

**А. М. Кореновский** (ФГНУ «РосНИИПМ»)

## **ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ПЛОТИН МЕМБРАННО-ВАНТОВОЙ КОНСТРУКЦИИ ИЗ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ**

В статье разработаны комплексы мероприятий повышения надежности и безопасности, облегченных мембранно-вантовых плотин. Выявлены причины отказов антропогенного происхождения. Указаны мероприятия, гарантирующие сведение отказов в системе до минимума. Приведены таблицы для оценки технического состояния. В результате натурных и теоретических исследований, получены зависимости, характеризующие вероятность аварии на сооружении.

Ключевые слова: надежность, мембранно-вантовая плотина, отказ, композитный материал, исследования.

**A. M. Korenovsky**

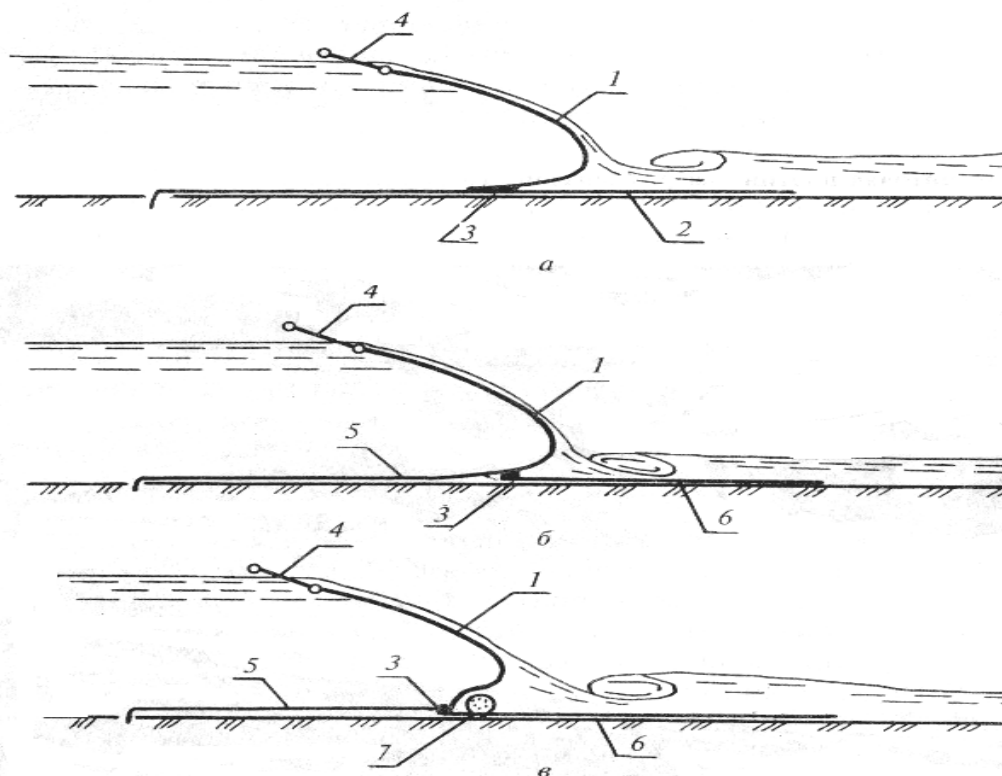
## **RESEARCH OF COMPOSITE MATERIALS MEMBRANE-CABLING STRUCTURE DAMS RELIABILITY**

Increase measure complexes of reliability and security of facilitated membrane-cable dams are developed in the article. The causes of failures of human origin were discovered. Measures to ensure the reduction of system failures to the minimum were specified. Tables of technical condition evaluation were given. As a result of natural and theoretical researches, the dependences characterizing probability of failure on a construction are received.

Key words: reliability, membrane-cable-stayed dam failure, a composite material research.

Будущее развитие науки обуславливает все более возрастающие изменения техники, выступающие в качестве решающего фактора ее прогресса, который связан с созданием сложных элементов конструкций, устройств, сооружений, а так же новых материалов и технологий, в том числе, наноматериалов и нанотехнологий, обеспечивающих надежность и безопасность гидротехнических сооружений мелиоративного назначения из композитного материала.

Работа плотин мембранно-вантовой конструкции основана на гидравлике потока жидкости, с увеличением уровня воды в верхнем бьефе увеличивается высота плотины и наоборот. На рисунке 1 представлена схема конструкций плотин мембранно-вантового типа.



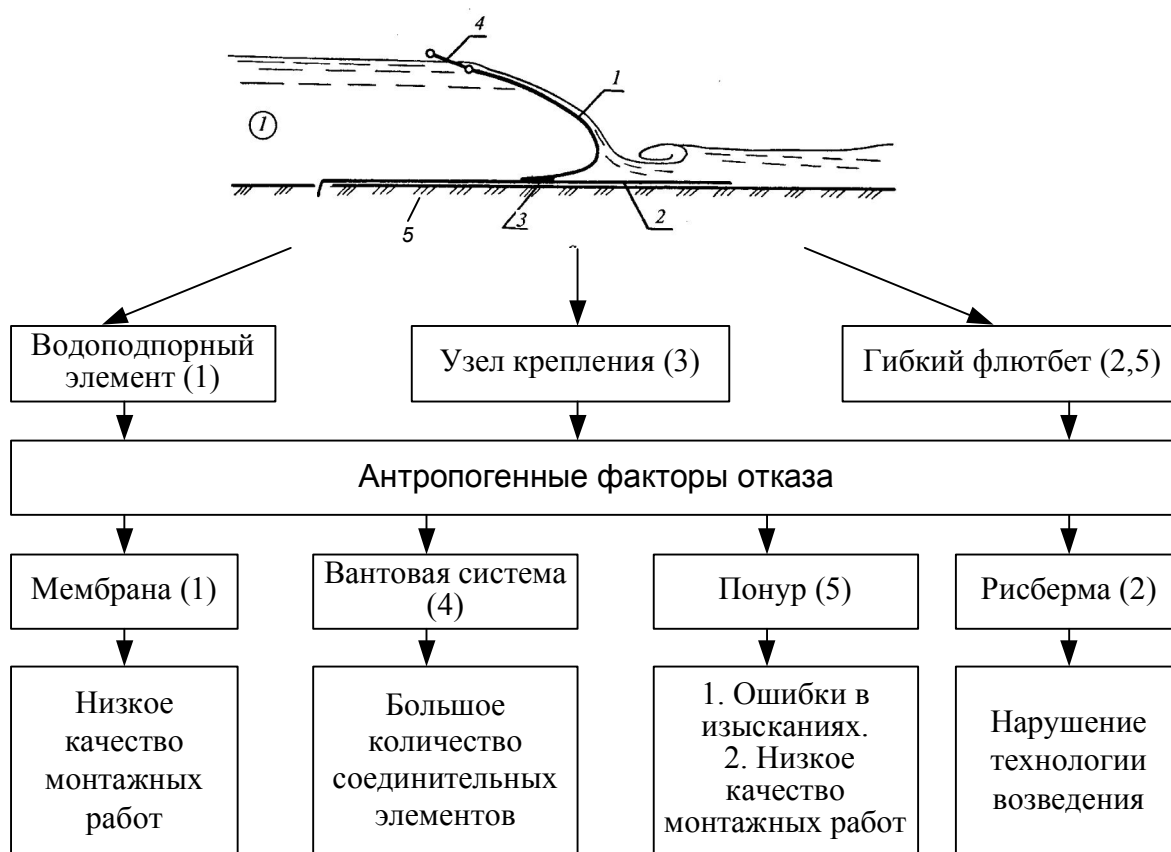
1 – мембрана; 2 – гибкий флютбет; 3 – узел крепления мембраны; 4 – вантовая ферма;  
5 – гибкий понур; 6 – гибкая рисберма; 7 – грунтонаполняемый баллон

**Рисунок 1 – Схема конструкций плотин мембранно-вантовой конструкции типа ПММ-Д**

В работе [1] отмечено, что повышение безопасности гидротехнических сооружений, которые являются сложной системой, требует знания влияния отдельных факторов, обеспечивающих общую надежность их работы. На основании анализа работ [2, 3, 4], в данной статье проведены исследования и разработаны комплексы мероприятий по повышению надежности и безопасности работы плотины мембранно-вантовой конструкции. На основании анализа надежности работы плотины мембранно-вантовой конструкции, ее (плотину) разбивают на основные элементы, под которыми понимаются элементы системы, характеризующиеся начальными, переходными и конечными параметрами состояния, подразделяющимися на три вида: влияющие на работоспособность лишь самого элемента, но не сооружения в целом; всей плотины в целом; других его элементов; в то же время может иметь элементы, техническое состояние которых

практически не влияет на общую работоспособность работы плотины мембранно-вантовой конструкции, а некоторые из них, могут иметь отказы, приводящие к его разрушению. При анализе надежности необходимо учитывать работоспособность этих элементов. Очевидно, что для получения объективных оценок надежности необходимо провести связь между их безаварийной работой и вероятностными характеристиками возмущающих параметров, которым свойственны случайные погрешности [3, 5].

На основании принципов надежности и безопасности работы плотин мембранно-вантовой конструкции изложенных в работах [4, 5, 6], предложена схема разбиения этой конструкции на основные элементы с указанием причин отказов и мероприятий по их устранению (рисунок 2).



**Рисунок 2 – Дерево надежности плотин мембранно-вантовой конструкции**

Для перехода от сезонной к постоянной эксплуатации данного класса сооружений необходимо, помимо мероприятий по повышению надежно-

сти, предусмотреть также мероприятия по мониторингу, для решения следующих задач, поставленных и частично рассмотренных в [1], а именно:

1. Напряженно-деформированное состояние элементов и узлов системы под действием статической и динамической нагрузки.
2. Вибрация, связанная с увеличением кинетической энергии потока.
3. Изучение процессов, происходящих в основании сооружения.

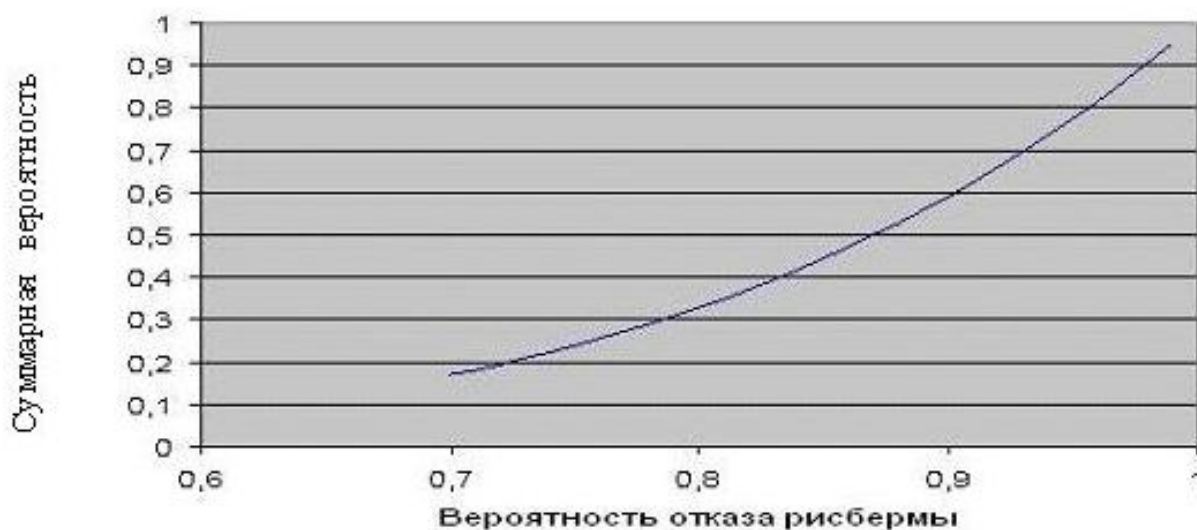
Одновременно с этими задачами необходимо также решить задачу оптимизации, связанную с подбором оптимальных параметров ее конструкции и материала для всех элементов сооружения, что обеспечит безотказную работу сооружения в течение продолжительного времени.

Для решения поставленных задач в гидротехнической лаборатории ФГОУ ВПО «Новочеркасская государственная мелиоративная академия» были проведены исследования, показывающие изменения работы плотины мембранно-вантовой конструкции из композитного материала, вызванные различными повреждениями, которые разделяются на две группы, в зависимости от воздействий силовых нагрузок и внешней среды, которые снижают прочность и долговечность. Обработка данных велась методами математической статистики, на ЭВМ, в программе Excel.

Ниже приведен рисунок 3, на котором представлен график отношения вероятности отказа рисбермы от суммарной вероятности отказа всего сооружения, при разбиении конструкции на 5 элементов с равной вероятностью отказа т.е. соблюдается условие  $P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_5$ , где  $P_1$  – вероятность отказа понура;  $P_2$  – вероятность отказа рисбермы;  $P_3$  – вероятность отказа мембраны;  $P_4$  – вероятность отказа узла крепления мембраны к понуру;  $P_5$  – вероятность отказа вантовой системы.

На рисунке 3 кривые практически полностью накладываются, друг на друга что объясняется высокой достоверностью аппроксимации. Ось Y

представляет собой вероятность выхода из строя всего сооружения  $P_{\text{сумм}}$ , а ось  $X$  частную вероятность отказа рисбермы.



**Рисунок 3 – График отношения вероятности отказа рисбермы от суммарной вероятности отказа всего сооружения**

Итак, эмпирическая зависимость отказа всего сооружения от отказа рисбермы, подчиненная экспоненциальному закону распределения, с аппроксимирующим значением  $R^2 = 0,89$ , будет иметь вид:

$$P_{\text{сумм}} = 0,0027e^{5,9549 X}, \quad (1)$$

или в формализованном виде:

$$P_{\text{сумм}} = Ae^{BX}, \quad (2)$$

где  $A, B$  – эмпирические коэффициенты равные:  $A = 0,0027$ ;  $B = 5,9549$ .

Базируясь на «Рекомендациях ...» [7], получим формулу для оценки общей поврежденности мембранно-вантовой плотины из композитного материала:

$$\varepsilon = \frac{\alpha_1 \varepsilon_1 + \alpha_2 \varepsilon_2 + \alpha_3 \varepsilon_3 + \dots \alpha_i \varepsilon_i}{\alpha_1 + \alpha_2 + \dots \alpha_i}, \quad (3)$$

где  $\varepsilon_1, \varepsilon_2 \dots \varepsilon_i$  – максимальная величина повреждения отдельных элементов конструкции;

$\alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_i$  – коэффициенты значимости отдельных элементов конструкции по таблице 1.

**Таблица 1 – Значения коэффициента значимости  $\alpha$  для элементов плотины мембранно-вантовой конструкции**

Наименование элемента плотины	Величины коэффициента $\alpha$ элементов
Понур	3
Мембрана	6
Узел крепления мембраны к понуру	4
Вантовая система	7
Рисберма	5

При оценке величин повреждения учитывают их максимальную величину, так как авария обычно происходит из-за наличия критического дефекта в отдельном элементе конструкции.

Коэффициенты значимости элементов в формуле (3) устанавливаются на основании экспертных оценок и накопленного инженерного опыта, учитывающих социально экономические последствия разрушения сооружения, характера разрушения. По данным наблюдений, за работой конструкции в лабораторных условиях можно принять следующие коэффициенты значимости,  $\alpha$  приведенные в таблице 1.

Относительная оценка поврежденности мембранно-вантовой плотины производится по формулам и методике (1-8), приведенных в [7]:

$$y = 1 - \varepsilon, \quad (4)$$

где  $\varepsilon$  – величина повреждения плотины мембранно-вантовой конструкции через  $t$  лет ее эксплуатации.

Величину повреждения мембранно-вантовой конструкции через  $t$  лет ее определяем по формуле:

$$\varepsilon = 1 - e^{-\lambda t}, \quad (5)$$

где  $\lambda = \frac{-\ln y}{t\varphi}$  – постоянная износа, определяемая по данным обследования;

$y$  – относительная надежность, определяемая по категории технического состояния (таблица 2);

$t\varphi$  – срок эксплуатации в годах на момент обследования.

**Таблица 2 – Сводная таблица по определению технического состояния**

Категория технического состояния	Описание технического состояния	Относительная надежность $y = \frac{\gamma}{\gamma_0}$	Поврежденность $y = 1 - \varepsilon$	Стоимость ремонта $C$ , %
1	Нормальное исправное состояние. Отсутствуют видимые повреждения. Выполняются все требования действующих норм и проектной документации. Необходимости в ремонтных работах нет	1	0	0
2	Удовлетворительное работоспособное состояние. Обеспечиваются нормальные условия эксплуатации. Требуется мелкий ремонт	0,95	0,05	0-11
3	Не совсем удовлетворительное, ограниченно работоспособное состояние. Для продолжения нормальной эксплуатации требуется ремонт поврежденных конструкций	0,85	0,15	12-36
4	Неудовлетворительное (неработоспособное) состояние. Существующие повреждения свидетельствуют о непригодности к эксплуатации. Требуется капитальный ремонт	0,75	0,25	37-90
5	Аварийное состояние. Требуется немедленный демонтаж плотины. Ремонт в основном проводится с заменой аварийных узлов	0,65	0,35	90-100

Срок эксплуатации мембранно-вантовой плотины до капитального ремонта определяется по формуле:

$$t = \frac{0,16}{\lambda}, \quad (6)$$

где  $\lambda$  – постоянная износа.

Срок эксплуатации до аварийного состояния:

$$t_0 = \frac{0,22}{\lambda}. \quad (7)$$

Относительная надежность конструкции при эксплуатации:

$$y = \frac{\gamma}{\gamma_0}, \quad (8)$$

где  $\gamma$  – фактический коэффициент надежности мембранно-вантовой плотины с учетом имеющихся повреждений;

$\gamma_0$  – общий коэффициент надежности (или запаса).

Общий коэффициент надежности определяется по формуле:

$$\gamma_0 = \gamma_m \gamma_c \gamma_f \gamma_n, \quad (9)$$

где  $\gamma_m$  – коэффициент надежности по материалу;

$\gamma_c$  – коэффициент условий работы;

$\gamma_f$  – коэффициент надежности по нагрузке;

$\gamma_n$  – коэффициент надежности по назначению.

Несомненно, общий коэффициент надежности, вычисленный по формуле (9), будет являться определяющим на протяжении всего последующего расчета.

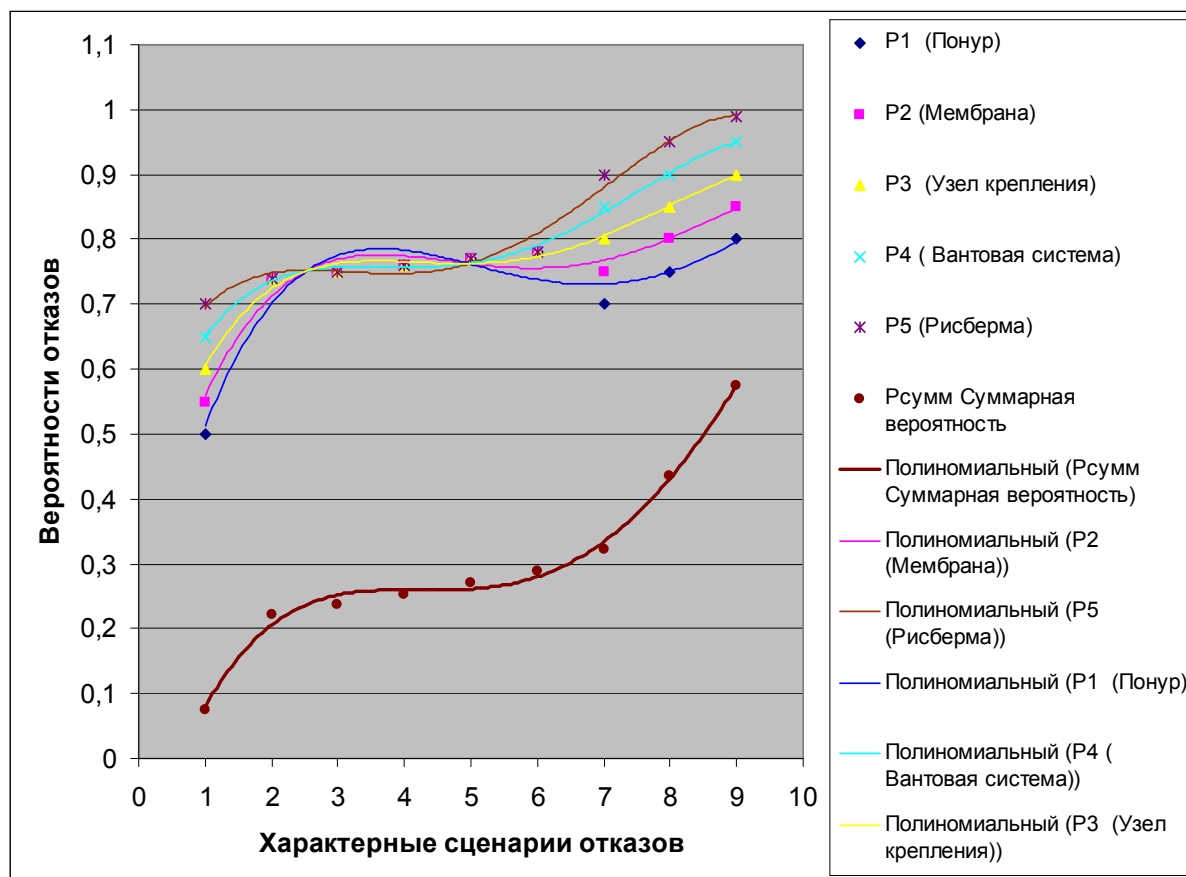
Алгоритм расчета надежности мембранно-вантовой плотины из композитного материала представлен в работах [8, 9].

Значения  $y$  и  $\varepsilon$ , а так же приближенная стоимость  $C$  ремонта на момент обследования сооружения в процентах по отношению к перво-



начальной стоимости для различных категорий технического состояния приведены в таблице 2.

На рисунке 4 представлен график распределения вероятностей отказов для каждого элемента плотины мембранно-вантовой конструкции и суммарная вероятность отказа всей плотины. Обработка данных, велась методами математической статистики, на ЭВМ в программе Excel.



**Рисунок 4 – График распределения вероятностей отказов для каждого элемента плотины мембранно-вантовой конструкции и суммарная вероятность отказа всей плотины**

Точками на графике обозначены вероятности отказов для характерных сценариев аварий, а кривые являются линиями аппроксимации, которые после компьютерной обработки описываются формулы (10-15).

Формула вероятности отказа вантовой системы с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9951$ :

$$Y = -0,0006x^4 + 0,0125x^3 - 0,0929x^2 + 0,0284x + 0,4178. \quad (10)$$

Формула вероятности отказа рисбермы с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9817$  :

$$Y = -0,0007x^4 + 0,0136x^3 - 0,089x^2 + 0,024x + 0,5394. \quad (11)$$

Формула вероятности отказа понура с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9113$  :

$$Y = -0,0004x^4 + 0,0116x^3 - 0,1163x^2 + 0,4617x + 0,1561. \quad (12)$$

Формула вероятности отказа узла крепления с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9887$  :

$$Y = -0,0005x^4 + 0,0122x^3 - 0,1007x^2 + 0,3433x + 0,3506. \quad (13)$$

Формула вероятности отказа мембраны с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9553$  :

$$Y = -0,0004x^4 + 0,0119x^3 - 0,1085x^2 + 0,4025x + 0,2533. \quad (14)$$

Формула суммарной вероятности отказа мембранно-вантовой плотины с достоверностью аппроксимации  $R^2 = 0,9943$  :

$$Y = -0,0003x^4 + 0,0099x^3 - 0,0905x^2 + 0,3328x + 0,1719. \quad (15)$$

Итак, подчиняясь полиномиальному закону распределения, общая формула для вычисления вероятности будет иметь вид:

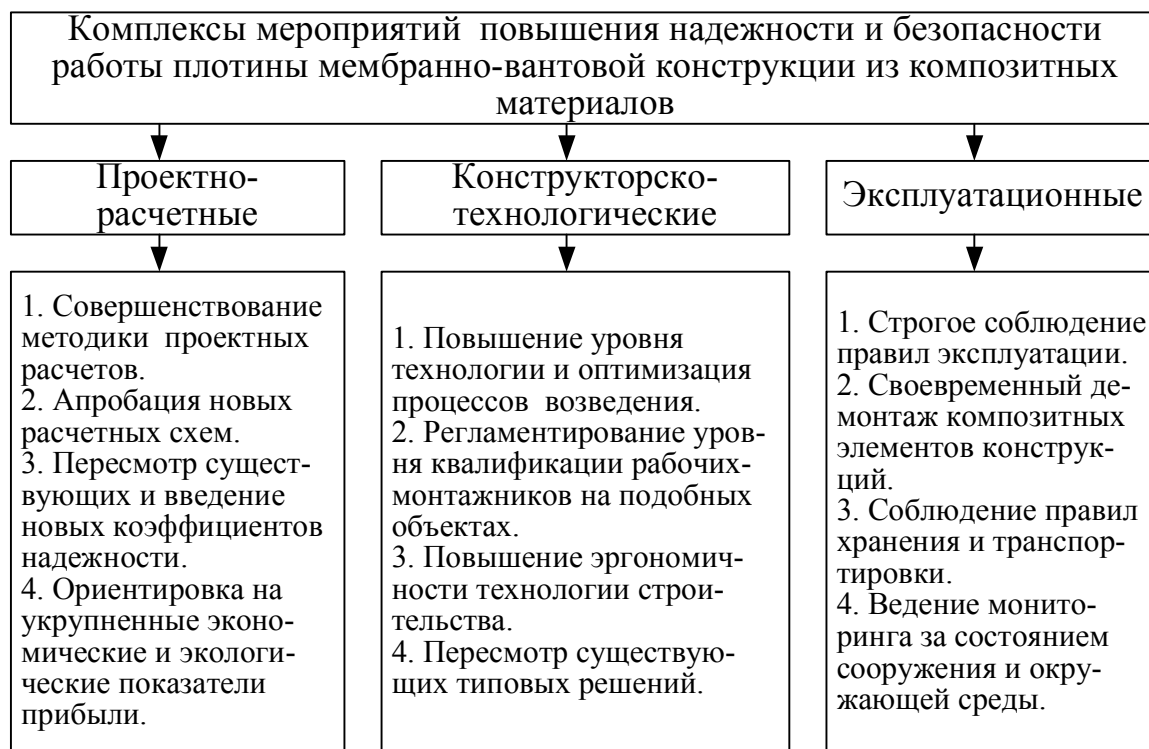
$$P = -Ax^4 + Bx^3 + Cx^2 + Dx + K, \quad (16)$$

где  $A, B, C, D, K$  – эмпирические коэффициенты, имеющие значения:

$$A = -0,0003 \div -0,0007; B = 0,0099 \div 0,0136; C = 0,024 \div 0,4617;$$

$$D = 0,089 \div 0,1163; K = 0,15 \div 0,54.$$

Мероприятия по повышению безопасности и надежности работы плотины мембранно-вантовой конструкции, представленные на рисунке 5.



**Рисунок 5 – Научно обоснованные комплексы мероприятий по повышению надежности и безопасности работы плотины мембранно-вантовой конструкции из композитного материала**

**Выводы.** В статье представлены зависимости распределения вероятностей отказов для каждого элемента плотины мембранно-вантовой конструкции (10-15), характеризующие надежность работы каждого элемента плотины мембранно-вантовой конструкции, и формула (16) характеризующая вероятность отказа всего сооружения. Получены эмпирические коэффициенты характеризующие надежность и безопасность работы мембранно-вантовой плотины из композитного материала. На основании проведенных исследований разработаны научно-обоснованные мероприятия по повышению безопасности и надежности работы плотины мембранно-вантовой конструкции, представленные на рисунке 5. Данные исследования, в конечном счете, будут способствовать увеличению срока службы и эксплуатации, надежности и безопасности плотин данной конструкции. В ходе исследований выявлена низкая надежность рисбермы сооружения, которая влияет на целостность всего сооружения, а также требует в даль-

нейшем разработки технических решений по ее усилению и устройству искусственной шероховатости в нижнем бьефе для гашения избыточной энергии потока.

### **Список использованных источников**

1 Кашарина, Т. П. Мягкие сооружения на малых реках и каналах / Т. П. Кашарина. – М.: Мелиорация и водное хозяйство, 1997. – 56 с.

2 Кашарина, Т. П. Обеспечение надежности и безопасности надежности работы водохозяйственных объектов. Экология и безопасность жизнедеятельности: сборник материалов VI Международной научно-практической конференции. – Пенза: РИО ПГСХА, 2004.

3 Мирцхулава, Ц. Е. Надежность гидромелиоративных сооружений / Ц. Е. Мирцхулава. – М.: «Колос», 1974. – 279 с.

4 Кореновский, А. М. Анализ надежности сопряжения защитного ГТС из композитного материала с основанием сооружения / А. М. Кореновский // Проблемы мелиорации и водного хозяйства: материалы науч.-практ. конф. студ. и молодых ученых / НГМА. – Новочеркасск, 2006. – Вып. 5. – 232 с.

5 Кашарина, Т. П. Надежность и безопасность функционирования облегченных гидротехнических сооружений / Т. П. Кашарина, Д. В. Кашарин, А. М. Кореновский // Информационные технологии в обследовании зданий и сооружений: материалы VI Международной научно-практической конференции, г. Новочеркасск, 9 июня 2006 г. / ЮРГТУ (НПИ). – Ч. 1. – Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2006. – 75 с.

6 Кашарина, Т. П. Обоснования эксплуатационной надежности облегченных гидротехнических сооружений / Т. П. Кашарина, Д. В. Кашарин, А. М. Кореновский // Научные технологии в мелиорации (Костяковские чтения). Международная конференция 30 марта 2005 г.: материалы конференции. – М.: Изд. ВНИИА, 2005. – 552 с.

7 ЦНИИП: Рекомендации по оценке надежности строительных конструкций, зданий и сооружений по внешним признакам. – М., 2001. – 34 с.

8 Кашарина, Т. П. Пути повышения надежности работы плотин мембранно-вантовой конструкции из композитных материалов / Т. П. Кашарина, Д. В. Кашарин, А. М. Кореновский // Гидротехническое строительство. – 2009. – № 6. – С. 30-36 .

9 Кашарина, Т. П. Исследование надежности работы мембранно-вантовых конструкций из композитных материалов / Т. П. Кашарина, С. И. Шиян, А. М. Кореновский // Вестник ВолгГАСУ / Серия: Строительство и архитектура 13(32)/2008 / ВолгГАСУ, 2008. – С. 180-187.