

– создать единую информационную систему обеспечения безопасности на водных объектах и ГТС.

Данные предложения при поддержке соответствующих органов, ученых и эксплуатационников различных водохозяйственных организаций позволят решить вопрос единства функций хозяйственного управления водными объектами и гидротехническими сооружениями на них, что исключительно важно для решения производственных задач.

#### **Список использованных источников**

1. Об утверждении Концепции федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» от 28 июля 2011 года N 1316-р.
2. «Экономика и жизнь», №14 (9124) 2006г.
3. Сидорова С.А. Обоснование необходимости разработки основных положений защиты гидротехнических сооружений мелиоративного комплекса и единых требований по их безопасной эксплуатации. Сборник научных трудов. - М.: Изд. ВНИИГиМ, 2019. - 338 с.
4. Баширова А. А. Формирование стратегии регионального развития с позиций эколого-экономической сбалансированности / А. А. Баширова // Экон. науки. -2010. -№ 72. -с. 87-90.

УДК 502/504:626:627.8

## **ПРОГНОЗ УРОВНЯ БЕЗОПАСНОСТИ ГРУНТОВЫХ ПЛОТИН IV КЛАССА ПРИ ОТСУТСТВИИ РЕМОНТА И ТЕХНИЧЕСКОГО ОБСЛУЖИВАНИЯ**

**В.Л. Снежко, О.С. Симонович**

ФГБОУ ВО «РГАУ – МСХА имени К.А. Тимирязева», г. Москва, Россия

На территории Российской Федерации расположено 24,7 тысяч комплексов гидротехнических сооружений, отнесенных к классу низкой опасности (IV класс), что составляет 95,7% от их общего числа. В Государственном докладе «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году» отмечено, что большинство водоподпорных сооружений представляют собой малые и средние плотины «... многие из которых эксплуатируются без реконструкции и ремонта и являются объектами повышенной опасности...» [1].

По действующим нормативам грунтовая плотина имеет IV класс опасности, если: ее высота не выше 15 м (20 м на скальном основании); водохранилище мелиоративного назначения объемом не более 50 млн. м<sup>3</sup>; максимальный напор ниже 8 метров; чрезвычайная ситуация распространяется в пределах одного хозяйствующего субъекта, а вероятный ущерб не превышает 100 млн. рублей [2]. В состав мелиоративно-водохозяйственного комплекса сегодня входят порядка 230 водохранилищ, их сооружения находятся в ведении Министерства сельского хозяйства. Плотины этих гидроузлов имеют возраст от 30 до 50 лет и более, что является предельным сроком эксплуатации для сооружений IV класса опасности.

На начало 2018 года 13,4% ГТС водохозяйственного комплекса были бесхозяйными. Бесхозяйные гидроузлы, как правило, были расположены на прудах мелиоративного и сельскохозяйственного назначения, эксплуатировались для

местных нужд и относились к классу низкой опасности. Эти комплексы построены ныне обанкротившимися либо ликвидированными сельскохозяйственными организациями. На объектах энергетики, промышленности и водного транспорта в Российской Федерации бесхозных ГТС сегодня не числится.

Одной из задач Федеральной целевой программы «Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» является «... повышение эксплуатационной надежности гидротехнических сооружений (в том числе бесхозных) путем их приведения к безопасному техническому состоянию ...» [3]. К 2020 году доля ГТС с неудовлетворительным и опасным уровнем безопасности не должна превышать 49,5% от общего их числа. Обеспечения безопасности ГТС водохозяйственного назначения IV класса осложняется частым отсутствием на них проектной документации, отсутствием или низким уровнем подготовки эксплуатационного персонала, недостатком запасов строительных материалов и техники для локализации или ликвидации возможных чрезвычайных ситуаций [4].

Для проведения капитального ремонта или ликвидации ГТС (в том числе бесхозных) из Федерального бюджета субъектам Российской Федерации и муниципальным образованиям запланировано выделение субсидий. Распределение субсидий по объектам согласовывается с Федеральным агентством водных ресурсов. Только в 2017 году 66 ГТС было ликвидировано, право собственности оформлено на 170 ГТС.

Для оформления права собственности на бесхозные ГТС согласно статье 225 Гражданского кодекса Российской Федерации необходимо заявление органа местного самоуправления, на территории которого находится бесхозное сооружение. Если сооружение имеет потенциально опасное состояние, администрация муниципального образования формирует пакет документов, необходимый для проведения капитального ремонта сооружения, в который включается гарантийное письмо, подтверждающее, что ГТС после проведения капитального ремонта будет поставлено на баланс организации. Тем не менее, в Государственном Докладе отмечено, что «... В реальности бесхозные ГТС передаются в собственность владельцам, не имеющим необходимой квалификационной подготовки, без соответствующей проектной и технической документации» [1].

В сложившейся ситуации актуальной задачей является прогноз уровня безопасности ГТС с течением времени при отсутствии ремонта и эксплуатационных мероприятий, который может быть использован как администрацией муниципальных образований, так и собственниками сооружений для планирования средств, выделяемых на перспективу на ремонт или поддержание необходимого уровня безопасности сооружений.

По результатам мониторинга территориальных управлений Ростехнадзора по количеству поднадзорных гидротехнических сооружений среди субъектов Российской Федерации первое место занимает Ставропольский край (14% от общего числа ГТС), второе – Воронежская область (7%), третье место принадлежит Московской области (7%). В Московском государственном университете природообустройства, а впоследствии Российском государственном аграрном универ-

ситете имени К.А. Тимирязева с 1997 года проводятся исследования, посвященные проблеме обеспечения безопасности ГТС. Наибольший объем работ был выполнен для малых гидроузлов, расположенных на территории Московской области [5]. Исследования включали два этапа. На первом этапе выполнено экспертное обследование ГТС и сведение данных в единую электронную базу, которая к 2014 году содержала данные о сооружениях 1218 гидроузлов, расположенных на территории всех муниципальных районов Московской области (некоторые из которых впоследствии были включены состав г. Москвы). Характеристики сооружений включали в том числе сведения об их возрасте, техническом состоянии, уровне безопасности и основных повреждениях, наличии службы эксплуатации и собственнике.

Следующим этапом стал поиск методов анализа полученной информации [6]. В рассмотрение были включены только гидроузлы, не имеющие собственника или службы эксплуатации и относящиеся к IV классу. Сформирована выборка, включающая сведения по 1018 грунтовым плотинам, возраст которых не превышал нормативный срок эксплуатации – 50 лет. Объем водохранилищ, создаваемых плотинами, в среднем составлял 0,14 млн. м<sup>3</sup>. Среднее значение максимальной высоты плотины в русловой части составляло 5,8 метров, при этом высоту до 10 метров имели подавляющее большинство плотин (94%). Гидроузлы использовались для сельскохозяйственных и технических нужд, пожаротушения, рекреации. Уровень безопасности плотин распределился следующим образом: 8,7% плотин имели нормальный уровень безопасности, 46,3% – пониженный, 28,7% – неудовлетворительный и 16,3% опасный уровень безопасности. Для возможности дальнейшей кросс-проверки полученных прогнозных зависимостей в расчете были использованы данные по 861 сооружению, остальные 157 (15%) в дальнейшем только сопоставлялись с прогнозными кривыми. Распределение возраста обследованных плотин приведено на рисунке 1.

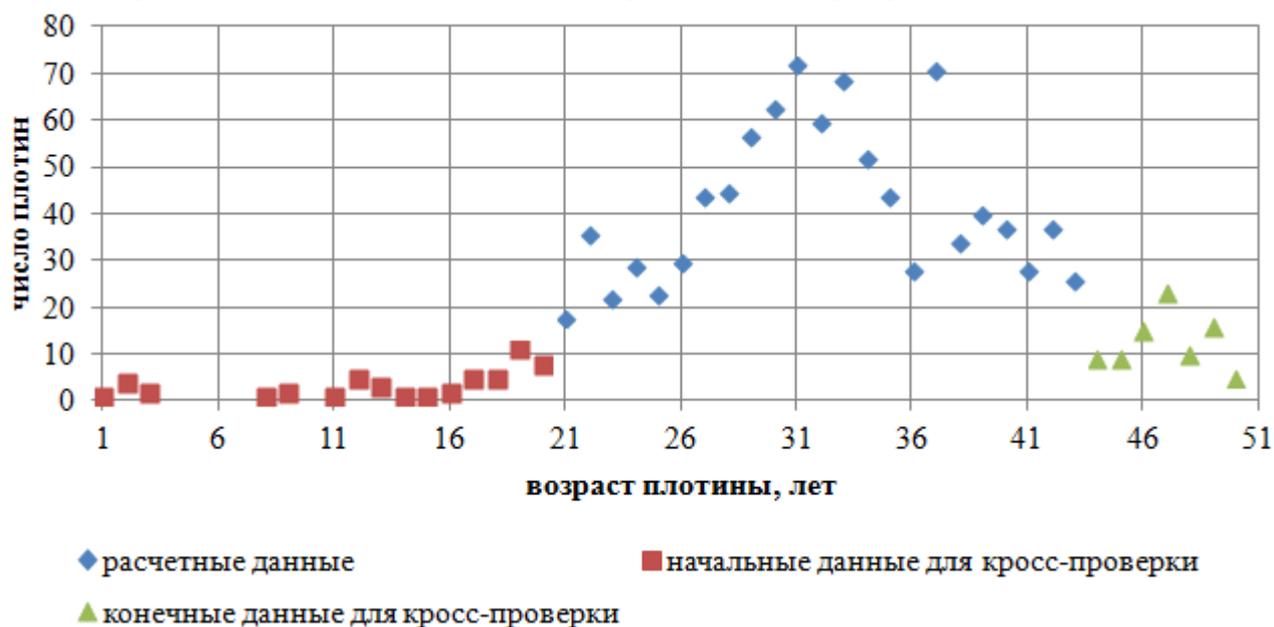


Рисунок 1 - Распределение возраста обследованных плотин

Среди обследованных плотин одного возраста уровень безопасности распределялся различным образом. Например, из 44 плотин в возрасте 27 лет 5 имели опасный уровень безопасности, 14 неудовлетворительный, 16 пониженный и 9 нормальный. Из 40 плотин возраста 39 лет 12 плотин имели опасный уровень, 10 неудовлетворительный, 15 пониженный и только 3 сооружения сохранили нормальный уровень безопасности. Для каждого возраста были вычислены относительные частоты, равные частному от деления числа сооружений, соответствующих каждому из уровней безопасности, к общему числу обследованных сооружений данного возраста. Для приведенных примеров частотные ряды по уровням безопасности имели вид:

<u>Опасный</u>	<u>Неудовлетворительный</u>	<u>Пониженный</u>	<u>Нормальный</u>
0,11	0,32	0,36	0,20
0,30	0,25	0,38	0,08

Вид частотных рядов позволил сделать вывод о том, что с течением времени у сооружений, не имеющих собственника либо службы эксплуатации, уровень безопасности снижается [7]. До определенного возраста преобладают плотины с нормальным и пониженным уровнем безопасности, затем чаще встречаются плотины неудовлетворительного уровня, а на границе нормативного срока службы начинает увеличиваться число плотин, имеющих опасный уровень.

Наблюдаемое явление может быть математически формализовано как случайный процесс, или случайная функция, аргументом которой является время. Эта случайная функция может принимать 4 качественных состояния, соответствующих нормальному, пониженному, неудовлетворительному и опасному уровням безопасности грунтовой плотины. Время принимает дискретные значения – 1 год, в силу двух причин:

- возраст обследованных плотин при отсутствии технической документации с большей точностью определить не представляется возможным;
- в течение года проходит полный цикл изменения нагрузок на сооружение (температурные колебания, динамика уровней воды в бьефах в период межени и половодья и т.д.).

Восстановления сооружения не происходит. В пределах нормативного срока службы уровень безопасности плотины будет снижаться, пока не станет опасным, то есть система не перейдет в конечное (поглощающее) состояние. Этот процесс характеризуется как процесс чистой гибели. Изначально предполагалось, что за 1 переход (за 1 год) плотина может снизить свой уровень безопасности только на 1 порядок, то есть либо сохранить исходный уровень безопасности, либо снизить его до последующего.

С точки зрения теории случайных процессов возможны два варианта реализации смены состояний предлагаемой системы: с постоянной интенсивностью  $\lambda_{ij}$  переходов системы из состояния  $i$  в состояние  $j$  (или задержек в состоянии  $i - \lambda_{ii}$ ) с течением времени, либо с переменной интенсивностью. В обоих случаях это

будет процесс с дискретным временем и дискретными состояниями, который принято описывать цепью Маркова. При постоянных интенсивностях цепь Маркова будет однородной, при переменных (зависящих от времени) интенсивностях перехода цепь Маркова будет неоднородной.

Для определения интенсивностей задержек в состояниях, соответствующих каждому из уровней безопасности, были использованы частотные ряды, способ получения которых был описан выше. Сведение в единое факторное поле частот для конкретного состояния плотины в возрасте от 22 до 43 лет позволило методом наименьших квадратов подобрать экспоненциальную кривую надежности для каждого состояния, имеющую вид:

$$P_{ii}(t) = e^{-\lambda_{ii} \cdot t} \quad (1)$$

где:  $i$  – уровень безопасности,  $\lambda_{ii}$  – интенсивность задержки в состоянии, соответствующем одному уровню безопасности.

Расчеты показали, что вероятности соответствия плотины как нормальному, так и пониженному уровню безопасности описываются экспоненциальной кривой с постоянной интенсивностью  $\lambda$ , не зависящей от времени. Для нормального и пониженного состояний  $\lambda$  имеет значения 0,065 и 0,025 1/год соответственно. К примеру, исследования интенсивностей отказов креплений откосов грунтовой плотины, выполненные в работе [8], также доказали возможности использования для прогноза экспоненциальных кривых.

Вероятность соответствия плотины неудовлетворительному или опасному уровням безопасности может быть описана комбинацией двух экспоненциальных кривых надежности, определяемых внутри каждого из интервалов. Интенсивность для кривых неудовлетворительного и опасного уровня на первом интервале (возраст до 28 лет включительно) равна 0,060 и 0,085 1/год. На интервале от 29 до 50 лет  $\lambda$  принимает значения 0,032 и 0,045 1/год.

Фактические значения частот соответствия плотин каждому из состояний, не включенные в расчет (157 сооружений), были нанесены на полученные кривые надежности и показали хорошее совпадение с экспоненциальными зависимостями. Результаты расчетов позволили определить среднее время соответствия плотины каждому из уровней безопасности. Это время является обратной величиной параметра  $\lambda$ . При отсутствии технического обслуживания и ремонта нормальный уровень безопасности грунтовой плотины сохраняется в среднем 15 лет, неудовлетворительный 16 лет, опасный 11 лет.

В общем случае случайный процесс, проистекающий в системе, может быть описан комбинацией однородных цепей Маркова. Разметка графа состояний включала определение вероятностей задержки в состоянии и переходных вероятностей и сведение их в матрицу переходных вероятностей. Вероятности задержки в состоянии вычислялись по формуле (1) при  $t=1$ . Переходные вероятности для каждого из состояний определялись по зависимости:

$$p_{ij} = e^{\lambda_{ii}} - 1 \quad (2)$$

В результате получены следующие матрицы переходных вероятностей: для плотин в возрасте до 28 лет

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0,937 & 0,069 & 0 & 0 \\ 0 & 0,975 & 0,025 & 0 \\ 0 & 0 & 0,937 & 0,063 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

для плотин в возрасте от 29 до 50 лет

$$P_{ij} = \begin{pmatrix} 0,937 & 0,069 & 0 & 0 \\ 0 & 0,975 & 0,025 & 0 \\ 0 & 0 & 0,967 & 0,031 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (4)$$

Выражения (3) и (4) позволили сделать прогноз вероятности соответствия плотины уровням безопасности на всем нормативном сроке службы. Для прогноза достаточно знать уровень безопасности сооружения, определенный экспертным методом, и возраст сооружения на момент обследования. Если плотина имела нормальный уровень, матрицы переходных вероятностей задействуются полностью. Если плотина имела на момент обследования пониженный уровень безопасности, из матрицы следует вычеркнуть первую строку и первый столбец. Для плотины, имеющей неудовлетворительный уровень, из матрицы вычеркиваются две первых строки и два первых столбца.

Вероятностные кривые для прогноза уровня безопасности грунтовой плотины IV класса, полученные с использованием разработанной методики, приведены на рисунке 2. В расчетах учтена смена переходных вероятностей при достижении сооружением возраста 28 лет. По этим кривым можно оценить вероятности соответствия плотины каждому из уровней безопасности при условии, что в момент последнего обследования она имела пониженный уровень.

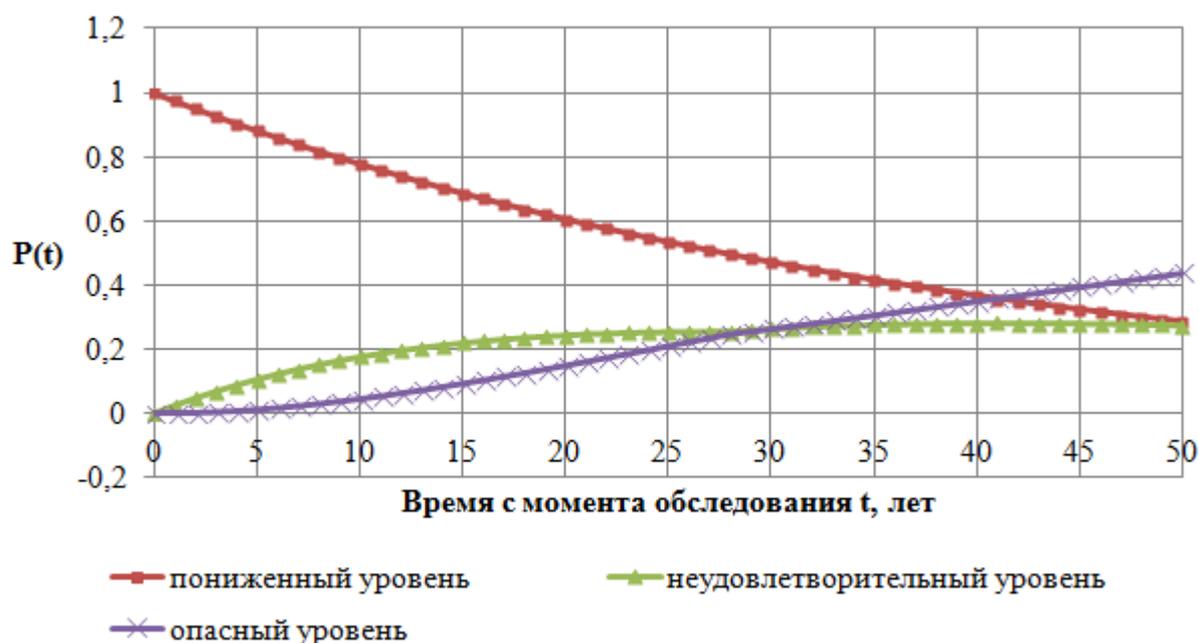


Рисунок 2 - Вероятностный прогноз уровня безопасности грунтовой плотины

Срок прогноза откладывается по оси абсцисс, выбирается та кривая, ордината которой наибольшая. Это и будет наиболее вероятное состояние плотины. Во внимание следует принимать те состояния, вероятность которых превышает 5%. К примеру, в настоящий момент времени собственник не располагает финансовыми средствами для восстановления нормального уровня безопасности или текущего ремонта. Практически невозможно (то есть с вероятностью, меньшей, чем 5%), что в ближайшие 2 года плотина снизит уровень безопасности до неудовлетворительного или опасного. Если же отложить ремонт еще на 13 лет, то снижение уровня безопасности до опасного уже не будет практически невозможным событием (то есть вероятность опасного состояния превысит 5%), а вероятность того, что плотина будет иметь неудовлетворительный уровень, превысит 20%. В этом случае будет необходим уже капитальный ремонт. Кривые достаточно просты в использовании.

#### **Список использованных источников**

1. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2017 году». – М.: НИА-Природа, 2018. – 298 с.

2. Постановление Правительства Российской Федерации от 2 ноября 2013 года № 986 «О классификации гидротехнических сооружений»

3. Постановление Правительства Российской Федерации от 19 апреля 2012 года № 350 «О федеральной целевой программе "Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах» (доступ из системы Гарант).

4. Волосухин В.А., Бондаренко В.Л. Факторы, определяющие безопасности гидротехнических сооружений // Наука и безопасность. 2014. № 3 (12). С. 7 – 8.

5. Волков В.И., Каганов Г.М. Обобщение результатов обследования состояния гидроузлов в Московской области за 2002-2012 гг. // Мелиорация и водное хозяйство. 2012. № 3. С. 5 – 8.

6. Козлов Д.В., Волков В.И., Снежко В.Л. Прогноз уровня безопасности низконапорных и бесхозяйных гидротехнических сооружений // Гидротехническое строительство. 2018. № 11. С. 35 – 41.

7. Волков В.И., Снежко В.Л. Статистические методы определения показателей надежности сооружений низконапорных гидроузлов // Природообустройство. 2017. №5. С. 20 – 26.

8. Михеева О.В., Панкова Т.А. К вопросу об эксплуатационной надежности грунтовых плотин // О.В. Михеева, Т.А. Панкова / Вестник Саратовского государственного аграрного университета им. Н.И. Вавилова. 2012, № 7. С. 56–60.

УДК 631.6, 001.57, 556.541:004.94

## **ОПТИМИЗАЦИЯ РЕЖИМОВ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ СООРУЖЕНИЙ ОРОСИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ**

**А.А. Талызов**

ФГБНУ «ВНИИГиМ им. А. Н. Костякова», г. Москва, Россия

### **Введение**

Недостаточно высокий уровень водоучета и не оптимальность управления водораспределением на оросительных системах (ОС) приводят к повышенным