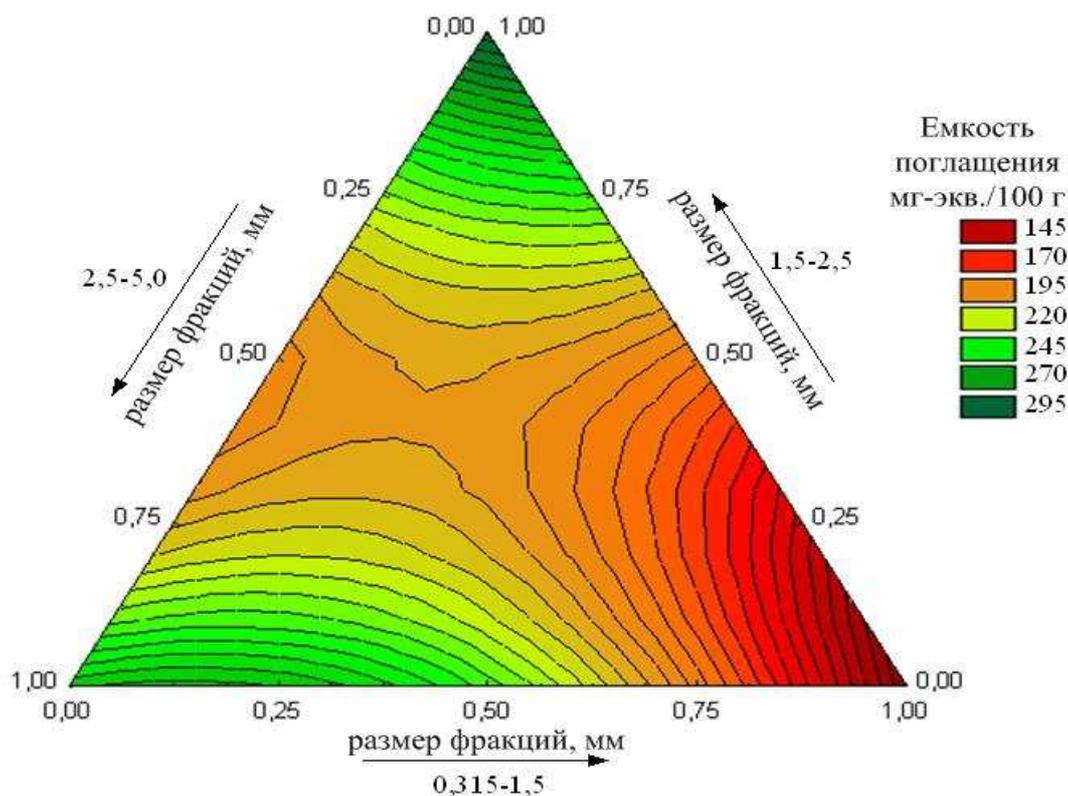


Рисунок 1 – Диаграмма зависимости емкости поглощения от размера гранул бентонитовой глины

Таблица 2 – Условия и результаты эксперимента

№ опыта по плану	Расход гранул бентонитовой глины, т/га (составляет 30 % в составе композиции)			Емкость поглощения, мг-экв./100 г
	0,315-1,5 мм	1,5-2,5 мм	2,5-5 мм	
1	864	432	144	170
2	288	1008	144	270
3	288	432	720	280
4	576	720	144	262
5	288	720	432	267
6	576	432	432	248
7	480	620	340	145
8	216	360	864	179
9	576	648	216	194
10	360	648	432	271

Обработка экспериментальных данных по результатам первых трех опытов дала линейную модель вида:

$$y = 170z_1 + 270z_2 + 280z_3, \tag{7}$$

которая оказалась неадекватной при проверке по t – критерию.

В результате обработки данных по шести опытным точкам получена квадратичная модель вида:

$$y = 170z_1 + 270z_2 + 280z_3 + 45z_1z_2 - 12z_1z_3 - 17z_2z_3. \quad (8)$$

Для проверки адекватности полученной модели использованы экспериментальные данные по опытным точкам №№ 7-10 неиспользованных для вычисления коэффициентов уравнения (8). Расчетные значения откликов в проверочных точках 7-10 определены подстановкой координат опытных точек в псевдокомпонентах в уравнение (8). Вспомогательные данные для проверки адекватности модели приведены в таблице 3. Адекватность модели по t -критерию проверялась в опытной точке № 7, т. к. именно в этой точке, как видно из таблицы 3, наблюдаются наибольшие расхождения между опытными данными и предсказаниям по модели.

Табличное значение t -критерия при уровне значимости $\alpha = 0,05$ и числе степеней свободы с учетом двойного дублирования опытов в десяти точках плана, составляет 2,09.

Таблица 3 – Данные для оценки адекватности модели (8)

№ опытных точек по плану	Значение отклика Y (по таблице 1)	Расчетный отклик Y_u	Разность $ Y - Y_u $
7	145	147,1	2,1
8	179	178,2	0,8
9	194	192,8	1,2
10	271	272,9	1,9

Поскольку выполняется условие $t_7 < t$ -критерия (табличное значение t -критерия превосходит расчетное), модель второго порядка (8) адекватно описывает экспериментальные данные, и нет необходимости строить модель более высокого порядка. Диаграмму зависимости емкости поглощения от размера гранул бентонитовой глины строим по результатам обработки представленных данных в программе STATISTICA.

Таким образом, нами получена зависимость емкости поглощения от размера гранул бентонитовой глины:

$$E = 122,98x_1 + 389,28x_2 + 41,95x_3 - 366,50x_1x_2 + 647,54x_1x_3 + 172,63x_2x_3. \quad (9)$$

Анализ построенной диаграммы (рисунок 1) и модели (9), исследуемой функции отклика, позволяет сделать следующие выводы:

- в пределах исследованной области наименьшую емкость поглощения имеют гранулы размером от 0,315 до 1,5 мм, наибольшую емкость поглощения – от 2,5 до 5,0 мм;

- судя по величине коэффициентов в модели (8), наибольшее влияние на снижение емкости поглощения оказывает относительное содержание гранул размером 0,315-1,5 мм;

- в изученных пределах изменения размера гранул за счет оптимизации соотношения между отдельными фракциями, емкость поглощения может быть увеличена более чем на 20 %;

- с использованием полученной диаграммы нами выбран состав бентонитовых глин, включающий гранулы размером: 20 % – 0,315-1,5 мм; 30 % – 1,5-2,5 мм и 50 % – 2,5-5,0 мм.

Подбор размера фракций керамзитового отсева

Фракционный состав керамзитового отсева неоднороден по своему составу. С помощью метода планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе (подробно изложен при подборе размера гранул бентонитовой глины) нами были проведены исследования по выявлению влияния процентного содержания фракций на емкость поглощения, которые показали, что наиболее эффективный диаметр частиц более 0,25 мм, и фракционный состав представляет собой трехкомпонентную систему, состоящую из трех фракций: первая (x_1) – с размером частиц от 0,315 до 0,5 мм; вторая (x_2) – от 0,5 до 0,8 мм и третья (x_3) – от 0,8 до 1 мм. Для оценки воздействия количественного содержания фракций на емкость поглощения проведено шесть опытов (таблица 4).

Обработка полученных данных при помощи специализированной программы STATISTICA позволила получить спектральную поверхность регрессии, позволяющую определить зависимость емкости поглощения от размера фракций керамзитового отсева (рисунок 2).

Таблица 4 – Условия и результаты эксперимента

№ опыта по плану	Расход гранул керамзитового отсева, т/га (составляет 5 % в составе композиции)			Емкость поглощения, мг-экв./100 г
	0,315-0,5	0,5-0,8 мм	0,8-1 мм	
1	144	72	24	115
2	48	168	24	136
3	48	72	120	108
4	96	120	24	152
5	48	120	72	145
6	96	72	72	123
7	81,6	103,2	55,2	119
8	36	60	144	128
9	96	108	36	134
10	60	108	72	127

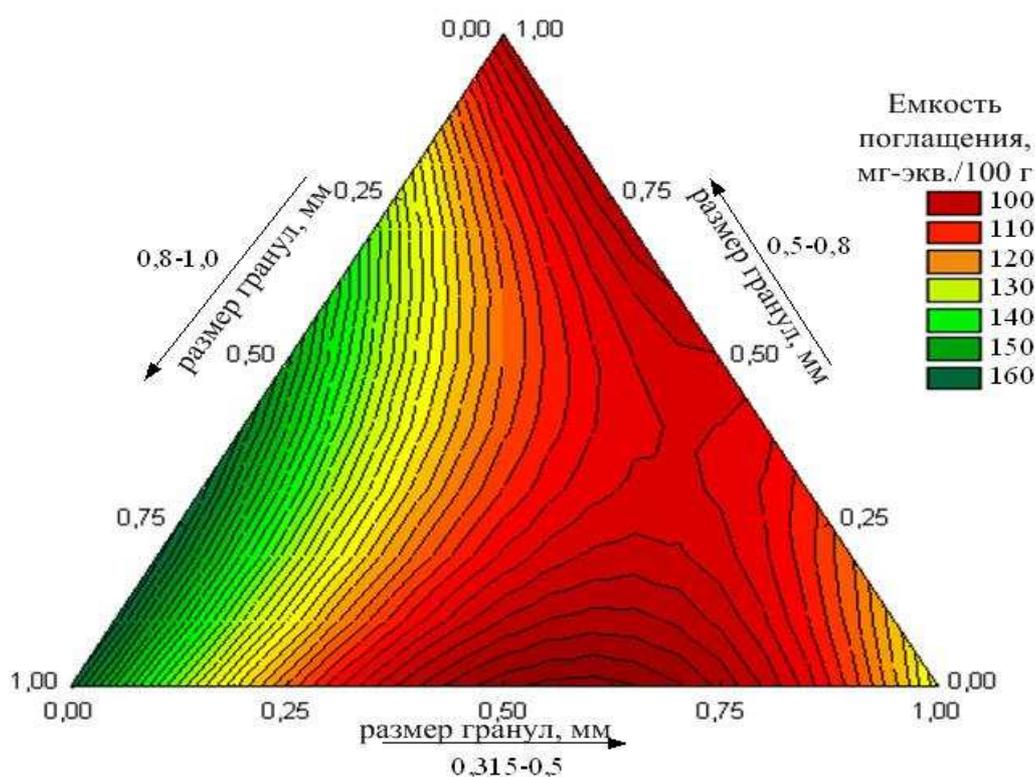


Рисунок 2 – Диаграмма зависимости емкости поглощения от размера фракций керамзитового отсева

Таким образом, нами получена зависимость емкости поглощения от размера гранул керамзитового отсева:

$$E = 21,15x_1 + 89,40x_2 + 142,09x_3 + 398,52x_1x_2 - 171,40x_1x_3 + 78,72x_2x_3. \quad (10)$$

Анализ построенной диаграммы (рисунок 2) и квадратичной модели (10) позволил сделать следующие выводы: в пределах исследованной области наименьшую емкость поглощения имеют гранулы размером 0,8-1,0 мм. Наибольшая емкость поглощения соответствует фракции от 0,5 до 0,8 мм. С использованием полученной диаграммы нами выбран состав керамзитового отсева, включающий гранулы размером: 40 % – 0,315-0,5 мм; 50 % – 0,5-0,8 мм и 10 % – 0,8-1,0 мм.

Подбор размера фракций известняка-ракушечника.

Исследования влияния процентного содержания фракционного состава известняка-ракушечника на емкость поглощения показали, что он неоднороден по своему составу и наиболее эффективный диаметр частиц известняка-ракушечника более 5,0 мм и состоит из трех фракций: первая – с размером частиц от 5,0 до 6,5 мм; вторая – от 6,5 до 8,5 мм и третья – от 8,5 до 10 мм. С помощью метода планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе (подробно изложен при подборе размера гранул бентонитовой глины) для оценки воздействия количественного содержания фракций на емкость поглощения, проведено шесть опытов (таблица 5).

Таблица 5 – Условия и результаты эксперимента

№ опыта по плану	Расход фракций известняка-ракушечника, т/га (составляет 55 % в составе композиции)			Емкость поглощения, мг-экв./100 г
	5-6,5 мм	6,5-8,5 мм	8,5-10 мм	
1	1320	1056	264	296
2	528	1848	264	300
3	528	1056	1056	287
4	924	1452	264	269
5	528	1452	660	293
6	924	1056	660	198
7	792	1320	528	250
8	396	660	1584	227
9	1056	1188	396	236
10	660	1188	792	218

Обработка полученных данных при помощи специализированной программы STATISTICA позволила получить спектральную поверхность регрессии, позволяющую определить зависимость емкости поглощения от

размера фракций известняка-ракушечника (рисунок 3).

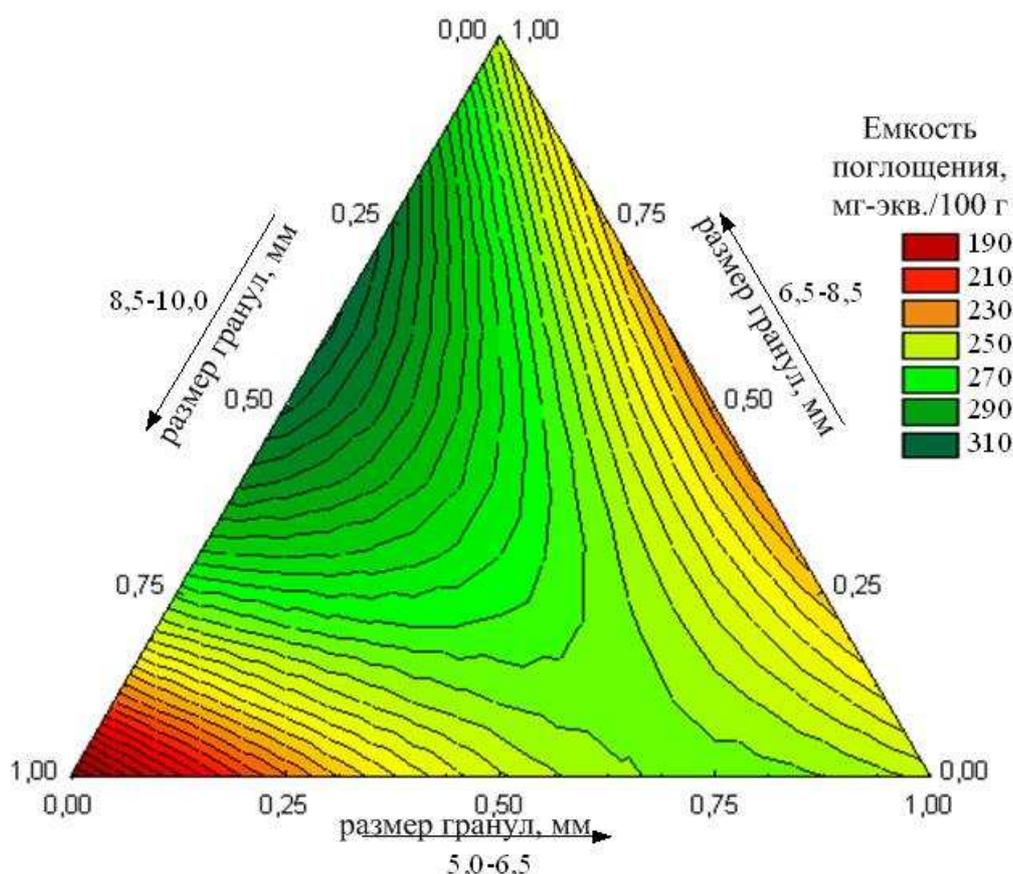


Рисунок 3 – Диаграмма зависимости емкости поглощения от размера фракций известняка-ракушечника

Таким образом, нами получена зависимость емкости поглощения от размера гранул известняка-ракушечника:

$$E = 1096,49x_1 + 336,97x_2 + 337,64x_3 - 1401,98x_1x_2 - 3714,36x_1x_3 + 1121,88x_2x_3 \quad (11)$$

Анализ построенной диаграммы (рисунок 3) и квадратичной модели (11) позволил сделать следующие выводы: в пределах исследованной области наименьшую емкость поглощения имеют гранулы размером 5,0-6,5 мм. Наибольшая емкость поглощения соответствует фракции от 6,5 до 8,5 мм. С использованием полученной диаграммы нами выбран состав известняка-ракушечника, включающий гранулы размером: 20 % – 5,0-6,5 мм; 70 % – 6,5-8,5 мм и 10 % – 8,5-10,0 мм.

Подбор размера фракций терриконовой породы.

Исследования влияния процентного содержания фракционного состава терриконовой породы на емкость поглощения показали, что он неоднороден по своему составу, и наиболее эффективен диаметр частиц терриконовой породы более 0,5 мм, и состоит из трех фракций: первая – с размером частиц < 1,0 мм; вторая – от 1,0 до 1,5 мм и третья – от 1,5 до 2,0 мм. С помощью метода планирования эксперимента с использованием симплекс-решетчатых планов Шеффе (подробно изложен при подборе размера гранул бентонитовой глины) для оценки воздействия количественного содержания данных фракций на емкость поглощения проведено шесть опытов (таблица 6).

Таблица 6 – Условия и результаты эксперимента

№ опыта по плану	Расход фракций терриконовой породы, т/га (составляет 10 % в составе композиции)			Емкость поглощения, мг-экв./100 г
	< 1,0 мм	1,0-1,5 мм	1,5-2,0 мм	
1	240	192	48	254
2	96	336	48	238
3	96	192	192	217
4	168	264	48	275
5	96	264	120	247
6	168	192	120	173
7	144	240	96	226
8	72	120	288	240
9	192	216	72	231
10	120	216	144	214

Обработка полученных данных при помощи специализированной программы STATISTICA позволила получить спектральную поверхность регрессии, позволяющую определить зависимость емкости поглощения от размера фракций терриконовой породы (рисунок 4).

Таким образом, нами получена зависимость емкости поглощения от размера гранул терриконовой породы:

$$E = 141,48x_1 - 13,68x_2 + 558,97x_3 + 1254,56x_1x_2 - 2890,74x_1x_3 + 660,78x_2x_3. \quad (12)$$

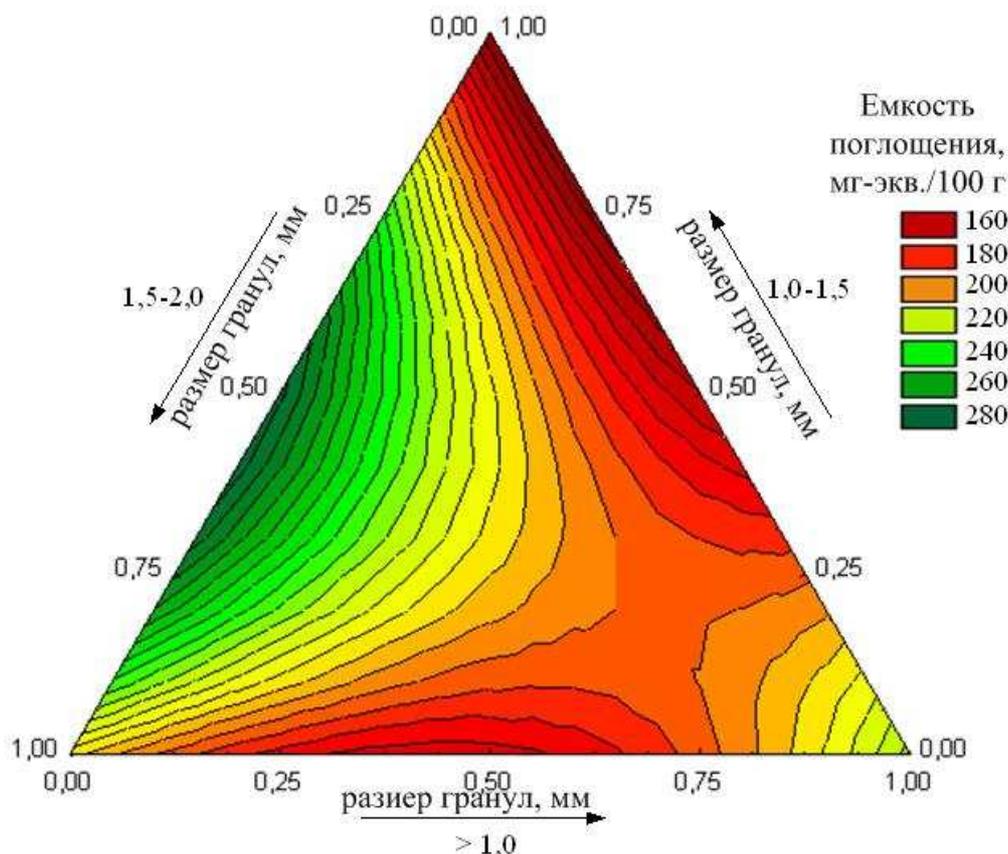


Рисунок 4 – Диаграмма зависимости емкости поглощения от размера фракций терриконовой породы

Анализ построенной диаграммы (рисунок 4) и квадратичной модели (12) позволил сделать следующие выводы: в пределах исследованной области наименьшую емкость поглощения имеют гранулы размером 1,5-2,0 мм. Наибольшая емкость поглощения соответствует фракции от 1,0 до 1,5 мм. С использованием полученной диаграммы нами выбран состав известняка-ракушечника, включающий гранулы размером: 35 % – менее 1,0 мм; 55 % – 1,0-1,5 мм и 10 % – 1,5-2,0 мм.

В современных условиях экономического состояния мелиоративной отрасли необходимо использовать новые мелиоративные приемы, которые позволяют при минимальных затратах получить максимальную прибыль, обеспечивая при этом экологическую защиту орошаемых почв. Учитывая данные условия, весьма эффективным мероприятием по борьбе с иррига-

ционной эрозией является искусственное оструктурирование почв. Предложенный состав композиции из сруктурообразующих материалов не требует организации специального производства, эффективно оструктурирует почвы и характеризуется невысокой стоимостью приготовления. С использованием полученных уравнений (9-12) для практического использования был выбран состав композиции, включающий 15 % песчаной и 85 % крупнозернистой фракций.

Список литературы

- 1 Степанова, Т. Г. Мелиорация почв на большеуклонных участках при орошении дождеванием: Дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск, 2009. – 191 с.
- 2 Нозадзе, Л. Р. Пути повышения эффективности орошаемого земледелия: сб. науч. тр. // ФГБНУ «РосНИИПМ». – Вып. 48. – Новочеркасск: «Лик», 2012. – 125 с.
- 3 Васильев, С. М. Повышение устойчивости и эффективности использования агроландшафтов аридной зоны в условиях постоянного и циклического орошения / С. М. Васильев // Изв. вузов. Сев.-Кавк. регион. серия: Техн. науки. – Ростов-н/Д., 2006. – 364 с.
- 4 Зедгендзе, И. Г. Планирование эксперимента для исследования многокомпонентных систем. М: Наука, 1976. 390 с.

References

- 1 Stepanova, T. G. Melioracija pochv na bol'sheuklonnyh uchastkah pri oroshenii dozhdevaniem: Dis. ... kand. tehn. nauk. Novoчерkassk, 2009. – 191 s.
- 2 Nozadze, L. R. Puti povysheniya jeffektivnosti oroshaemogo zemledelija: sb. nauch. tr. // FGBNU «RosNIIPM». – Vyp. 48. – Novoчерkassk: «Lik», 2012. – 125 s.
- 3 Vasil'ev, S. M. Povyshenie ustojchivosti i jeffektivnosti ispol'zovanija agrolandshaftov aridnoj zony v uslovijah postojannogo i ciklicheskogo oroshenija / S. M. Vasil'ev // Izv. vuzov. Sev.-Kavk. region. serija: Tehn. nauki. – Rostov-n/D., 2006. – 364 s.
- 4 Zedgenidze, I. G. Planirovanie jeksperimenta dlja issledovanija mnogokomponentnyh sistem. M: Nauka, 1976. 390 s.