

УДК 626.823

DOI: 10.31774/2658-7890-2020-2-103-120

Ю. М. Косиченко, О. А. Баев

Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации, Новочеркасск,
Российская Федерация

СТАТИСТИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПРОТИВОФИЛЬТРАЦИОННЫХ ЭКРАНОВ КАНАЛОВ И ВОДОЕМОВ

Цель: статическая оценка надежности противofильтрационных экранов оросительных каналов и водоемов по данным повреждаемости полимерных элементов. **Материалы и методы:** для анализа вероятностных значений повреждаемости полимерных экранов каналов и водоемов использовались статистические данные, полученные по результатам натурных наблюдений при строительстве и эксплуатации облицовок. При выполнении расчетов распределения повреждений на единицу площади использовался закон Пуассона, а для проверки соответствия эмпирического распределения теоретическому – критерий Колмогорова – Смирнова. Проверка гипотезы о логарифмическом нормальном законе распределения осуществлялась по критерию Шапиро – Уилка. **Результаты.** На основании выполненных расчетов получены числовые статистические характеристики: выборочная средняя величины дефекта, дисперсия случайной величины, среднее квадратическое отклонение, а также ошибка выборочной средней. **Выводы:** по результатам статистической обработки натурных данных о повреждаемости пленочных противofильтрационных экранов каналов и водоемов получено выборочное среднее значение повреждаемости полимерного экрана. С учетом натурных данных о числе крупных и средних повреждений на площади 1 га по формуле распределения редких явлений Пуассона доверительный интервал числа повреждений составляет 4,23–5,77 шт./га. Распределение дефектов соединений при полевой сварке импульсным ползком по логарифмически нормальному закону согласно критерию Шапиро – Уилка составляет 30,5–35,1 мм. На основании анализа диаметров условных отверстий, приведенных к 1 квадратному метру площади экрана, согласно гипотезе о соответствии экспоненциальному распределению доверительный интервал диаметра условного отверстия составляет 0,85–3,47 см на 1 квадратный метр площади экрана, что подтверждается критерием согласия Колмогорова – Смирнова.

Ключевые слова: надежность; противofильтрационное покрытие; повреждаемость; облицовка; канал; водоем.

Yu. M. Kosichenko, O. A. Baev

Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems, NovoCherkassk,
Russian Federation

STATISTICAL ASSESSMENT OF RELIABILITY OF IMPERVIOUS SCREENS OF CANALS AND RESERVOIRS

Purpose: a static assessment of reliability of impervious screens of irrigation canals and reservoirs according to failure rate of polymer elements. **Materials and methods:** for analysis of the probabilistic values of damage to the polymer screens of canals and reservoirs, statistical data obtained from field observations during construction and operation of linings



were used. The Poisson law was used to calculate the distribution of damage per unit area, and the Kolmogorov-Smirnov criterion was used for checking the correspondence of empirical distribution to the theoretical one. The hypothesis of the lognormal law was tested using the Shapiro-Wilk criterion. **Results.** Based on the calculations, numerical statistical characteristics were obtained: the sample mean defect value, the variance of a random variable, the standard deviation and the sample mean error. **Conclusions:** based on the results of statistical processing of field data on the damage rate of the film impervious screens of canals and reservoirs, a sample mean of the damage to the polymer screen is obtained. Taking into account field data on the number of large and medium damage on an area of 1 ha according to the formula for the rare Poisson phenomena distribution, the confidence interval for the number of damage is 4.23–5.77 units per ha. According to the log-normal law the distribution of joint defects during field welding by an impulse skid according to the Shapiro-Wilk criterion is 30.5–35.1 mm. Based on the analysis of the diameters of the conditional holes, reduced to 1 square meter of the screen area, according to the hypothesis of the correspondence to the exponential distribution, the confidence interval of the diameter of the conditional hole is 0.85–3.47 cm per 1 square meter of the screen area, which is confirmed by Kolmogorov-Smirnov test.

Key words: reliability; impervious coating; damage; lining; canal; reservoir.

Введение. Для вероятностной оценки надежности противofильтрационных экранов и облицовок оросительных каналов и водоемов с применением полимерных материалов большое значение имеет накопление статистических данных об их повреждаемости в процессе строительства и эксплуатации сооружений [1–3]. При этом появление повреждений в пленочном экране следует рассматривать как случайное событие, наступающее с определенной степенью вероятности.

В связи с этим для установления вероятностных значений повреждаемости полимерных экранов и законов распределения основных характеристик повреждаемости произведем статистическую обработку имеющихся натурных данных. С этой целью определим вероятные значения повреждаемости пленочных экранов, распределение числа повреждений на единице площади экранирования, диаметр условных равномерно распределенных повреждений, дефектов при соединении полотнищ и распределение повреждений на различных этапах строительства.

Материалы и методы. Для анализа вероятностных значений повреждаемости полимерных пленочных экранов воспользуемся данными [4–8] для основных типов экранов и облицовок с пленочными противofильтра-

ционными элементами (грунтопленочных экранов и бетонопленочных облицовок). При этом из статистической обработки исключены значения с относительно высокой степенью повреждаемости от 0,20 % и выше, как данные для объектов с неудовлетворительным качеством.

Результаты и обсуждение. Результаты статистической обработки приведены в таблице 1, в ней через x_i обозначена повреждаемость пленочного экрана П, %, а через i – порядковый номер объекта.

Таблица 1 – Статистическая обработка натуральных данных о повреждаемости пленочных экранов

i	x_i	$x_i - \bar{x}$	$(x_i - \bar{x})^2$
1	0,173	0,1202	0,01445
2	0,150	0,0972	0,00945
3	0,0154	-0,0374	0,00140
4	0,033	-0,0198	0,00039
5	0,010	-0,0428	0,00183
6	0,0168	-0,0360	0,00130
7	0,00012	-0,0526	0,00278
8	0,0319	-0,0209	0,00044
9	0,045	-0,0078	0,00006
	$\Sigma = 0,475$		$\Sigma = 0,0321$

Определение числовых статистических характеристик и параметров производим по общеизвестным формулам [9, 10].

Выборочное среднее значение поврежденности (\bar{x}) экранов:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} = \frac{0,475}{9} = 0,0528 \%,$$

где n – количество объектов.

Дисперсия поврежденности (σ^2) пленочных экранов:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 = \frac{0,0321}{9-1} = 0,00401 \%.$$

Среднее квадратическое отклонение значения поврежденности пленочных экранов (σ):

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2} = \sqrt{0,00401} = 0,0633 \%.$$

Ошибка выборочной средней (σ_x^-):

$$\sigma_x^- = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} = \frac{0,0633}{\sqrt{9}} = 0,0211.$$

Относительная ошибка выборочной средней ($\sigma_{x\%}^-$):

$$\sigma_{x\%}^- = \frac{\sigma_x^-}{x} \cdot 100 = \frac{0,0211}{0,0528} \cdot 100 = 40 \ %.$$

Вероятность (P), с которой найдено среднее значение поврежденности, будет равна:

$$P = 100 - \sigma_{x\%}^- = 100 - 40 = 60 \ %.$$

Доверительный интервал значений поврежденности экранов:

$$\bar{x} \pm t_{95\%} \cdot \sigma_x^- = 0,0528 \pm 2,31 \cdot 0,0211 = 0,0040 \dots 0,1016 \ %,$$

где $t_{95\%}$ – теоретическое распределение Стьюдента, соответствующее вероятности $P = 95 \ %$.

Таким образом, анализ результатов статистической обработки данных о повреждаемости пленочных экранов позволяет заключить, что наиболее вероятный интервал повреждаемости при удовлетворительном качестве строительства с вероятностью $P = 95 \ %$ для практического использования (с учетом округления) будет равен 0,01–0,1 %. При этом нижнее значение интервала заменено с 0,004 на 0,01 %, что позволит упростить инженерные расчеты при оценке надежности экранов.

Анализ натуральных данных также показал, что среднее значение поврежденности пленочных экранов для удовлетворительного качества при современном уровне строительства соответствует 0,0528 % с вероятностью $P = 60 \ %$. Следует отметить, что дальнейшее статистическое накопление данных о повреждаемости пленочных экранов позволит уточнить выборочное среднее значение поврежденности, а следовательно и повысить вероятность его определения.

Рассматривая повреждения пленочного экрана как случайное собы-

тие, определим вероятность появления повреждений по классической формуле теории вероятностей [10]:

$$P_0(A) = \frac{m}{n}, \quad (1)$$

где $P_0(A)$ – вероятность появления события A (повреждения экрана);

m – число случаев, благоприятствующих событию A (число обследованных объектов с наличием повреждений в пленочном экране);

n – число независимых испытаний (общее число обследованных объектов).

Учитывая натурные данные о повреждаемости пленочных экранов на водоемах и прудах-накопителях (таблица 2) и на оросительных каналах, согласно которым общее число объектов $n = 21$, в т. ч. с повреждениями пленочного экрана $m = 20$, в соответствии с вышеприведенной формулой получим:

$$P_0(A) = \frac{20}{21} = 0,95.$$

Таблица 2 – Натурные данные о поврежденности грунтопленочных экранов (крупные и средние повреждения, обнаруженные в результате геофизического контроля) [4, 6]

Объект	Число повреждений на 1 га (частота повреждений)	Поврежденность, %	Диаметр отверстия, приведенного к 1 м ² , см
1	2	3	4
Тортгульское водохранилище	3,53	0,370	6,36
Хранилище фосфогипса комбината «Фосфорит»	3,24	0,173	4,70
Аварийный солеотвал Березниковского калийного завода	5,23	0,150	4,36
Накопитель МИС в пос. Калитино Ленинградской области	10,7	0,0154	1,40
Хранилище фосфогипса комбината «Фосфорит»	9,8	0,033	2,05
Пруд-накопитель в совхозе «Губкинский»	15	0,255	5,70
Накопитель Дорогобужского завода азотных удобрений	2	0,01	1,13

Продолжение таблицы 2

1	2	3	4
Регулирующий бассейн в Белгородской области	0	0,000027	0,058
Водоем в Белгородской области	0	0	0
Оросительная копань в Ленинградской области	0	0,0018	0,48
Накопитель Лисичанского содового завода	0	0,0014	0,42
Куйбышевский обводнительно-оросительный канал	–	0,20	5,05
Накопитель Новоджамбульского фосфорного завода	0	0,0014	0,42
Накопитель комбината «Беларуськалий»	0	0,00024	0,17
Накопитель комбината «Тувакобальт»	0	0,000025	0,056

С другой стороны, если учесть только высокую повреждаемость пленочных экранов, превышающую допустимые пределы ($\Pi > 0,1 \%$), то тогда можно определить вероятность появления отказов (повреждений пленочного экрана, приводящих к нежелательным последствиям: значительным потерям на фильтрацию и подъему уровня грунтовых вод):

$$P_0(A) = \frac{6}{21} = 0,285.$$

Таким образом, проведенные расчеты свидетельствуют о высокой вероятности повреждаемости пленочного экрана, которая составляет 0,95, т. е. можно предположить, что из 100 сооружаемых объектов только на пяти не имеется повреждений пленочного экрана. Вероятность же отказа пленочного экрана гораздо ниже и соответствует 0,285, что равнозначно одному отказу на три-четыре объекта.

Для оценки распределения повреждений (P_m) при строительстве грунтопленочных экранов на единице площади примем закон распределения редких явлений – распределение Пуассона [9, 10]:

$$P_m = \frac{v^m e^{-v}}{m!},$$

где $v = \bar{x}$ – интенсивность появления повреждений на единице площади;

$m!$ – количество повреждений на единицу площади.

Учитывая натурные данные о числе крупных и средних повреждений пленочных экранов на единице площади 1 га для 14 объектов (см. таблицу 2), обнаруженных в результате геофизического контроля различными организациями, проведем их обработку в соответствии с формулой (1). Результаты вычислений представлены в таблице 3.

Таблица 3 – Результаты вычислений распределения повреждений на единице площади по закону Пуассона

Интервал x_m с числом повреждений на 1 га	Число обследованных объектов (n_m)	Вероятность P_m	nP_m	$\frac{(n_m - nP_m)^2}{nP_m}$
0 (0)	7	0,368	5,15	0,665
1 (0–5)	3	0,368	5,15	0,898
2 (5–10)	2	0,184	2,57	0,126
3 (10–15)	} 2	0,0613	1,07	0,808
4 (> 15)		0,0153		
	$n = 14$			$\chi^2 = 2,497$

Определяем статистические характеристики:

$$v = \bar{x} = \frac{\sum n_m x_m}{n} = \frac{7 \cdot 0 + 3 \cdot 1 + 2 \cdot 2 + 1 \cdot 3 + 1 \cdot 4}{14} = 1,0,$$

$$\sigma = 1,25, \sigma_x = 0,334, \sigma_{x\%} = 6,7 \%, P = 93,3 \%,$$

где n_m – число обследованных объектов;

x_m – интервал с числом повреждений на 1 га;

σ_x – среднеквадратическое отклонение среднего значения повреждаемости.

Доверительный интервал числа повреждений на единице площади:

$$5 \cdot \bar{x} \pm t_{95\%} \sigma_x = 5 \cdot 1,0 \pm 2,31 \cdot 0,334 = 4,23...5,77.$$

Критерий Пирсона (χ^2) [9]:

$$\chi^2 = \sum \frac{(n_m - nP_m)^2}{nP_m} = 2,497, \chi_{\text{кр}}^2(0,05; 2) = 6,0.$$

Так как вычисленный критерий Пирсона $\chi^2 < \chi_{\text{кр}}^2$ ($2,497 < 6,0$), то гипотеза о распределении повреждений на единице площади по закону Пуассона принимается (где $\chi_{\text{кр}}^2$ – критический критерий Пирсона, определяемый по таблицам [9]).

Подставляя найденные статистические характеристики в формулу (1), получим следующую зависимость вероятности распределения поврежденных грунтопленочных экранов на единице площади экранирования (интенсивности появления средних и крупных повреждений):

$$P_m = \frac{(1,0)^m e^{-1,0}}{m!} = \frac{0,368}{m!},$$

где $m = 0, 1, 2 \dots$ – интервалы повреждений, соответственно равные числу повреждений 0–5, 5–10 и т. д.

При отсутствии полевых данных о повреждаемости пленочных экранов наиболее приемлемой расчетной схемой является равномерное распределение условных отверстий по площади экранирования. На основании анализа данных о диаметрах условных отверстий, приведенных к 1 м^2 площади экрана (таблица 2), примем гипотезу о соответствии выборок экспоненциальному распределению.

Критерий Колмогорова – Смирнова базируется на распределении максимального отклонения накопленной частности от значения функции распределения. При проверке экспоненциального распределения вычисляются следующие статистики (D_n^+ , D_n^- , D_n) [9]:

$$D_n^+ = \max_{1 \leq i \leq n} \left[\frac{i}{n} - 1 + \exp(-x_i / \bar{x}) \right],$$

$$D_n^- = \max_{1 \leq i \leq n} \left[1 - \exp(-x_i / \bar{x} - \frac{i-1}{n}) \right],$$

$$D_n = \max \cdot [D_n^+; D_n^-], \quad (2)$$

и составляют критерий Колмогорова – Смирнова:

$$\left(D_n - \frac{0,2}{n}\right)\left(\sqrt{n} + 0,26 + \frac{0,5}{\sqrt{n}}\right) \leq \lambda_\alpha,$$

где λ_α – критическое значение, принимаемое по статистическим таблицам [9].

При выполнении условия (2) нулевую гипотезу принимают, и наоборот, при невыполнении – отвергают. Критическое значение для этого случая составляет $\lambda_{0,05} = 1,09$.

Результаты расчетов сведены в таблицу 4, где через x_i обозначен диаметр условного отверстия d_0 , см.

Таблица 4 – Результаты вычислений распределения диаметров условных отверстий по экспоненциальному закону

i	x_i	x_i / \bar{x}	$\exp(-\frac{x_i}{x})$	$\frac{i}{n}$	$\frac{i-1}{n}$	$\frac{i}{n} - 1 + \exp(-\frac{x_i}{x})$	$1 - \exp(-\frac{x_i}{x}) - \frac{i-1}{n}$
1	0	0	1,0	0,067	0	0,067	0
2	0,056	0,026	0,974	0,133	0,067	0,107	-0,041
3	0,058	0,027	0,973	0,200	0,133	0,173	-0,106
4	0,170	0,079	0,924	0,267	0,200	0,191	-0,124
5	0,420	0,195	0,823	0,333	0,267	0,156	-0,090
6	0,420	0,195	0,823	0,400	0,333	0,223	-0,156
7	0,480	0,222	0,801	0,467	0,400	-0,268	-0,201
8	1,130	0,524	0,592	0,533	0,467	0,115	-0,059
9	1,400	0,649	0,523	0,600	0,533	0,123	-0,056
10	2,050	0,950	0,387	0,667	0,600	0,054	-0,014
11	4,360	2,021	0,133	0,733	0,667	-0,200	-0,200
12	4,700	2,180	0,133	0,800	0,733	-0,087	-0,154
13	5,050	2,341	0,096	0,867	0,800	-0,037	-0,104
14	5,700	2,643	0,071	0,933	0,867	0,004	-0,062
15	6,360	2,949	0,052	1,00	0,933	0,052	-0,015

По результатам вычисления получим:

$$D_n = \max \cdot [0,288; 0,200] = 0,288.$$

В соответствии с условием (2) проверяем нулевую гипотезу:

$$\left(0,268 - \frac{0,2}{\sqrt{15}}\right)\left(\sqrt{15} + 0,26 + \frac{0,50}{\sqrt{15}}\right) = 0,922 < \lambda_{0,05} = 1,09.$$

Таким образом, условие (2) выполняется. Это означает, что опытные

данные не противоречат предположению об экспоненциальном распределении диаметров условных отверстий повреждений пленочных экранов.

Определим доверительный интервал наиболее вероятного значения диаметра условного отверстия, приведенного к 1 м^2 . Статистические характеристики будут равны:

$$\bar{x} = 2,157 \text{ см}, \sigma = 2,36 \text{ см}, \sigma_x^- = 0,609, \sigma_{x\%}^- = 28,2 \text{ \%}.$$

Вероятность, с которой найдено среднее значение диаметра отверстия:

$$P = 100 - \sigma_{x\%}^- = 100 - 28,2 = 72 \text{ \%}.$$

Доверительный интервал:

$$\bar{x} \pm t_{95\%} \cdot \sigma_x^- = 2,157 \pm 2,15 \cdot 0,809 = 0,85...3,47 \text{ см}.$$

Следовательно, наиболее вероятные значения диаметров условных повреждений (отверстия, приходящиеся на 1 м^2 экрана) с вероятностью 95 % находятся в интервале 0,85–3,47 см.

Аналитическое выражение плотности вероятности при экспоненциальном законе распределения имеет вид [9]:

$$f(x) = \lambda e^{-\lambda x} (0 < x < \infty),$$

где λ – интенсивность отказов, определяемая как величина, обратная среднеквадратическому отклонению случайной величины ($\lambda = 1/\sigma$).

Плотность распределения случайной величины, или вероятность появления отказов, будет равна:

$$f(x) \begin{cases} 1 - e^{-\lambda x} & \text{при } x \geq 0 \\ 0 & \text{при } x < 0 \end{cases}.$$

Учитывая полученное значение среднеквадратического отклонения, найдем:

$$\lambda = 1/2,36 = 0,424,$$

тогда аналитические выражения плотности вероятности и функции распределения диаметров условных отверстий повреждений пленочного экрана получают вид:

$$f(d) = 0,424e^{-0,424d_0},$$

$$f(d_0) = P = 1 - e^{-0,424d_0}.$$

Рассмотрим теперь статистическую обработку результатов исследований дефектов соединительных швов пленочных экранов, выполняемых как в полевых, так и в заводских условиях. Задачей данных расчетов является определение средней величины дефектов шва при сварке пленки и вероятности их появления вследствие недовара или пережога шва.

Для определения закона распределения дефектов соединительных швов при сварке различными способами нами использованы результаты обследований Н. А. Кильдишева [4].

В таблице 5 приведены результаты исследований дефектов соединений при полевой сварке импульсным полозом, записанные в порядке возрастания их численной величины (длины дефекта) с учетом группировки исходных данных по определенным равным интервалам, т. е. в виде вариационного ряда, отдельно по обследованным объектам. Статистическая обработка суммарных данных представлена в таблице 6.

Таблица 5 – Распределение дефектов соединений при полевой сварке импульсным полозом (по данным Н. А. Кильдишева) [4]

Интервал, мм	Количество дефектов на 1 км шва				Всего дефектов
	Совхоз им. Ленина	Тувакобальт	Накопитель фосфора	Совхоз «Дружба»	
0–10	5	14	18	11	48
10–20	41	26	13	31	111
20–30	52	31	21	33	137
30–40	27	14	28	37	106
40–50	24	8	24	24	80
50–60	18	2	10	13	43
60–70	11	3	7	–	21
70–80	6	2	–	–	8
80–90	–	4	–	–	4
90–100	–	–	11	–	11
100–110	–	–	3	–	3
110–120	–	–	1	–	1

Таблица 6 – Результаты вычислений распределения дефектов соединений по логарифмически нормальному закону

Интервал, мм	Середина интервала x_i	Число наблюдений n_i	$n_i x_i$	$n_i x_i^2$	$u_i = \lg(n_i \cdot x_i)$	u_i^2
0–10	5	48	240	1200	2,38	5,67
10–20	15	111	1665	24975	3,22	10,38
20–30	25	137	3425	85625	3,53	12,49
30–40	35	106	3710	129850	3,57	12,74
40–50	45	80	3600	162000	3,56	12,65
50–60	55	43	2365	130075	3,37	11,38
60–70	65	21	1365	88725	3,14	9,83
70–80	75	8	600	45000	2,78	7,72
80–90	85	4	340	28900	2,53	6,41
90–100	95	11	1045	99275	3,02	9,12
100–110	105	3	315	33075	2,50	6,24
110–120	115	1	115	13225	2,06	4,25
		$\Sigma = 573$	$\Sigma = 18785$	$\Sigma = 841925$	$\Sigma = 35,66$	$\Sigma = 108,88$

На основании выполненных расчетов получены следующие числовые статистические характеристики.

Выборочная средняя величины дефекта:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^e x_i n_i}{n} = \frac{18785}{573} = 32,8 \text{ мм.}$$

Дисперсия случайной величины:

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{n-1} \left[\sum_{i=1}^e x_i^2 n_i - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^e x_i n_i \right)^2 \right] = \frac{1}{573-1} \left[841925 - \frac{1}{573} (18785)^2 \right] = 395,37 \text{ мм}^2.$$

Среднее квадратическое отклонение:

$$\sigma_x = \sqrt{\sigma_x^2} = \sqrt{395,37} = 19,9 \text{ мм.}$$

Ошибка выборочной средней:

$$\sigma_{\bar{x}} = \frac{\sigma_x}{\sqrt{n}} = \frac{19,9}{\sqrt{575}} = 1,026 \text{ мм.}$$

Найдем доверительный интервал:

$$\bar{x} \pm t_{95\%} \cdot \sigma_{\bar{x}} = 32,8 \pm 2,26 \cdot 1,026 = 30,5 \dots 35,1 \text{ мм.}$$

Таким образом, наиболее вероятные значения дефектов соединений при сварке импульсным полюзом находятся в интервале 30,5–35,1 мм.

Для установления закона распределения случайной величины – длины дефекта шва при полевой сварке импульсным полозом примем гипотезу о логарифмически нормальном законе распределения. Проверку гипотезы осуществляем по критерию согласия Шапиро – Уилка, который используется при ограниченном объеме выборки [9].

Критерий Шапиро – Уилка (W) вычисляют по зависимости:

$$W = b^2 / \sigma_{u_1}^2,$$

где $b = \sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (u_{n-i+1} - u_i)$, b^2 , $\sigma_{u_1}^2$ – статистические показатели, определяемые по справочнику Дж. Полларда [9];

$$\sigma_{u_1}^2 = \sum_{i=1}^n u_i^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n u_i)^2}{n};$$

a_{n-i+1} – значения для $i = 1, 2, \dots, k$, которые берутся из таблиц справочника Дж. Полларда [9], причем если n четное число, то $k = n/2$, если n – нечетное число, то $k = (n - 1)/2$.

Располагая значения (u_i) в порядке возрастания в вариационный ряд, вычисляем:

$$b = 1,638, \sigma_{u_1}^2 = 2,91,$$

тогда критерий Шапиро – Уилка по зависимости:

$$W = 1,638^2 / 2,91 = 0,922.$$

Так как $W > W_{\alpha=0,05}$ ($0,922 > 0,859$), эмпирическое распределение соответствует логарифмически нормальному закону распределения (нулевую гипотезу принимают).

Аналитические зависимости функции распределения и плотности вероятности случайной величины $u_i = \lg(n_i \cdot x_i)$ будут иметь вид [9, 10]:

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(u-a_u)^2}{2\sigma_u^2}} du,$$

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_u} e^{-\frac{(u-a_u)^2}{2\sigma_u^2}},$$

где a_u и σ_u^2 – соответственно математическое ожидание и дисперсия случайной величины u .

Вычислив характеристики $a_u = 2,97$, $\sigma_u^2 = 0,265$ и $\sigma_u = 0,514$, получим следующие выражения плотности вероятности распределения дефектов соединительного шва:

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,514} e^{-\frac{(u-2,97)^2}{0,530}},$$

где $u = \lg(nl_{\text{деф}})$;

n – число дефектов на 1 км шва;

$l_{\text{деф}}$ – длина дефекта соединения, мм.

Кроме того, проведен статистический анализ результатов исследования дефектов соединений склейкой битумно-полимерной мастикой при строительстве пленочного экрана водоема в Ульяновской области (таблица 7) [4, 6].

Таблица 7 – Распределение дефектов соединений при склейке битумно-полимерной мастикой в полевых условиях

Интервал, мм	Количество дефектов на участках швов длиной 85 м								Всего дефектов
	1	2	3	4	5	6	7	8	
0–10	6	8	3	1	2	5	6	1	32
10–20	10	15	8	12	11	10	4	19	89
20–30	8	11	5	9	11	5	2	7	58
30–40	6	7	4	6	9	3	2	2	39
40–50	2	5	1	3	3	4	2	–	20
50–60	–	5	1	2	3	2	2	2	17
60–70	1	3	–	2	–	1	1	1	9
70–80	–	–	–	1	1	–	–	1	3
80–90	–	–	1	1	–	–	1	–	3
90–100	–	1	–	1	1	–	–	–	3
100–110	–	–	–	–	–	–	1	–	2
110–120	–	1	1	–	–	–	–	–	2
120–130	–	–	–	1	1	1	–	–	3
130–300	–	1	–	–	2	1	–	–	4
									$\Sigma = 284$

Дефекты соединений битумно-полимерной мастикой в основном бы-

ли обусловлены следующими причинами: недостаточной шириной шва (в ряде случаев менее 0,5–1,0 см), пропусками проливаемой битумно-полимерной мастики, трудностью соединения в местах складок пленки, слабой адгезией мастики к пленке в местах ее загрязнения и использованием остывшей мастики с температурой ниже нормы.

По результатам аналогичных вычислений, как в предыдущем примере, получим следующие статистические характеристики:

$$\bar{x} = 32,3 \text{ мм}, \sigma_x^2 = 1005,7 \text{ мм}^2, \sigma_x = 1,88 \text{ мм},$$

$$\bar{x} \pm t_{93} \cdot \sigma_x = 28,0 + 36,5 \text{ мм}, \sigma_{x\%} = 5,8 \%, P = 94,2 \%.$$

Распределение дефектов клеевых соединений битумно-полимерной мастикой удовлетворяет логарифмически нормальному закону:

$$W > W_{\alpha=0,05} (0,881 > 0,874).$$

Функция распределения $F(u)$ и плотность вероятности случайной величины $\varphi(u)$ получают вид:

$$F(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,35} \int_{-\infty}^u e^{-\frac{(u-2,69)^2}{0,244}} du,$$

$$\varphi(u) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot 0,35} e^{-\frac{(u-2,69)^2}{0,244}},$$

где $u = \lg(n \cdot x) = \lg(0,85 \cdot n l_{\text{деф}})$.

Из этого следует, что распределение дефектов клеевых соединений битумно-полимерной мастикой удовлетворяет логарифмически нормальному закону, а по результатам обработки установлена функция распределения величины дефектов соединений полимерного экрана.

Выводы

1 При оценке надежности противотрационных экранов каналов и водоемов появление повреждений и дефектов в полимерном материале следует рассматривать как случайное событие, а их параметры необходимо определять по результатам статистической обработки.

2 По результатам статистической обработки натуральных данных о повреждаемости пленочных экранов каналов и водоемов получено выборочное среднее значение повреждаемости пленочного экрана, равное $G \equiv \bar{\chi} = 0,0528$ % со среднеквадратическим отклонением $\sigma = 0,0633$.

3 Вероятность повреждаемости пленочных экранов на водоемах, накопителях и каналах по формуле теории вероятности составляет $P_0(A) = 0,95$, а если учесть только высокую повреждаемость ($P > 0,1$ %), то тогда вероятность появления отказов будет равна $P_0(A) = 0,285$.

4 С учетом натуральных данных о числе крупных и средних повреждений пленочных экранов на площади 1 га по формуле распределения редких явлений Пуассона доверительный интервал числа повреждений составляет 4,23–5,77 шт./га при соблюдении критерия Пирсона $\chi^2 < \chi_{кр}^2 (2,497 < 6,0)$.

5 На основании анализа диаметров условных отверстий, приведенных к 1 м² площади экрана, согласно гипотезе о соответствии экспоненциальному распределению доверительный интервал диаметра условного отверстия составляет 0,85–3,47 см/м² площади экрана, что подтверждается критерием согласия Колмогорова – Смирнова.

6 Распределение дефектов соединений при полевой сварке импульсным полюзом по логарифмически нормальному закону согласно критерию Шапиро – Уилка составляет 30,5–35,1 мм при $W > W_{\alpha=0,05} (0,922 > 0,859)$.

Список использованных источников

1 Основные принципы и методы эксплуатации магистральных каналов и сооружений на них: монография / В. Н. Щедрин [и др.]; под общ. ред. В. Н. Щедрина. – Новочеркасск: РосНИИПМ, 2015. – 361 с.

2 Белов, В. А. Инженерная защита крупных каналов в сложных условиях эксплуатации / В. А. Белов, А. А. Кондратенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2005. – № 1(129). – С. 87–88.

3 Баев, О. А. Применение планирования эксперимента для изучения водопроницаемости экрана из геомембраны / О. А. Баев // Природообустройство. – 2014. – № 3. – С. 46–51.

4 Кильдишев, Н. А. Исследование повреждаемости и разработка методов повышения противоточных свойств пленочных экранов гидротехнических сооружений: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.23.07 / Кильдишев Николай Александрович. – М., 1981. – 19 с.

5 Поляков, С. А. Надежность противofильтрационных облицовок и экранов с применением пленочных материалов на оросительных каналах и водоемах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 06.01.02 / Поляков Сергей Алексеевич. – Новочеркасск, 1993. – 26 с.

6 Щедрин, В. Н. Эксплуатационная надежность оросительных систем / В. Н. Щедрин, Ю. М. Косиченко, А. В. Колганов. – Ростов н/Д.: СКНЦ ВШ, 2004. – 388 с.

7 Ищенко, А. В. Теоретическая модель водопроницаемости бетонопленочного противofильтрационного покрытия канала / А. В. Ищенко // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2007. – № 1. – С. 93–98.

8 Чернов, М. А. Обоснование противofильтрационной эффективности облицовок каналов с применением полимерных материалов / М. А. Чернов // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2011. – № 2. – С. 108–114.

9 Поллард, Дж. Справочник по вычислительным методам статистики / Дж. Поллард; пер. с англ. В. С. Занадворова. – М.: Финансы и статистика, 1982. – 344 с.

10 Надежность и эффективность в технике: справочник в 10 т. Т. 2. Математические методы в теории надежности и эффективности / В. В. Белов [и др.]; под ред. Б. В. Гнеденко. – М.: Машиностроение, 1987. – 280 с.

References

1 Shchedrin V.N. [et al.], 2015. *Osnovnye printsipy i metody ekspluatatsii magistral'nykh kanalov i sooruzheniy na nikh: monografiya* [Basic Principles and Methods of Operation of Main Canals and Their Facilities: monograph]. Novocherkassk, RosNIIPM Publ., 361 p. (In Russian).

2 Belov V.A., Kondratenko A.A., 2005. *Inzhenernaya zashchita krupnykh kanalov v slozhnykh usloviyakh ekspluatatsii* [Engineering protection of large canals under difficult operating conditions]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Technical Sciences], no. 1(129), pp. 87-88. (In Russian).

3 Baev O.A., 2014. *Primenenie planirovaniya eksperimenta dlya izucheniya vodopronitsaemosti ekrana iz geomembrany* [Applying of planning the experiment for studying water permeability of geomembrane screen]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 3, pp. 46-51. (In Russian).

4 Kil'dishev N.A., 1981. *Issledovanie povrezhdaemosti i razrabotka metodov povysheniya protivofil'tratsionnykh svoystv plenochnykh ekranov gidrotekhnicheskikh sooruzheniy. Avtoreferat diss. kand. tech. nauk* [Investigation of damage and development of methods to increase the impervious properties of film screens of hydraulic structures. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Moscow, 19 p. (In Russian).

5 Polyakov S.A., 1993. *Nadezhnost' protivofil'tratsionnykh oblitsovok i ekranov s primeneniem plenochnykh materialov na orositel'nykh kanalakh i vodoemakh. Avtoreferat diss. kand. tech. nauk* [Reliability of impervious lining and screens with the use of film materials on irrigation canals and reservoirs. Abstract of cand. tech. sci. diss.]. Novocherkassk, 26 p. (In Russian).

6 Shchedrin V.N., Kosichenko Yu.M., Kolganov A.V., 2004. *Ekspluatatsionnaya nadezhnost' orositel'nykh sistem* [Operational Reliability of Irrigation Systems]. Rostov-on-Don, SKNTs HSh. Publ., 388 p. (In Russian).

7 Ishchenko A.V., 2007. *Teoreticheskaya model' vodopronitsaemosti betonoplenochnogo protivofil'tratsionnogo pokrytiya kanala* [Theoretical model of water permeability of concrete-film impervious coating of the canal]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [Proc. of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Engineering], no. 1, pp. 93-98. (In Russian).

8 Chernov M.A., 2011. *Obosnovanie protivofil'tratsionnoy effektivnosti oblitsovok kanalov s primeneniem polimernykh materialov* [Justification of the antifiltration efficiency of the canals lining using polymer materials]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Severo-Kavkazskiy region. Seriya: Tekhnicheskie nauki* [News of Higher Educational Institutions. North Caucasus Region. Series: Engineering], no. 2, pp. 108-114. (In Russian).

9 Pollard J., 1982. *Spravochnik po vychislitel'nyim metodam statistiki* [Handbook of Computational Methods of Statistics]. Moscow, Finance and Statistics Publ., 344 p. (In Russian).

10 Belov V.V. [et al.], 1987. *Nadezhnost' i effektivnost' v tekhnike: spravochnik v 10 t. T 2. Matematicheskie metody v teorii nadezhnosti i effektivnosti* [Reliability and efficiency in technology: a reference book of 10 vol. Vol. 2. Mathematical Methods in the Theory of Reliability and Efficiency]. Moscow, Mechanical Engineering Publ., 280 p. (In Russian).

Косиченко Юрий Михайлович

Ученая степень: доктор технических наук

Ученое звание: профессор

Должность: главный научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru

Kosichenko Yuriy Mikhaylovich

Degree: Doctor of Technical Sciences

Title: Professor

Position: Chief Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: kosichenko-11@mail.ru

Баев Олег Андреевич

Ученая степень: кандидат технических наук

Должность: старший научный сотрудник

Место работы: федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Российский научно-исследовательский институт проблем мелиорации»

Адрес организации: Баклановский пр-т, 190, г. Новочеркасск, Ростовская область, Российская Федерация, 346421

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru

Baev Oleg Andreyevich

Degree: Candidate of Technical Sciences

Position: Senior Researcher

Affiliation: Russian Scientific Research Institute of Land Improvement Problems

Affiliation address: Baklanovsky ave., 190, Novocherkassk, Rostov region, Russian Federation, 346421

E-mail: Oleg-Baev1@yandex.ru