

УДК 626.86 (474.5)

**ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ ОСУШИТЕЛЬНЫХ СИСТЕМ**

***Н.П. Бастене, В.Б. Шаулис,***

(Институт водного хозяйства Литовского сельскохозяйственного университета)

Государственные субсидии на эксплуатацию осушительных систем, как и любые сельскохозяйственные инвестиции, должны быть использованы с наибольшей прибылью. При любых экономических решениях должна прослеживаться связь экономических показателей с природными и хозяйственными условиями: природно-климатическими условиями, рельефом, почвенным покровом, степенью регулирования водного режима, уровнем агротехники, продуктивностью хозяйства и, конечно, экологическими показателями. По этим критериям на территории Литвы можно выделить три группы районов [1], в которых природно-климатические условия, рельеф, почвенный покров и уровень сельскохозяйственного производства различны (рис. 1).

К первой группе относятся районы Средне-Литовской низменности с самыми плодородными дренированными землями и интенсивным растениеводством (урожай зерновых до 75 ц/га). Инвестиции в эксплуатацию осушительных систем здесь используются наиболее эффективно. Вторая группа районов – с землями меньшего плодородия. Здесь развито растениеводство с направлением: кормовая база и животноводство, поэтому требования к эксплуатации осушительных систем не такие высокие. К третьей группе относятся районы с холмистым рельефом и низким плодородием почв, осушение которых неэффективно, а капиталовложения на эксплуатацию уже осушенных земель часто экономически необоснованны.

На 1 января 2003 г. в Литве осушено более 2,98 млн. га переувлажненных земель, в том числе дренажем – 2,58 млн. га. По данным Министерства сельского хозяйства, на 1 января 1998 г. площадь земель с неисправным дренажем составляла 51,9 тыс.га, т.е. около 2,0 % всех дренированных площадей, а ремонт дренажа необходим на площади 275,5 тыс. га, что составляет 10,7 %.

Ежегодно Литва теряет в среднем 20-25 тыс.га [2] дренированных земель. Государство не способно обеспечить все потребности в расходах на эксплуатацию мелиоративных систем, для этой цели необходимо подключать и инвестиции собственников земли.



Рис. 1. Распределение территории по природно-экономическим условиям эксплуатации осушительных систем [1].

Критическую ситуацию в эксплуатации мелиоративных систем подтверждает и ежегодное увеличение разности между количеством неисправностей дренажа, с одной стороны, и восстановлением и ремонтом дренажных систем, с другой стороны. Если в 1999 г. было устранено около 60% неисправностей, то уже в 2001 г. – только 40% [3].

Сегодня более 90% сельскохозяйственной продукции Литва получает на осушенных землях. Осушительные системы и гидротехнические сооружения здесь построены почти исключительно за счет государственных инвестиций. В ходе аграрной реформы к 1 января 2003 г. сельскохозяйственные угодья в частных хозяйствах составили более 60%, однако осушительные системы и гидротехнические сооружения на них, в основном, являются государственной собственностью. На плечи государства ложатся и все расходы на эксплуатацию систем. Существует полная экономическая дотация фермеров: доход – фермеру, расходы по эксплуатации осушительных систем – государству.

В феврале 2004 г. принята новая редакция закона о мелиорации, в котором осушительная часть (осушители и коллекторная сеть

диаметром до 12,5 см) систем передана собственникам как принадлежность земли, а водоотводящая часть (каналы и коллекторы диаметром 12,5 см и более) осталась за государством.

Частные инвестиции фермеров в эксплуатацию осушительных систем обострили вопрос об их экономической целесообразности. Каким должно быть техническое состояние осушительных систем, чтобы было экономически целесообразно их ремонтировать, и при каком состоянии необходима реновация дренажа? Следуя приоритетам регионального развития, государство заинтересовано обеспечить страну продовольствием, фермеры – получить наибольшую прибыль.

Проверить техническое состояние сооруженного несколько десятилетий назад дренажа – трудная задача: системы к этому не приспособлены, наконец, невозможно и нецелесообразно установить столько контрольных и смотровых колодцев, чтобы постоянно следить за техническим состоянием всех систем.

Для оценки технического состояния различных технических объектов, в том числе и гидротехнических (осушительные системы), применяются методы теории достоверности [4-6]. Первые работы по оценке состояния технических объектов методами теории достоверности принадлежат русским ученым Б.В. Гнеденко, Ю.К. Беляеву и А.Д. Соловьеву [7] и американцам Р. Барлоу и Ф. Прошану [8]. В области эксплуатации мелиоративных объектов методы теории достоверности впервые использовали Н.И. Хрисанов и В.А. Камбуров [9], а также Ц.Е. Мирцхулава [10]. По мнению Мирцхулавы, анализ достоверности работы эксплуатируемых дренажных сооружений обязателен потому, что позволяет определить закономерности возникновения неисправностей, оценить качество эксплуатационных работ, прогнозировать частоту и масштабность неисправностей и тем самым лучше планировать ремонтно-восстановительные работы. Н.И. Хрисанов и В.А. Камбуров показали, что, используя методы теории достоверности, основываясь на данных, собранных во время эксплуатации дренажных систем, можно определить основные показатели работы систем: вероятность возникновения, частоту и интенсивность неисправностей и среднее время эксплуатации до их возникновения. Авторы [9, 11], используя десятилетние (1965-1975 гг.) данные по эксплуатации дренажных систем, подсчитали, что среднее время эксплуатации до возникновения неисправностей дренажных систем – 19-21 год.

В Литве методы теории достоверности при эксплуатации дренаж-

ных систем первым начал применять Р.Чижаускас [3]. Основным критерием достоверной работы дренажа он считал время до возникновения неисправности и определил, что вероятность времени появления неисправностей, в основном, зависит от осушаемых почв: на тяжелых глинистых почвах время работы дренажных систем 20-25, а на легких песчаных и торфяных почвах – 10-15 лет.

Исследования эксплуатации в разных условиях работы дренажа в Институте водного хозяйства ведутся и по сегодняшний день. Апробирована прелиминарная методика расчета достоверной работы дренажных систем [1, 12]. Установлено, что достоверная работа мелиоративных объектов зависит от ряда случайных признаков: природно-климатических условий, технологии и качества строительства дренажа, ухода за системами и особенностей сельскохозяйственного использования дренированных земель. Собранные многолетние данные по эксплуатации осушительных систем дают возможность с наибольшей вероятностью оценить надежность их работы.

Для установления показателей надежности дренажных систем использовались натурные данные, собранные в разных регионах по природным и экономическим условиям эксплуатации дренажа в период от 1996 до 2001 г. Фиксировалось количество и причины неисправностей, площадь и срок службы дренажа до появления неисправностей. Собранный материал позволил применить для обработки данных методы теории вероятностей и математической статистики [13-15].

Чтобы получить статистически достоверные результаты, прежде всего нужно уточнить - достаточно ли количество натурных данных ( $n_t$ ):

$$n_t = \frac{\left( z_{1-\alpha/2} \right)^2 \cdot \sigma^2}{E_0^2}, \quad (1)$$

где  $z_{1-\alpha/2}$  – значение нормированного нормального распределения (квантиль) ( $\alpha = 1-\gamma$ );

$\gamma$  – уровень значимости. Чтобы вероятность ошибки ( $1-\gamma$ ) была наименьшей, уровень значимости должен быть близок к единице. В сельскохозяйственных, технических исследованиях и эксплуатационных вычислениях водопроводных сооружений применяется вероятность ошибки 5-10 % ( $\gamma = 0,90-0,95$ ) [8, 9]. При  $\gamma = 0,90$ ,  $z_{1-\alpha/2} \cong 1,64$ ; а при  $\gamma = 0,95$ ,  $z_{1-\alpha/2} \cong 1,96$ ;

$E_0$  - доверительный интервал среднего значения. Для вычисления среднего срока службы дренажа размах доверительного интервала  $E_0 = 1$  год;

$\sigma^2$  – дисперсия срока службы дренажных объектов (генеральная совокупность).

При достаточно большом объеме выборки ( $n > 30$ ) оценка  $\sigma^2$  практически совпадает с дисперсией срока службы отремонтированных дренажных объектов, т. е.  $\sigma^2 = S^2$ .

**Таблица 1.** Вычисление достаточного количества натуральных данных

Статистические параметры	Условия эксплуатации дренажа		
	хорошие (I)	удовлетворительные (II)	сложные (III)
Дисперсия $\sigma^2$	51,2	40,6	54,7
Теоретический объем выборки $n_t$ , когда:			
уровень значимости $\gamma = 0,95$ ;	197	156	210
уровень значимости $\gamma = 0,90$ ;	138	109	147
Фактический объем выборки $n_\phi$	483	365	149

Теоретически, чем больше дисперсия собранной информации, тем больше количество данных надо проанализировать для вынесения суждений. Наибольшей дисперсией отличается время до появления неисправностей там, где дренажные системы функционируют в сложных мелиоративных условиях ( $\sigma^2 = 54,7$ ). На основе фактически собранных данных ( $n_\phi = 149$ ) средний срок службы дренажа здесь можно определить с 10%-ной погрешностью (табл. 1). Ввиду того, что такая погрешность в расчетах надежности допускается, считаем, что для получения статистически достоверных результатов такого количества данных достаточно. Объем выборки в хороших и удовлетворительных мелиоративных условиях получен в 2,4 раза больше теоретически нужного. Это позволяет определить максимально правдоподобный (с 95%-ным уровнем значимости) средний срок службы дренажа.

Установлено, что в среднем регионе Литвы, где условия эксплуатации дренажа хорошие (равнинный рельеф, стабильные грунты), среднее время функционирования дренажных систем достигает 28 лет. В районах, где условия эксплуатации удовлетворительные, дренаж без отказа действует в среднем 25 лет, а в сложных условиях – 24 года (табл. 2).

Поскольку основная наша задача – оценить надежность дренажных объектов, устроенных в разных условиях, необходима проверка гипотезы об отличии их по изучаемому параметру, т. е. среднему сроку их службы. Выводы об отличии производятся с помощью критерия, функция мощности которого (при достаточно большой выборке) приблизительно равна [14]:

**Таблица 2.** Статистические характеристики среднего срока службы  $\bar{t}$  дренажа

Статистические характеристики	Условия эксплуатации дренажа		
	хорошие (I)	удовлетворительные (II)	сложные (III)
Среднее значение $\bar{t}$ , лет	28	25	24
Дисперсия $S^2$	51,2	40,6	54,7
Стандартное отклонение $S$ , лет	7,2	6,4	7,4
Коэффициент вариации $V$ , %	25,2	25,5	30,4
Ошибка среднего	0,3	0,3	0,6
Относительная ошибка среднего $S_{\bar{t}}$ , %	1,2	1,3	2,5
Доверительный интервал $E$ при 95%-ном уровне значимости, лет	±0,6	±0,7	±1,2

$$T = \frac{\bar{x} - \bar{y} - a_0}{\sqrt{mS_1^2 + nS_2^2}} \cdot \sqrt{mn} \quad (2)$$

где  $\bar{x}$  и  $\bar{y}$  – сравниваемые выборочные средние;

$a_0$  – разница выборочных средних;

$m, n$  – объем выборок в сравниваемых условиях;

$S_1^2, S_2^2$  – дисперсии времени эксплуатации дренажных объектов.

Гипотеза о равных средних опровергается, если значение функции мощности  $T > t_{0,975}$ . В обратном неравенстве ( $T < t_{0,975}$ ) можно считать, что отличие средних незначимое ( $t_{0,975}$  – распределение Стьюдента со степенью свободы  $n$ ). Результаты проверки гипотез о средних представлены в табл. 3.

Расчеты показали, что значимо отличается срок надежного действия дренажа в I-II и I-III группе районов. Длительность эффективного

функционирования дренажных систем в районе хороших мелиоративных условий (I группа) достигает 28 лет. При удовлетворительных (II группа) и сложных (III группа) условиях нарушения появляются через 25-24 года. Отличия средних условий между районами II и III групп статистически незначимы.

Из полученных результатов следует, что фактическая длительность функционирования дренажа почти наполовину короче нормативной, установленной согласно нормам амортизации. Нормативный срок службы гончарного дренажа колеблется от 50 до 80 лет (в среднем 65 лет). Одной из главных причин такой разницы являются недостаточные меры по нормальной эксплуатации мелиоративных систем. Вследствие такой ситуации, когда службы, ответственные за уход дренажных систем, не способны гарантировать своевременный ремонт и реконструкцию, время эксплуатации дренажа становится важным показателем эффективности его действия. Иначе говоря, вероятность появления неисправностей дренажа можно тесно связывать со временем его эксплуатации.

**Таблица 3.** Сравнение дренажных объектов по времени эксплуатации до появления неисправностей

Сравниваемые группы	Объем выборок $n; m$	Вычисленные средние $\bar{x}; \bar{y}$	Стандартные отклонения $S_1; S_2$	Функция мощности $T$	Число степеней свободы $n$	$t$ -распределение Стьюдента $t_{0,975}$	Оценка отличий
I II	483 365	28 25	7,2 6,4	6,44	823	1,96	$T > t_{0,975}$
II III	365 149	25 24	6,4 7,4	1,45	242	1,97	$T < t_{0,975}$
I III	483 149	28 24	7,2 7,4	5,82	239	1,97	$T > t_{0,975}$

Прогнозировать появление неисправностей можно при помощи математической статистики. Для этого надо установить характер возможного распределения исследуемого явления, по которому можно судить о вероятности появления события. В математической статистике имеются разные распределения, каждое из них имеет свою сферу применения [4]. Время до появления неисправностей технических сооружений обычно распределяется по нормальному закону Гаусса, который характеризуется функцией правдоподобия выборки [5, 10, 15]:

$$f(t_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left( -\frac{t_i - \bar{t}}{2\sigma^2} \right), \quad (3)$$

где  $t_i$  – среднее значение интервала;

$\bar{t}$  – среднее значение выборки;

$\sigma^2$  – дисперсия выборки.

Для установления значений этой функции собранные данные разбиваются по группам, соответствующим определенным интервалам [4]:

$$h = \frac{t_{max} - t_{min}}{1 + 3.3 \lg N}, \quad (4)$$

где  $h$  – ширина интервала;  $N$  – общее число наблюдений;

$t_{max} - t_{min}$  – крайние значения времени эксплуатации дренажа;

Для каждого интервала выбирается число нарушений, которое показывает истинную частоту событий ( $m_i$ ) в данном интервале времени. Вероятность появления событий ( $P_i$ ) в интервале оценивается по формуле:

$$P_i = \frac{m_i}{N}. \quad (5)$$

Используя эти данные, можно провести сравнение эмпирического распределения с теоретическим при помощи  $\chi^2$  – критерия согласия Пирсона. Для заданного гипотетического распределения вычисляются теоретические значения вероятности наблюдения событий в  $i$ -интервале. По теории вероятностей сумма всех возможных значений вероятности случайной величины равна единице. Располагая выборкой с объемом  $n$ , составляем сумму [14]:

$$T = \sum_{i=1}^k \frac{m_i - np_i}{np_i}, \quad (6)$$

где  $k$  – число интервалов;  $m_i$  – число нарушений дренажа в данном интервале времени;  $p_i$  – вероятность появления нарушений в  $i$ -ном интервале;  $n$  – объем выборки.

При достаточно большом  $n$  случайные величины стремятся к переменным, имеющим нормированное нормальное распределение. Гипотеза согласия гипотетического распределения с эмпирическим принимается при условии  $T < c_{1-\alpha}^2$ . При расчетах получено, что  $T=8,1$ , а критерий  $c_{1-\alpha}^2=12,6$  (уровень значимости  $\alpha = 0,005$ ). Это позволяет утверждать, что

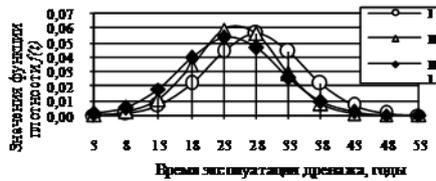


Рис. 2. Функции плотности нормально-го распределения для среднего срока службы дренажных систем

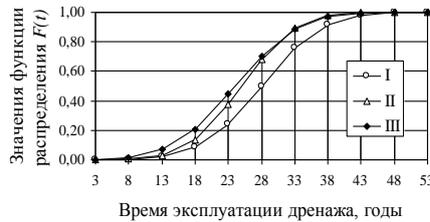


Рис.3. Интегральные функции распределения времени эксплуатации дренажа

время функционирования дренажа имеет нормальное распределение.

На основании параметров (выборочного среднего и дисперсии) этого распределения для каждой группы районов можно построить графики функции плотности, значения которых вычисляются по формуле (3). С их помощью можно вычислить вероятность появления неисправностей любого времени эксплуатации дренажных систем (рис. 2).

Она определяется по площади, образованной под кривой, оценивающей частоты неисправностей, до соответствующего значения времени эксплуатации. Пользуясь пакетом статических функций программы MS EXCEL, выполнить это нетрудно. Обратная задача решается при помощи интегральных функций (рис. 3).

Значения интегральной функции распределения определяются последовательным суммированием значения дифференциальной функции плотности по формуле (3). Как показывают полученные результаты, время эксплуатации дренажных систем предопределено специфическими мелиоративными условиями. В I группе районов стопроцентная вероятность нарушений достигается после 50 лет эксплуатации, т.е. на 5 лет позднее, чем при удовлетворительных и сложных условиях (II и III группы районов). В зависимости от того, в какой группе районов находятся дренированные земли, вероятность появления неисправностей бывает разной (табл. 4).

Аналогичные расчеты можно провести для любой дренированной площади отдельно, только надо знать параметры распределения времени эксплуатации до появления неисправностей в конкретной местности и время после устройства дренажа. Чем старше дренажные системы, тем больше вероятность их неисправностей.

**Таблица 4.** Вероятность появления неисправностей дренажа, %

Время эксплуатации, лет	Условия эксплуатации дренажа		
	хорошие (I)	удовлетворительные (II)	сложные (III)
15	4	6	11
20	13	22	29
25	34	50	55
30	61	78	79
35	84	93	94
40	95	99	99
45	99	100	100
50	100	100	100

Можно сделать вывод, что функционирование дренажа надежное при вероятности неисправностей меньше 30 %. Достаточно надежными можно считать системы, вероятность неисправностей которых меньше 50 %. В тех случаях, когда вероятность неисправностей больше 50 %, надежность дренажа уменьшается, а когда больше 70 % – становится очень низкой. Учитывая, что к настоящему времени среднее время эксплуатации дренажа в Литве составляет около 30 лет, надежность в районах с удовлетворительными и сложными мелиоративными условиями становится все ниже и приближается необходимость реконструкции дренажа.

#### **Литература**

1. Буожис В. The investigations on drainage maintenance economical efficiency. In: Transactions Water Management Engineering. Lithuanian University of Agriculture, Kaunas–Akademija, Lithuanian Institute of Water Management, Vilainiai, 2003, 23(43)-24(44). – S. 132-137 (на лит. яз.).
2. Моркунас В., Шаулис В. The Situation in Land Drainage and the possible ways for it Improvement. Status and Strategic Development Tendencies of the Lithuanian Agriculture. Scientific Papers, vol. 2, 2002. – S. 116-131 (на лит. яз.).
3. Чижаскас Р. Достоверность работы дренажа. Management and Reclamation. 1992. – S. 15-20 (на лит. яз.).
4. Ионайтис Л., Жеромкас Р. Достоверность работы машин. Mokslas. – Vilnius. 1988. – 66 s. (на лит. яз.).
5. Гришин В.К. Статистические методы анализа и планирования экспериментов. – М.: Изд-во Моск. ун-та, 1975. – 127 с.
6. Ильин Ю. А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Строиздат, 1985. – С. 15-16.

7. Гнеденко Б. В., Беляев Ю. К., Соловьев А.Д. Математические методы в теории надежности. – М.: Наука, 1965. – С. 9-118.
8. Барлоу Р., Прошан Ф. Математические методы в теории надежности. - М., 1969. – С. 15-28.
9. Хрисанов Н.И., Камбуров В.А. Условия надежности закрытого дренажа. - М.: Колос, 1978. – С. 4-34.
10. Мирцхулава Ц.Е. Надежность систем осушения. – М.: Агропромиздат, 1985. – С. 42-186.
11. Филипенко В. С., Бохонко В. И. Структурные сдвиги в мелиоративных мероприятиях. // Мелиорация переувлажненных земель. Сб. науч. работ БелНИИ-МиЛ. - Т. XLVIII. - Мн., 2001. – С. 276-279.
12. Буожис В., Бастене Н. The investigations of maintenance efficiency of land reclamation systems. In: Transactions Water Management Engineering. Lithuanian University of Agriculture, Kaunas–Akademija, Lithuanian Institute of Water Management, Vilainiai, 1998, 5(27). – S. 66-79 (на лит. яз.).
13. Кубилюс Й. Probability Theory and Mathematical Statistics. Mokslas. – Vilnius. 1980. – 407 s. (на лит. яз.)
14. Рупшис Р. Basics of Statistics. Kaunas - Akademija. 1998. – S. 83 (на лит. яз.).
15. Севастьянов Б.А. Курс теории вероятностей и математической статистики. – М.: Наука, 1982. – 255 с.