

решения / А. С. Роскошная, Л. Н. Медведева // Современное экологическое состояние природной среды и научно-практические аспекты рационального природопользования: материалы III междунар. науч.-практ. интернет-конф. / ФГБНУ «ПНИИАЗ». – Солёное Займище, 2018. – С. 248–254.

3 Белых, Д. В. Использование умных технологий в сельском хозяйстве на конвергентной платформе Smart Agriculture / Д. В. Белых, Л. Н. Медведева, А. С. Роскошная // Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. – 2018. – № 1(69). – С. 89–94.

4 Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: крат. курс лекций / сост. А. М. Эфендиев; ФГБОУ ВПО «Саратовский ГАУ». – Саратов, 2014. – 94 с.

5 Альтернативная энергетика: Индия [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://energyland.info/news-show-mir-alternate-146068.html>, 2018.

6 Нагалецкий, Э. Ю. Региональная мелиоративная география. Краснодарский край: монография / Э. Ю. Нагалецкий, Ю. Я. Нагалецкий, И. Н. Папенко. – Краснодар: КубГАУ, 2013. – 280 с.

7 Пригородная оросительная система [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://kmvh.ru/mhm3.html>, 2018.

8 Ткачев, А. А. Анализ результатов расчета переходных гидравлических процессов для способа активного управления водораспределением на примере магистрального канала Пригородной оросительной системы г. Краснодара / А. А. Ткачев // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2011. – № 4. – С. 116–120.

9 Данные мониторинга водных объектов [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://gmvo.skniivh.ru.html>, 2018.

10 Техничко-эксплуатационная карта мелиоративной системы за 2015 год [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://mcx-dm.ru/gts/7902?report=tek¤t_id=88956, 2018.

11 Тарифы на электроэнергию для Краснодара и Краснодарского края с 1 января 2018 года [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://energo-24.ru/authors/energo-24/12827.html>, 2018.

12 Наземная фотоэнергетика [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://npp-kvant.ru/?features=наземная-фотоэнергетика.html>, 2018.

13 Солнечная батарея СНН 200W-72М [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://al-energy.ru/magazin/product/solnechnaya-batareya-chn-200w-72m>, 2018.

УДК 626.826:627.824

Е. О. Складенко, П. С. Матюшенко

Новочеркасский инженерно-мелиоративный институт имени А. К. Кортунова – филиал Донского государственного аграрного университета, Новочеркасск, Российская Федерация

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ ФИЛЬТРАЦИИ ЧЕРЕЗ ОСНОВАНИЕ ГРУНТОВОЙ ПЛОТИНЫ С УСТРОЙСТВОМ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЗАВЕС МЕТОДОМ ЭГДА

Целью исследований являлась оценка эффективности работы противотрационных стен в грунте основания грунтовой плотины. Проведены экспериментальные исследования фильтрации через грунтовую плотину с ПФУ в основании, в т. ч. с учетом пространственного характера движения фильтрационного потока, и на этой основе подготовлены предложения по совершенствованию методики исследования методом ЭГДА. Разработан способ расчета фильтрации в основании грунтовой плотины с ПФУ в виде цементационной завесы при наличии различных повреждений.

Произведен анализ, и построена геометрическая модель, позволяющая оценивать эффективность ПФУ при образовании областей просачивания на разных глубинах.

Ключевые слова: фильтрация, ПФУ, противофильтрационные устройства, ЭГДА, гидродинамическая сетка, математическое моделирование, модель, матрица планирования, геометрический образ.

E. O. Sklyarenko, P. S. Matyushenko

Novocherkassk Engineering and Land Reclamation Institute – branch of the Don State Agrarian University, Novocherkassk, Russian Federation

METHODOLOGY OF FILTRATION RESEARCH THROUGH THE GROUND DAM BASE WITH ANTI-FILTRATION WALLS BY THE EHDA METHOD

The purpose of the research was to evaluate the effectiveness of the filtration-proof walls in the earth dam ground base. Experimental studies of filtration through the dam with anti-filtration curtains (PFU) in the ground base have been carried out, including the spatial nature of filtration flow, and on this basis proposals have been prepared for improving the EHDA method of investigation. A method for calculating filtration in the ground dam base with PFU in the form of a cement curtain at the presence of various damages has been developed. The analysis has been carried out, and a geometric model allowing to evaluate the efficiency of PFU at the seepage areas formation at different depths has been developed.

Keywords: filtration, PFU, anti-filtration devices, EHDA, hydrodynamic grid, mathematical modeling, model, planning matrix, geometric image.

Метод электрогидродинамических аналогий (ЭГДА) является одним из самых распространенных экспериментальных методов решения уравнения Лапласа. Наибольшее признание этот метод завоевал в гидротехнике, в подтверждение чего можно указать, что при проектировании подавляющего большинства крупных гидротехнических сооружений в нашей стране был использован метод ЭГДА.

Согласно техническим условиям и нормам проектирования фильтрационный расчет всех гидротехнических сооружений I и II класса обязательно должен быть выполнен при помощи метода ЭГДА [1].

Между стационарным движением грунтовых вод в пористой среде и стационарным движением электрического тока в проводящей среде существует аналогия, положенная в основу метода ЭГДА Н. Н. Павловским в 1922 г. [2].

При изучении движения фильтрационного потока на электрических моделях с помощью метода ЭГДА необходимо строго соблюдать следующие условия подобия:

- электрическая модель должна представлять изучаемую область фильтрации в некотором масштабе m без всякого искажения;
- коэффициенты электропроводности σ модели должны быть пропорциональны соответствующим коэффициентам фильтрации k , м/сут, т. е. между моделью и натурой должно существовать физическое подобие $\sigma = n \cdot k$, где n – коэффициент подобия;
- граничные условия для модели и природы должны быть подобны.

Схема прибора ЭГДА (его электрических соединений) показана на рисунке 1. Как видно, прибор имеет две электрические цепи:

- питающую, при помощи которой подводится постоянный ток к модели сооружения;
- измерительную, которая служит для измерения электрических потенциалов в отдельных точках электропроводной модели.

В питающую цепь A (включенную в сеть переменного тока) входят трансформатор и выпрямитель. Ток от сети через выпрямитель и трансформатор приводится к шине I , затем проходит через электропроводящую модель сооружения и через шину 2 возвращается в сеть.

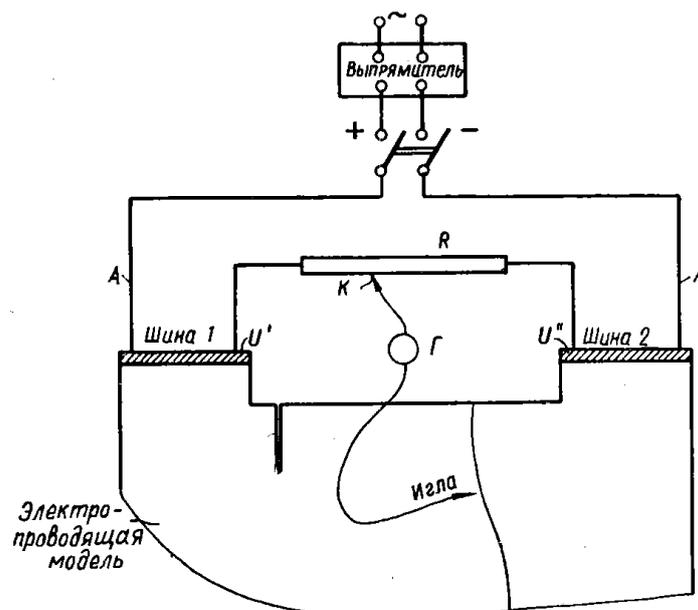


Рисунок 1 – Схема прибора ЭГДА

Измерительная цепь устроена по принципу мостика Уитстона и включает в себя электропроводящую модель сооружения, реостат R и гальванометр Γ . К подвижному контакту K реостата подключена через гальванометр на гибком проводе игла, с помощью которой можно измерить электрический потенциал в любой точке модели.

Использование электропроводной бумаги (рисунок 2) в качестве проводящей среды позволяет существенно упростить технику моделирования задач [3].

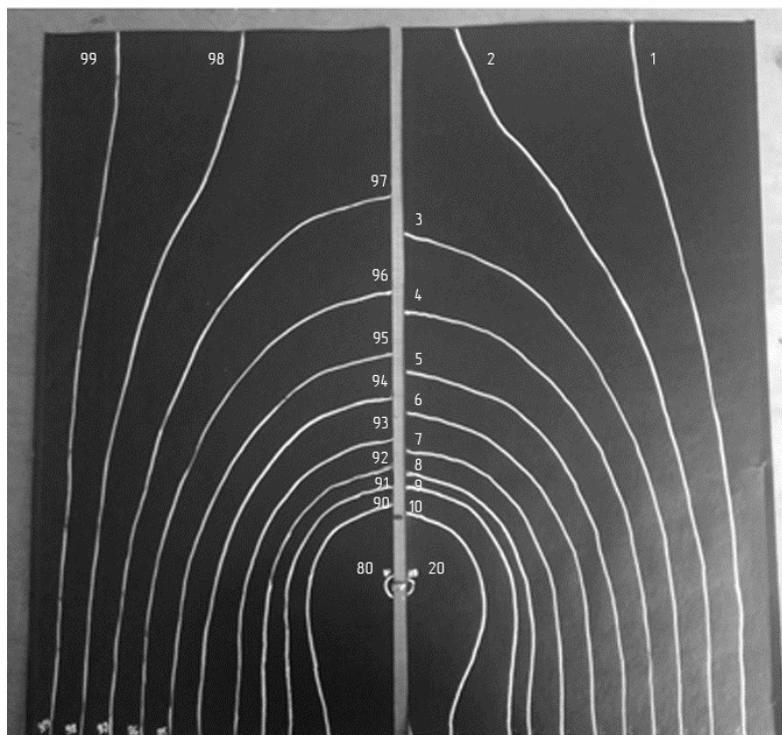


Рисунок 2 – Модель из электропроводной бумаги

Моделирование задач фильтрации со свободными поверхностями несколько сложнее моделирования чисто напорных задач фильтрации.

Сложность заключается в том, что граница области фильтрации полностью

не известна и в самом процессе решения задачи необходимо определить кривую депрессии. Кроме того, при моделировании задач данного типа могут встречаться особые граничные условия на низовом откосе выше горизонта воды в нижнем бьефе.

Подготовка модели заключалась в следующем. Для области фильтрации были приняты размеры 50×50 м, при планировании эксперимента эти значения откладывались в масштабе 1:100.

Моделирование аварийных ситуаций осуществлялось путем создания повреждения в цементационной завесе в наиболее вероятных местах (примыкание к ядру и середина завесы) в виде областей просачивания высотой 0,1; 0,2; 0,4; 0,6 и 0,8 м. При этом предполагалось, что области просачивания в завесе закольматированы грунтом с коэффициентом фильтрации, соответствующим данному грунту (где находится стена). В связи с этим они моделировались в соответствующих местах электрической модели полосками электропроводной бумаги шириной от 1 до 5 мм.

Выполнение граничных условий осуществляли при помощи подсоединения металлических шин вдоль линий дна бьефов, которые являются линиями равного пьезометрического напора.

После того, как модель была изготовлена и были соблюдены все необходимые граничные условия, приступили к решению фильтрационной задачи.

Решение задачи начали путем построения гидродинамической сетки движения фильтрационного потока [4].

Эквипотенциальные линии строили, отыскав при помощи измерительной иглы ряд точек с заданным потенциалом ($\varphi = 90\%$, $\varphi = 80\%$, ..., $\varphi = 10\%$) и соединив их плавными кривыми. Эквипотенциальные линии вычерчивались непосредственно на электропроводной бумаге.

Используя свойство ортогональности линий тока с эквипотенциалами в точках их пересечения, линии тока наносили визуально от руки. При этом следили, чтобы гидродинамическая сетка состояла из криволинейных квадратов. Практически это сводится к тому, что средние линии каждого квадрата приблизительно равны.

После построения сетки эквипотенциальных линий и линий тока определяли удельный фильтрационный расход и выходные градиенты.

Используя свойство ортогональности линий тока с эквипотенциалами в точках их пересечения, линии тока строили визуально от руки. При этом необходимо, чтобы гидродинамическая сетка состояла из криволинейных квадратов. Практически это сводится к тому, что средние линии каждого квадрата приблизительно равны.

Имея построенную гидродинамическую сетку движения, определяли:

- выходные градиенты напора;
- удельный фильтрационный расход, $\text{м}^2/\text{сут}$:

$$q = km \frac{\Delta h}{\Delta l_{\text{cp}}},$$

где k – коэффициент фильтрации соответственно слоя основания, $\text{м}/\text{сут}$;

m – мощность слоя основания, м ;

Δh – потери напора в пределах рассматриваемого пояса ($\Delta h = 0,1 \cdot H$), м ;

Δl_{cp} – средняя ширина рассматриваемого пояса, м .

Для планирования эксперимента по квадратам были построены шесть гидродинамических сеток (рисунок 3). В разных вариантах были повреждения от 0,2 до 1,0 м, расположенные на высоте стенки от 0,2 H до 0,8 H . Стенка перекрывает фильтрационный поток до водоупора.

Математическое моделирование и построение образов функций отклика. В настоящей работе для построения геометрических образов исследуемых функций отклика использованы методы линейной алгебры [5], сущность которых заключается

в следующем. Если по двум координатным осям откладывать численные значения факторов x_1 и x_2 , а по третьей оси – значения соответствующего им отклика y_i , то двухфакторная модель второго порядка описывает с математической точки зрения некоторую поверхность в трехмерном пространстве. В зависимости от сочетания численных значений коэффициентов, модель описывает одну из трех возможных поверхностей – эллипсоидную, параболическую или гиперболоидную. Для установления конкретного вида поверхности, описываемой исследуемой моделью, уравнение вида (1) необходимо привести к так называемой канонической форме [6].

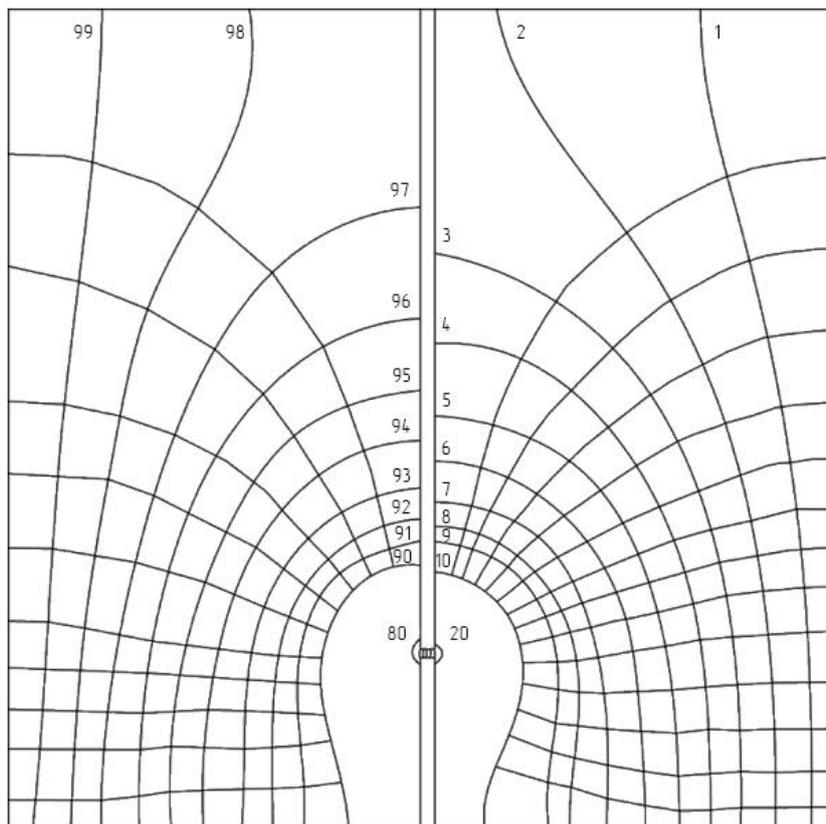


Рисунок 3 – Гидродинамическая сетка для расчетной схемы 3

С этой целью вычисляют инварианты поверхности, представляющие собой некоторые выражения, составленные из коэффициентов уравнения исследуемой функции отклика, которые не меняются при переходе от одной прямоугольной декартовой системы координат к другой, т. е. при поворотах и параллельных переносах координатных осей.

Общий вид полинома второй степени для двух факторов следующий:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{12}x_1x_2. \quad (1)$$

Условия кодирования и варьирования переменных представлены в таблице 1.

Таблица 1 – Кодирование и варьирование факторов

Фактор	Код x_i	Основной уровень x_0	Интервал варьирования	Нижний уровень «-»	Верхний уровень «+»
Область раскрытия пучка трещин	x_1	0,6	0,2	0,2	1,0
Глубина образования, м	x_2	25	15	10	40

Графически план эксперимента представлен на рисунке 4.

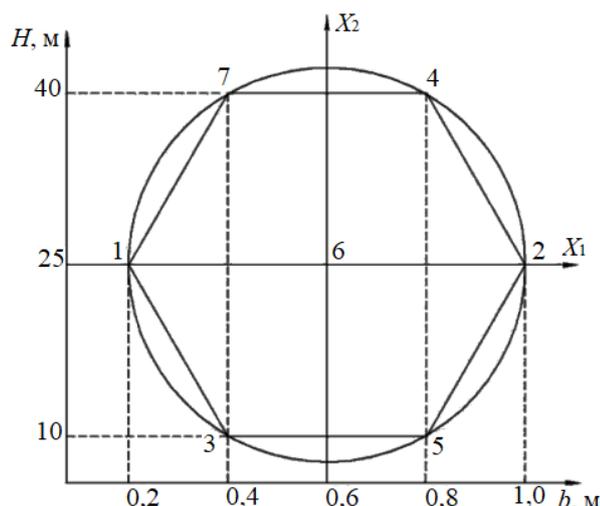


Рисунок 4 – Условия проведения опытов по симплексно-суммируемому плану второго порядка на правильном шестиугольнике

В плане проведения опытов один фактор варьируется на пяти уровнях, а второй фактор – на трех уровнях. Расчетная матрица и результаты эксперимента представлены в таблице 2.

Таблица 2 – Матрица планирования $y(Q) = f(b, H)$, условия и результаты опытов

Номер опыта	План					Натуральное значение фактора		Отклик $y(Q)$
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$	b	H	
1	-1	0	1	0	0	0,2	25	17,82
2	+1	0	1	0	0	1,0	25	25,32
3	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	0,4	10	29,01
4	+0,5	+0,87	0,25	0,75	0,43	0,8	40	22,01
5	+0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	0,8	10	14,97
6	0	0	0	0	0	0,6	25	37,68
7	-0,5	+0,87	0,25	0,75	-0,43	0,4	40	33,83
Суммы	(1 y)	(2 y)	(11 y)	(22 y)	(12 y)			(0 y)
$y_1(L)$	-5,43	10,318	68,095	74,865	0,954			181

Определение коэффициентов полиномиальной модели $y(Q) = f(b, H)$. С помощью матрицы планирования, описанной в таблице 2, вычисляем оценки коэффициентов неполного полинома второй степени [7]:

$$b_0 = (0y) - \sum(iiy) = 181 - (68,095 + 74,865) = 38,$$

$$b_1 = \frac{1}{3}(1y) = -\frac{5,43}{3} = -1,81,$$

$$b_2 = \frac{1}{3}(2y) = \frac{10,318}{3} = 3,44,$$

$$b_{12} = \frac{4}{3}(12y) = 4 \frac{0,9546}{3} = 1,27,$$

$$b_{11} = \frac{2}{3}(11y) + \frac{5}{6}[\sum(iiy)] - (0y) = \frac{2}{3}(68,095) + \frac{5}{6}(68,095 + 74,865) - 181 = -16,11,$$

$$b_{22} = \frac{2}{3}(22y) + \frac{5}{6}[\sum(iiy)] - (0y) = \frac{2}{3}(74,865) + \frac{5}{6}(68,095 + 74,865) - 181 = -11,6.$$

Следовательно, модель $y_1(Q) = f(b, H)$ имеет вид:

$$y = 38 - 1,81x_1 + 3,44x_2 - 16,11x_1^2 - 11,6x_2^2 + 1,28x_1x_2. \quad (2)$$

Для построения геометрического образа модель (1) приведена к канонической форме (методом линейной алгебры).

Инварианты модели (1):

$$S = -16,11 - 11,6 = -27,7067,$$

$$\delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -16,11 & 0,635 \\ 0,635 & -11,6 \end{vmatrix} = 186,47;$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} & 0,5b_1 \\ 0,5b_{12} & b_{22} & 0,5b_2 \\ 0,5b_1 & 0,5b_2 & b_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} -16,11 & 0,635 & -0,905 \\ 0,635 & -11,6 & 1,72 \\ -0,905 & 1,72 & 38 \end{vmatrix} = 7141,15.$$

Каноническое уравнение:

$$y' = \lambda_1 z_1^2 + \lambda_2 z_2^2 + \frac{\Delta}{\delta},$$

$$\frac{\Delta}{\delta} = \frac{7141,15}{186,47} = 38,3,$$

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

$$\lambda_{1,2} = -\frac{27,71}{2} \pm \sqrt{2,34} = -13,85 \pm 2,31,$$

$$\lambda_{1,2} = -13,85 + 2,31 = -11,54, \quad \lambda_{1,2} = -13,85 - 2,31 = -16,2,$$

$$y' = -11,54z_1^2 - 16,2z_2^2 + 38,3. \quad (3)$$

Система координат для канонической формы (3):

- тангенс угла поворота оси абсцисс:

$$K_1 = \operatorname{tg}\alpha = \frac{\lambda - b_{11}}{0,5 \cdot b_{12}} = \frac{-11,5 + 16,2}{0,635} = 7,4;$$

- координаты центра поверхности:

$$X_{1S} = \frac{\begin{vmatrix} -0,5b_1 & 0,5b_{12} \\ -0,5b_2 & b_{22} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{22} \\ -0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} 0,905 & 0,635 \\ -1,72 & -11,6 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -16,11 & -5,8 \\ -0,635 & -11,6 \end{vmatrix}} = -0,05136$$

$$X_{2S} = \frac{\begin{vmatrix} b_{11} & -0,5b_1 \\ b_{12} & -0,5b_2 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} b_{11} & 0,5b_{12} \\ 0,5b_{12} & b_{22} \end{vmatrix}} = \frac{\begin{vmatrix} -16,11 & 0,905 \\ 1,27 & -1,72 \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} -16,11 & 0,635 \\ -0,635 & -11,6 \end{vmatrix}} = 0,142436$$

Поскольку коэффициенты канонической формы (3) оба имеют отрицательные знаки, модель описывает поверхность отклика эллипсоидного типа. Координаты центра поверхности отклика: $X_{1S} = -0,05136$; $X_{2S} = 0,142436$.

Построение геометрического образа модели $y(Q) = f(b, H)$ (рисунок 5):

$$z_1 = \sqrt{\frac{38,3 - y}{11,51}}, z_2 = \sqrt{\frac{38,3 - y}{16,2}}.$$

При:

- $y = 15 \rightarrow z_1 = 1,422788, z_2 = 1,19928;$
- $y = 20 \rightarrow z_1 = 1,260921, z_2 = 1,06284;$
- $y = 25 \rightarrow z_1 = 1,07495, z_2 = 0,906084;$
- $y = 30 \rightarrow z_1 = 0,849183, z_2 = 0,715783;$
- $y = 35 \rightarrow z_1 = 0,53545, z_2 = 0,451335;$
- $y = 37 \rightarrow z_1 = 0,336073, z_2 = 0,283279.$

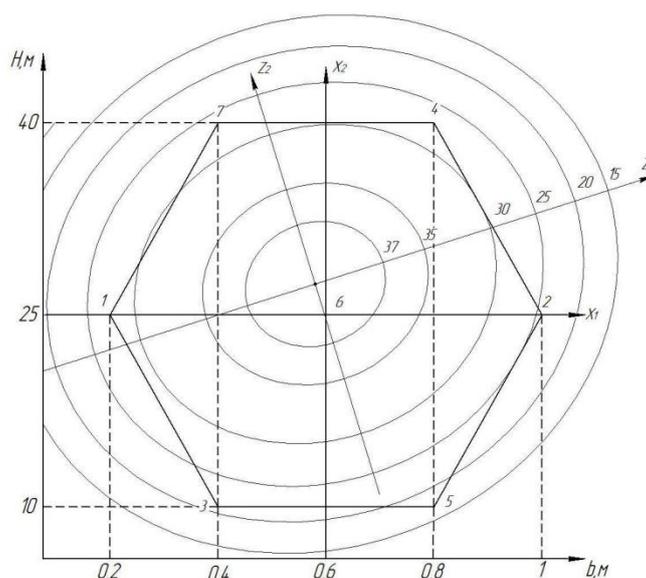


Рисунок 5 – Геометрический образ модели $y(Q) = f(b, H)$

Для проверки адекватности модели (2) составлена вспомогательная таблица 3.

Оценка дисперсии неадекватности данной модели:

$$S_{\text{на}}^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\Delta y_i)^2}{n-1} = \frac{186,1952}{6} = 31,03.$$

Таблица 3 – Данные для расчета дисперсии неадекватности для модели $y(Q) = f(b, H)$

Номер опыта	План					y_i^T по опыту	$y_i^Э$ по модели	$ y_i^T - y_i^Э $	$(\Delta y_i)^2$
	x_1	x_2	x_1^2	x_2^2	$x_1 x_2$				
1	-1	0	1	0	0	17,82	23,7	5,88	34,5744
2	1	0	1	0	0	25,32	20,08	5,24	27,4576
3	-0,5	-0,87	0,25	0,75	0,43	29,01	23,7351	5,2749	27,82457
4	0,5	0,87	0,25	0,75	0,43	22,01	27,9107	5,9007	34,81826
5	0,5	-0,87	0,25	0,75	-0,43	14,97	20,8243	5,8543	34,27283
6	0	0	0	0	0	37,68	38	0,32	0,1024
7	-0,5	0,87	0,25	0,75	-0,43	33,83	28,6199	5,2101	27,14514
Сумма									186,1952

Для оценки модели было поставлено три параллельных опыта в центральной точке плана, при этом получены следующие показатели удельного фильтрационного

расхода (y_{i0}): 34,95; 36,53; 37,68 м³/сут. Тогда имеем среднее арифметическое $\bar{y}_0 = 36,38$ м³/сут.

Оценка дисперсии воспроизводимости составляет:

$$S_0^2 = \frac{|34,95 - 36,38|^2 + |36,53 - 36,38|^2 + |37,68 - 36,38|^2}{2} = 1,8787.$$

Критерием для проверки нуль-гипотезы является дисперсионное отношение:

$$F_a = \frac{S_{\text{на}}^2}{S_0^2} = \frac{31,03}{1,8787} = 16,51; F_a = 16,51 \leq F_{\text{табл}} \left(\frac{f_1}{f_2} \right) \{a\} = 16,81.$$

Следовательно, условие выполняется и с вероятностью $p = 0,99$ можно считать полученную модель адекватной.

В качестве заключения можно сделать вывод, что наибольший удельный фильтрационный расход (37,68 м³/сут) наблюдается при образовании в цементационной завесе области просачивания мощностью 0,6 м на глубине 25 м. Наименьшие фильтрационные расходы наблюдаются в стене в грунте на глубинах 10 м при образовании пучков просачивания мощностью 0,8 м (14,97 м³/сут) и 25 м с областью просачивания мощностью 0,2 м (17,82 м³/сут). Это подтверждается данными, полученными при математическом моделировании и построении геометрического образа функции откликов. Исходя из полученных результатов, можно судить о необходимости разработки технологических решений для усиления зон конструкции с минимальной эффективностью при образовании повреждений.

Список использованных источников

- 1 Жернов, И. Е. Моделирование фильтрационных процессов / И. Е. Жернов, И. Н. Павловец. – Киев: Высш. шк., 1976. – 192 с.
- 2 Киселёв, П. Г. Справочник по гидравлическим расчетам / П. Г. Киселёв. – Изд. 4-е. – М.: Энергия, 1972. – 312 с.
- 3 Дружинин, Н. И. Метод электрогидродинамических аналогий и его применение при исследовании фильтрации / Н. И. Дружинин. – М. – Л.: Госэнергоиздат, 1956. – 114 с.
- 4 Фильчаков, П. Ф. Интеграторы ЭГДА. Моделирование потенциальных полей на электропроводной бумаге / П. Ф. Фильчаков, В. И. Панчишин; АН УССР. Ин-т математики. – Киев: Изд-во АН УССР, 1961. – 171 с.
- 5 Головина, Л. И. Линейная алгебра и некоторые ее приложения / Л. И. Головина. – М.: Кн. по Требованию, 2013. – 392 с.
- 6 Колганов, А. В. Планирование эксперимента в гидромелиоративных исследованиях: учеб. пособие / А. В. Колганов, А. М. Питерский, А. Т. Лисконов. – М.: ЦНТИ «Мелиоводинформ», 1999. – 213 с.
- 7 Налимов, В. В. Планирование эксперимента / В. В. Налимов // Сборник трудов Московского государственного университета. – М.: Наука, 1971.