

УДК 626.826.001.57

А. И. Тищенко (ФГБОУ ВПО «НГМА»)

Д. В. Бакланова (ФГБНУ «РосНИИПМ»)

ПРИМЕНЕНИЕ РАЗМЕРНОСТНО-РЕГРЕССИОННОГО МЕТОДА К ОПРЕДЕЛЕНИЮ ФИЛЬТРАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ЗЕМЛЯНЫХ ДАМБ

В статье приведены результаты исследований определения зависимости градиента напора и длины сосредоточенного хода фильтрации от исследуемых факторов. Вывод зависимостей выполнялся с использованием размерностно-регрессионного метода и метода планирования эксперимента. Полученные зависимости предназначены для прогнозирования величины градиента напора в дамбе канала в насыпи, с его пропускной способностью от 50 до 100 м³/с и оценки длины сосредоточенного хода фильтрации в ней, с площадью живого сечения водотока в пределах от 15 до 150 м². Данные расчетные зависимости учитывают все основные факторы, влияющие на процессы фильтрации, каждый из которых управляем, и имеет определенную область определения. На основе использования выведенных зависимостей могут быть заблаговременно разработаны предупредительные мероприятия по исключению вероятности аварии крупного канала.

Ключевые слова: канал, дамба, насыпь, фильтрация, сосредоточенный ход, градиент напора, зависимость.

A. I. Tishchenko (FSBEE HPE “NSMA”)

D. V. Baklanova (FSBSRE “RSRILIP”)

APPLICATION OF THE DIMENSIONAL-REGRESSION METHOD TO DETERMINATION OF THE FILTRATION CHARACTERISTICS OF AN EARTH DAM

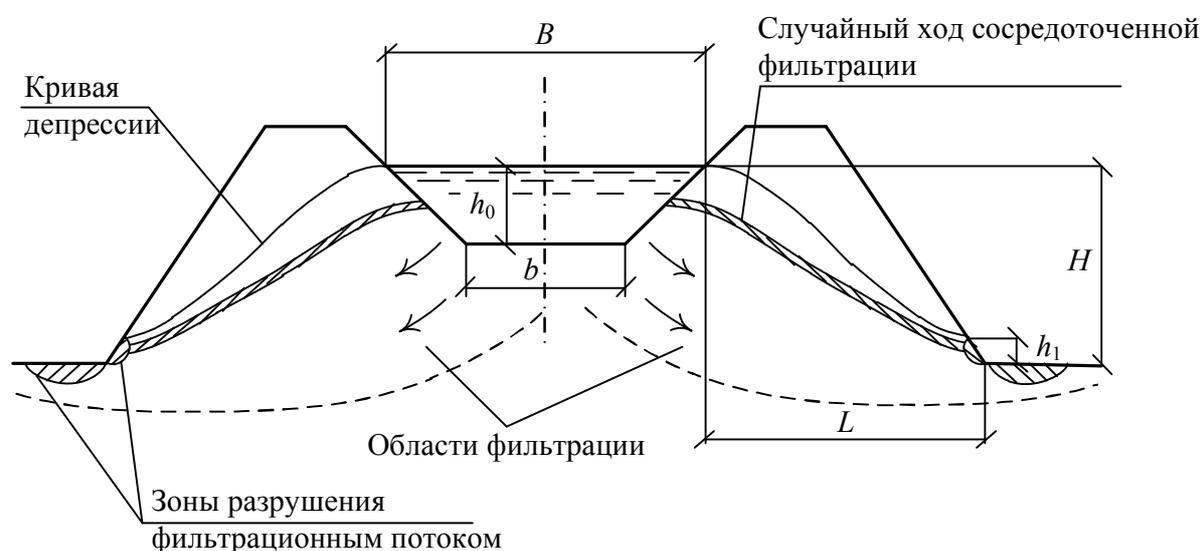
The research results for relation of a pressure gradient and a length of concentrated course of filtration to study factors are cited. The derivation of relations was made by dimensional regression analysis and experimental design. Obtained relations are intended for the forecasting of a pressure gradient for embankment of canal in fill with canal capacity from 50 to 100 m³ per second and the assessment of the length of concentrated course of filtration in it with an area of water section from 15 to 150 m² as well. The given calculated relations take into account all key factors affecting on the processes of filtration. Each of them is controlled and has a certain domain. On the basis of derived relations the precautionary measures to prevent the possibility of an accident of a large canal can be developed in advance.

Key words: canal, embankment, fill, filtration, concentrated course, pressure gradient, relation.

Вопросами фильтрации через земляные дамбы занимались такие видные ученые России как А. Н. Костяков [1], В. П. Недрига [2], К. Н. Анахаев [3, 4], С. Ф. Аверьянов [5], П. Я. Полубаринова-Кочина [6], М. Ю. Косиченко [7] и др.

Крупные каналы в земляных руслах являются наиболее опасными объектами для возникновения чрезвычайных ситуаций, так как значительная фильтрация может способствовать возникновению ходов сосредоточенной фильтрации, ключей, грифонов, выноса грунта из тела дамбы.

Анализ факторов, влияющих на образование фильтрационных деформаций в дамбе канала, проходящего в насыпи (рисунок 1), позволил выявить основные факторы, от которых зависят, градиент напора в дамбе канала и длина сосредоточенного хода фильтрации.



B – ширина канала по урезу воды; b – ширина канала по дну; h_0 – глубина воды в канале; h_1 – высота выхода депрессионной кривой на низовой откос; H – действующий напор; L – расстояние от уреза воды до подошвы дамбы

Рисунок 1 – Схема фильтрации потока через дамбу канала в насыпи

На длину сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала влияют J – градиент напора, n – относительная пористость грунта, ω – площадь живого сечения потока, ν – кинематическая вязкость воды, γ_{gr} – удельный вес грунта, γ_w – удельный вес воды и ускорение свободного падения g . Тогда функциональная зависимость имеет вид:

$$l_{c.x.} = \varphi(J, n, \omega, \nu, g, \gamma_w, \gamma_{gr}). \quad (1)$$

В уравнение (1) вошли семь фундаментальных переменных, которым присвоим показатели степени:

$$l_{c.x.} = \varphi(J, n, \omega^a, v^b, g^c, \gamma_w^d, \gamma_{gr}^e). \quad (2)$$

Используя теорию размерностей [8-11], представим это уравнение в критериальной форме:

$$\frac{l_{c.x.}}{\sqrt{\omega}} = \varphi \left[\frac{J}{n}, \left(\frac{\sqrt{\omega^3} \cdot g}{v^2} \right)^c, \left(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w} \right)^e \right]. \quad (3)$$

Таким образом, функциональная зависимость (1), представленная в критериальном виде, содержит в правой части три безразмерных параметра. Однако, равенство (3) является еще и многофакторным, поэтому, чтобы выполнить эксперимент с каждым безразмерным параметром, варьируя его в определенных пределах, необходимо провести значительное число опытов. Для сведения числа опытов к минимуму использована теория планирования эксперимента.

Введем обозначения:

$$R = \frac{l_{c.x.}}{\sqrt{\omega}}, \quad X = \frac{J}{n}, \quad Y = \left(\frac{\sqrt{\omega^3} \cdot g}{v^2} \right)^c, \quad Z = \left(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w} \right)^d,$$

где Z – удельный коэффициент грунта, характеризующий отношение удельного веса грунта к удельному весу воды в нем.

В результате, уравнение (3) можно представить как произведение отдельных функций независимых переменных:

$$R = \varphi_1(X) \varphi_2(Y) \varphi_3(Z), \quad (4)$$

которое относится к общему соотношению второго класса [9], допускающему применение факторных экспериментов.

Необходимо провести такой сбалансированный эксперимент, в котором X , Y , Z берутся на соответствующих уровнях и к решению задачи применяется «латинский квадрат». Составляя логарифмические уравнения для строки, содержащей например, X_1 по n уровням, получим:

$$\lg f_1(X_1) = \frac{\sum \lg R_{X_1}}{n} - \text{const}, \quad (5)$$

а для X_n :

$$\lg f_1(X_n) = \frac{\sum \lg R_{x_n}}{n} - \text{const.} \quad (6)$$

Все изменения усредненного логарифма результата полностью обусловлены влиянием лишь одной переменной X . Такой же результат получится, если усреднение производить по уровням переменной Y , а затем по уровням переменной Z . По формулам (5) и (6) с помощью кривых или таблиц можно получить функции:

$$R_x = k f_1(X), R_y = k' f_2(Y), R_z = k'' f_3(Z), \quad (7)$$

где R_x – антилогарифм $\sum \lg R_x / n$;

k – постоянная, входящая в формулы (7).

Если решить уравнение (7) относительно функций $f_1(X)$, $f_2(Y)$, $f_3(Z)$ и подставить их в формулу (4), то получим:

$$R = K(R_x)(R_y)(R_z), \quad (8)$$

где $K = (k \cdot k' \cdot k'')^{-1}$.

Регрессионная модель может быть построена в виде функции:

$$y = b_0 + b_1x + b_2y + b_3z + b_4xy + b_5xz + b_6yz + b_7xyz.$$

Для построения модели нужно найти параметры функции b_0, \dots, b_7 .

При исследовании фильтрации из каналов переменные, входящие в зависимость (1), изменялись в следующих пределах: $n = 0,3-0,45$, $J = 0,01-0,05$, $\omega = 15-150 \text{ м}^2$, $v = 0,801 \cdot 10^{-6} \dots 1,31 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$, $\gamma_{gr} = 16-26 \text{ кН}/\text{м}^3$, $\gamma_w = 10 \text{ кН}/\text{м}^3$. Тогда безразмерные параметры правой части равенства (4) получили значения: $X = 0,2 - 1,67$, $Y = 331,3 \cdot 10^{12} - 27468,6 \cdot 10^{12}$, $Z = 1,6-2,6$, $R = 8,27-1,4$ и латинский квадрат представился следующим (таблица 1).

Таблица 1 – План эксперимента на четырех уровнях варьирования переменными

Критерий Рейнольдса Y	$331,3 \cdot 10^{12}$	$9377 \cdot 10^{12}$	$18422,8 \cdot 10^{12}$	$27468,6 \cdot 10^{12}$
Относительный градиент фильтрации X	Коэффициент грунта Z			
1,67	1,6	1,9	2,2	2,6
1,19	1,9	1,6	2,6	2,2
0,71	2,2	2,6	1,6	1,9
0,23	2,6	2,2	1,9	1,6

Тогда зависимая переменная R имела следующие значения:

6,90	7,36	7,82	8,27
5,06	5,52	5,98	6,44
3,23	3,69	4,15	4,61
1,40	1,86	2,32	2,77

Длина сосредоточенного хода фильтрации в зависимости от факторов, входящих в (4), по данным полученного квадрата результатов R определялась по схеме, представленной на рисунке 2.

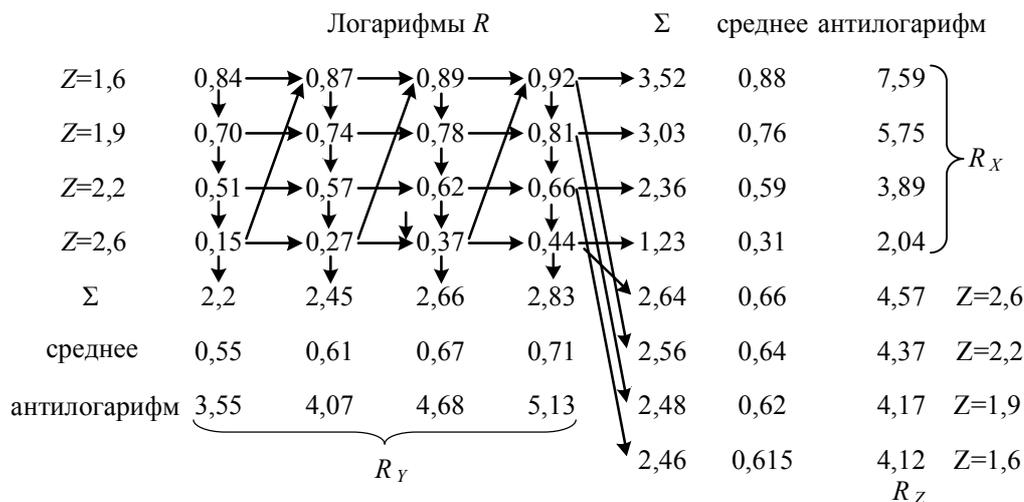


Рисунок 2 – Схема вычислений антилогарифмов

После этого по формуле (8) были определены значения постоянных K для всех 16 комбинаций условий:

0,056	0,054	0,051	0,042
0,055	0,054	0,053	0,051
0,053	0,053	0,055	0,058
0,051	0,052	0,055	0,063

Среднее значение постоянной K для этих 16 комбинаций 0,054.

С использованием безразмерных комплексов были вычислены коэффициенты корреляции к формуле (8) и определены их значимости.

В результате коэффициенты корреляции приняли следующие значения: $r_x = 0,96$, $r_y = 0,24$, $r_z = 0,15$, $r_R = 2,18$.

Была выполнена проверка значимости полученных коэффициентов с их критическими значениями $r_x \sqrt{n-1} = 0,96 \cdot 3,87 = 3,72$; $r_y \sqrt{n-1} = 0,93$. $r_z \sqrt{n-1} = 0,58$; $r_{\text{теор}} = 2,87$ – критическое значение при надежности выводов 0,999; $r_{\text{теор}} = 1,65$ – при надежности выводов 0,90. С надежностью выводов 0,90 оказались значимыми все коэффициенты корреляции. Методика определения значимости коэффициентов корреляции и доверительной оценки параметров теоретической прямой регрессии подробно изложена Л. З. Румшинским [12].

По данным этих вычислений построены графики зависимости длины сосредоточенного хода фильтрации от градиента фильтрации (рисунок 3, а), критерия Рейнольдса (рисунок 3, б), удельного коэффициента грунта (рисунок 3, в), которые изображают результаты эксперимента.

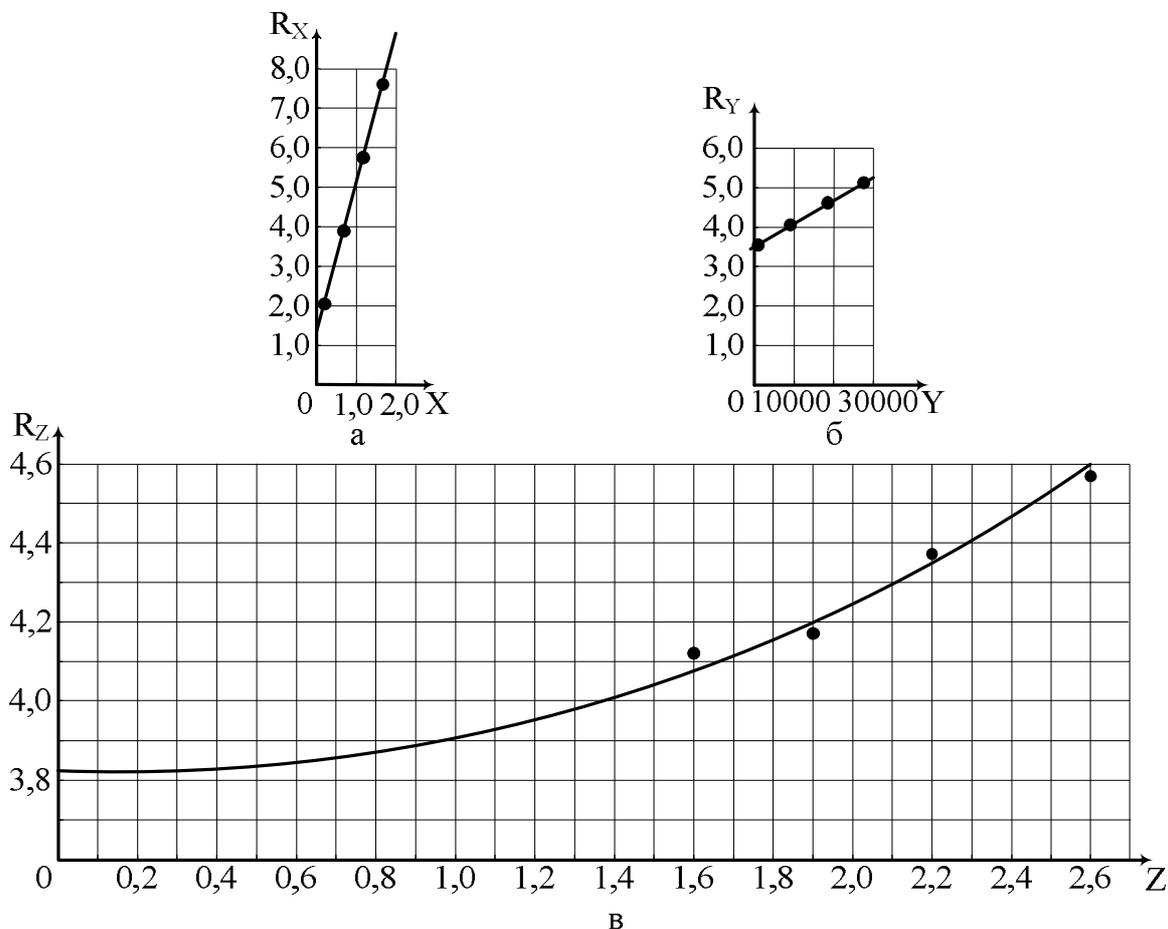
С учетом изложенного по каждому графику получены уравнения регрессии в следующем виде: $R_x = a_x + b_x \cdot X$; $R_y = a_y + b_y \cdot Y$; $R_z = a_z + b_z \cdot Z^\alpha$.

Коэффициенты a_x , a_y , a_z , b_x , b_y , b_z и показатель степени – α , были определены с помощью метода наименьших квадратов по методике Л. З. Румшинского. Подставив в равенство (8) значения K , a_x , a_y , a_z , b_x , b_y , b_z , α , получим уравнение относительно результата:

$$R = 0,054 \cdot (3,78 \cdot X + 1,29) (0,667 \cdot Y + 3,54) (0,089 \cdot Z^{2,27} + 3,82).$$

Таким образом, размерностно-регрессионный метод позволил выявить параметры, влияющие на длину сосредоточенного хода фильтрации. Построив регрессионную модель, окончательно было найдено:

$$l_{\text{с.х.}} = 0,054\sqrt{\omega} \left[\left(3,78 \cdot \frac{J}{n} + 1,29 \right) \left(0,667 \frac{\sqrt{\omega^3} \cdot g}{v^2} + 3,54 \right) \left(0,089 \left(\frac{\gamma_{gr}}{\gamma_w} \right)^{2,27} + 3,82 \right) \right].$$



а – зависимость от градиента фильтрации; б – зависимость от критерия Рейнольдса;
 в – зависимость от удельного коэффициента грунта

Рисунок 3 – Графики зависимости длины сосредоточенного хода фильтрации от исследуемых факторов

Выведенная зависимость предназначена для оценки длины сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала, проложенного в насыпи с расходом воды от 27 до 105 м³/с и площадью живого сечения потока от 15 до 150 м².

По аналогичной методике проводились исследования по определению зависимости для градиента напора в теле дамбы канала в насыпи. Для действующего среднего градиента напора J в дамбе канала фундаментальными переменными являются Q – расход канала, F – сила давле-

ния воды на верховой откос канала, γ_{gr} – удельный вес грунта, g – ускорение свободного падения и сам градиент напора J , который можно выразить через вертикальное и горизонтальное проложения, т.е. $J = \frac{H_{\Phi}}{L_{\Phi}}$, где H_{Φ} – вертикальный путь фильтрации, L_{Φ} – горизонтальный путь фильтрации.

Тогда, функциональную зависимость для определения действующего градиента напора можно представить в следующем виде:

$$H_{\Phi} = \varphi(L_{\Phi}^a, Q^b, F^c, g^d, \gamma_{gr}^e). \quad (9)$$

С помощью размерностно-регрессионного метода число независимых переменных, входящих в уравнение (9), сокращено до трех в форме критериальных соотношений:

$$\frac{H_{\Phi}}{L_{\Phi}} = \varphi \left[\left(\frac{L_{\Phi}^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right)^c, \left(\frac{L_{\Phi}^5 \cdot g}{Q^2} \right)^d \right]. \quad (10)$$

Введя обозначения $X = \left(\frac{L_{\Phi}^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right)^c$, $Y = \left(\frac{L_{\Phi}^5 \cdot g}{Q^2} \right)^d$, $Z = \frac{H_{\Phi}}{L_{\Phi}} = J$, получили:

$$Z = \varphi_1(X) \varphi_2(Y). \quad (11)$$

При исследовании фильтрации из каналов переменные, входящие в зависимость (9), изменялись в следующих пределах: $Q = 50-100 \text{ м}^3/\text{с}$, $F = 150-480 \text{ кН}$, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$, $\gamma_{gr} = 18-21 \text{ кН}/\text{м}^3$, $H_{\Phi} = 0,60-4,44 \text{ м}$, $L_{\Phi} = 18,39-30,66 \text{ м}$.

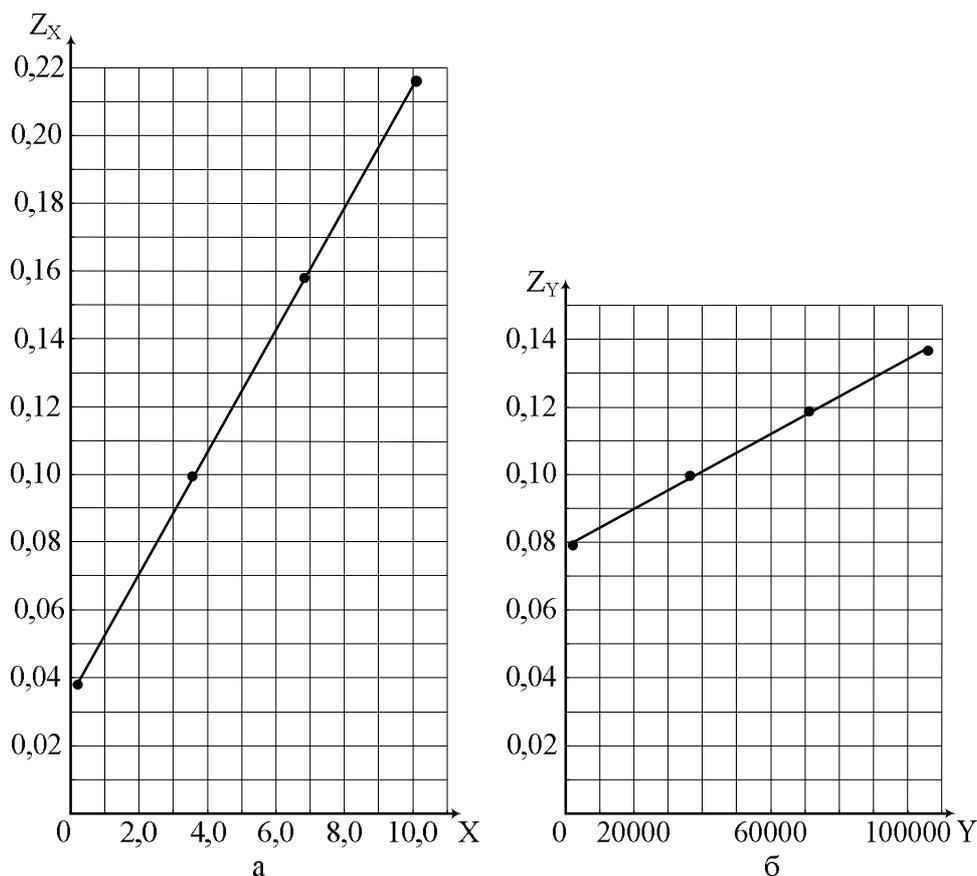
Тогда безразмерные параметры равенства (10) приняли следующие значения: $X = 0,242-10,030$, $Y = 2065,060-106313$, $Z = 0,019-0,241$.

Среднее значение постоянной K для этих 16 комбинаций условий равно 9,54.

С использованием безразмерных комплексов были вычислены коэффициенты корреляции $r_x = 0,98$, $r_y = 0,25$. С надежностью выводов 0,90

оказались значимыми оба коэффициенты корреляции. По данным этих вычислений построены графики зависимости градиента напора от критерия Эйлера (рисунок 4, а), градиента напора от критерия Фруда (рисунок 4, б), изображающие результат эксперимента, и получены уравнения регрессии первого порядка:

$$Z_X = a_X + b_X \cdot X ; Z_Y = a_Y + b_Y \cdot Y .$$



а – от критерия Эйлера; б – от критерия Фруда

Рисунок 4 – Графики зависимости градиента напора от исследуемых факторов

Коэффициенты a_X , b_X , были определены с помощью метода наименьших квадратов. Подставив их значения, получили:

$$Z = 9,54 \cdot (0,018 \cdot X + 0,034) \cdot (0,0000005 \cdot Y + 0,079).$$

Подставив в регрессионную модель, получим зависимость:

$$J = 9,54 \cdot \left(0,018 \cdot \left(\frac{L_\Phi^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 0,034 \right) \cdot \left(0,0000005 \cdot \left(\frac{L_\Phi^5 \cdot g}{Q^2} \right) + 0,079 \right)$$

или окончательно:

$$J = 0,86 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{L_{\phi}^7 \cdot F \cdot g}{Q^4 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 1,62 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\frac{L_{\phi}^5 \cdot g}{Q^2} \right) + 0,014 \cdot \left(\frac{L_{\phi}^2 \cdot F}{Q^2 \cdot \gamma_{gr}} \right) + 0,026.$$

Полученная зависимость предназначена для нахождения величины градиента напора в дамбе канала с расходом от 50 до 100 м³/с, проложенного в насыпи из несвязных грунтов с удельным весом от 18 до 21 кН/м³.

Таким образом, для прогнозирования градиента напора и длины сосредоточенного хода фильтрации в дамбе канала в насыпи (как наиболее опасного случая) предлагаются расчетные зависимости, учитывающие все основные факторы, влияющие на процессы фильтрации.

Список использованных источников

1 Костяков, А. Н. Основы мелиораций / А. Н. Костяков. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Сельхозгиз, 1960. – 660 с.

2 Гидротехнические сооружения – справочник проектировщика / Г. В. Железняков [и др.]; под ред. В. Н. Недриги. – М.: Стройиздат, 1986. – 253 с.

3 Анахаев, К. Н. Расчет фильтрации через земляные плотины на прогнившем основании разной мощности / К. Н. Анахаев, Ж. Х. Шогенова, Б. Х. Амшоков // Гидротехническое строительство. – 2011. – № 2. – С. 29-33.

4 Анахаев, К. Н. Свободная фильтрация из водотоков / К. Н. Анахаев // Известия РАН. Механика жидкости и газа. – 2004. – № 5. – С. 94-99.

5 Аверьянов, С. Ф. Фильтрация из каналов и ее влияние на режим грунтовых вод / С. Ф. Аверьянов. – М.: Колос, 1982. – 236 с.

6 Полубаринова-Кочина, П. Я. Теория движения грунтовых вод / П. Я. Полубаринова-Кочина. – М.: Наука, 1977. – 664 с.

7 Косиченко, Ю. М. Исследования в области борьбы с фильтрацией и эксплуатационной надежности грунтовых гидротехнических сооружений

Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации, № 4(08), 2012 г., [99-109]

[Электронный ресурс] / Ю. М. Косиченко // Научный журнал Российского НИИ проблем мелиорации: электрон. период. изд. / Рос. науч.-исслед. ин-т проблем мелиорации. – Электрон. журн. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2012. – № 2(06). – 9 с. – Режим доступа: <http://www.rosniipm-sm.ru/archive?n=100&id=108>.

8 Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике / Л. И. Седов. – М.: Наука, 1973. – 536 с.

9 Шенк, Х. Теория инженерного эксперимента / Х. Шенк. – М.: Мир, 1972. – 384 с.

10 Розанова, Н. Н. Моделирование работы гидротехнических сооружений / Н. Н. Розанова. – М.: Изд-во РУДН, 1998. – 108 с.

11 Гидротехнические сооружения (речные): учеб. для вузов / Л. Н. Рассказов [и др.]. – 2-е изд., испр. и доп. – М.: Изд-во АСВ, 2011. – Ч. 1 – 584 с.; Ч. 2 – 536 с.

12 Румшинский, Л. З. Математическая обработка результатов эксперимента / Л. З. Румшинский. – М.: Наука, 1971. – 192 с.

Тищенко Александр Иванович – кандидат технических наук, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» (ФГБОУ ВПО «НГМА»), доцент.

Контактный телефон: 8-951-837-31-14.

E-mail: rekngma@magnet.ru

Tishchenko Aleksandr Ivanovich – Candidate of Technical Sciences, Federal State Budget Educational Establishment of Higher Professional Education “Novocherkassk State Meliorative Academy” (FSBEE HPE “NSMA”), Associate Professor.

Contact telephone number: 8-951-837-31-14.

E-mail: rekngma@magnet.ru

Бакланова Дарья Викторовна – Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации» (ФГБНУ «РосНИИПМ»), младший научный сотрудник, аспирант.

Контактный телефон: 8-950-853-22-62.

E-mail: x-dashulya@rambler.ru

Baklanova Darya Viktorovna – Federal State Budget Scientific-Research Establishment “Russian Scientific-Research Institute of Land Improvement Problems” (FSBSRE “RSRILIP”), Junior Researcher, Postgraduate Student.

Contact telephone number: 8-950-853-22-62.

E-mail: x-dashulya@rambler.ru