

**ЦЕЛЕВЫЕ ОБСЛЕДОВАНИЯ
КАК ФАКТОР ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ
СУДОХОДНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ**

Г.В. Мельник, Г.Е. Шестов, И.В. Власова (ОАО «Гипроречтранс»)
(Конференция «Обеспечение безопасности и надежности судоходных гидротехнических сооружений» г. Новосибирск, 3 – 7 сентября 2012 г.)

Бесконечные заклинания на тему безопасности «всего и вся» стали «общим местом» и давно не имеют никакого отношения к действительно существующей проблеме. При этом забывается, что безопасность является лишь интегральным свойством объектов, находящихся в определенном состоянии, то есть отражением этого состояния. Установив состояние объекта, а также степень влияния его на окружающую среду можно будет однозначно судить и о его безопасности. При этом здесь правильнее было бы говорить об эксплуатационном состоянии объекта, которое в свою очередь есть совокупность технического состояния и условий эксплуатации.

Контроль за техническим состоянием сооружением всегда был одной из основных составляющих деятельности эксплуатационного персонала. Необходимо отметить, что имевшаяся в отрасли система надзора была в хорошем смысле традиционна, достаточно детально разработана, организационно оформлена и, главное, имела утвержденную нормативную базу.

Однако к настоящему времени накопился целый комплекс проблем. Практически система надзора в настоящее время полуразрушена и не отвечает современным требованиям а, следовательно, не может обеспечить должной безопасности судоходных гидротехнических сооружений.

В этой ситуации привлечение отраслевых и других специализированных организаций для решения проблемы обеспечения

безопасности гидротехнических сооружений, в части диагностики их технического состояния, является чрезвычайно актуальным, хотя конечно и не отменяет необходимость восстановления в полном объеме системы надзора за техническим состоянием сооружений силами эксплуатационного персонала.

Опыт института «Гипроречтранс» подтверждает, что **наиболее эффективным является привлечение специализированных организаций для так называемых «целевых обследований», то есть решения или изучения конкретных проблем конкретных сооружений.**

Проведение же так называемых «комплексных обследований», то есть попытка сходу решить все проблемы гидроузла, состоящего, как правило, из нескольких сооружений, в значительной мере является нереальной и в лучшем случае ее результаты зачастую оказываются поверхностными.

К сожалению надо отметить, что уровень обследований сооружений, оставляет желать лучшего. Это связано как с финансированием «целевых» обследований сооружений, так и с качеством их проведения. **За обследование сооружений берутся все, вне зависимости от наличия необходимых квалифицированных кадров, компенсируя это закупкой оборудования, почти в точности повторяя ситуацию басни «Мартышка и очки». Но это в лучшем случае. В худшем – проводится просто имитация обследований, когда за «рыбу» берется ранее сделанный кем-то материал, относящийся к другому сооружению, и на его базе создается нужный отчет.**

Проводимое же так называемое преддекларационное обследование сооружений на самом деле никаким обследованием не является. Это мероприятие, которое используется для составления акта преддекларационного обследования, что требует ФЗ 117.

И это при том, что в отрасли накоплен колоссальный опыт выполнения подобных работ. Покажем это на примере Гипроречтранс. Представляется, что эта информация будет представлять определенный интерес.

Мы неоднократно заявляли о несовместимости вероятностных расчетов с решением задач оценки безопасности гидротехнических сооружений. Но при этом эти ограничения естественно не являются препятствием для применения статистических методов обработки результатов наблюдений и исследований. Приведем только два красноречивых примера.

Одним из таких примеров может служить работа Гипроречтранс по исследованию коррозионных процессов стен камер Пермского шлюза, выполненных из металлического шпунта (рис. 1.)

Судоходные сооружения Камского гидроузла представляют собой двухниточный 6-и камерный шлюз с головной системой питания. Камеры состоят из 24-х вертикальных стен, выполненных из металлического шпунта. Высота стен камер 11 ÷ 13 м. Анкерные тяги выполнены из сортового проката. Наружные стены камер – одноанкерные, внутренние – двуханкерные.

Профили шпунта, примененные в стенах камер, представлены в таблице.

№№ камеры	Профили шпунта			
	№№ стен			
	1	2	3	4
I	Л-V	Л-III _H	Л-III _H	Л-V
II	Л-V	Л-III _H	Л-III _H	Л-V
III	Л-V	Л-III _H	Л-III _H	Л-V
IV	ZP-38	Л-III _H	Л-III _H	ZP-38
V	Л-V	Л-III _H	Л-III _H	Л-V
VI	Л-V	Л-IV _H	Л-IV _H	Л-V

*Общий вид осушенных
камер Пермского шлюза
(западная нитка)*

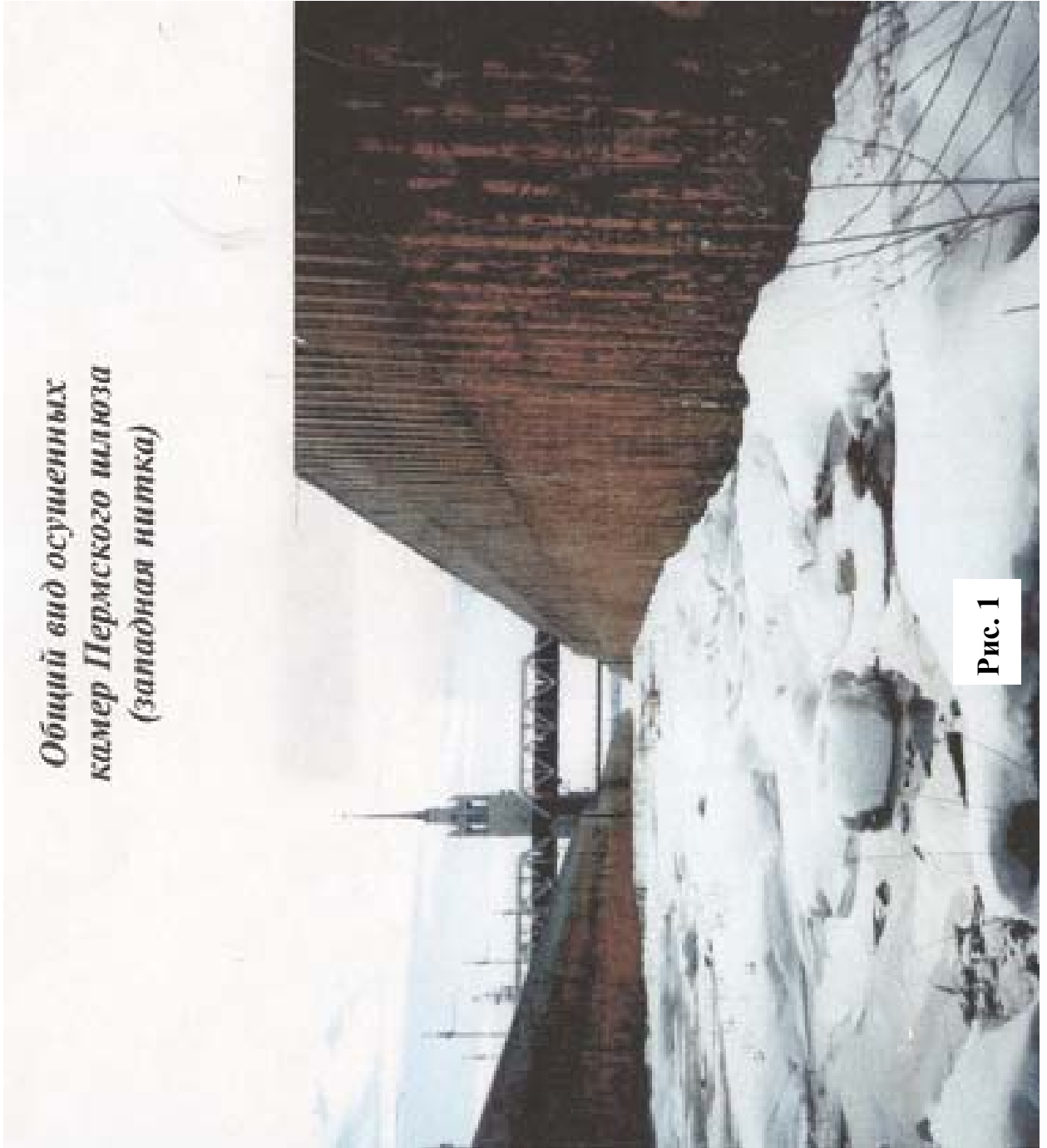


Рис. 1

50-летний опыт эксплуатации позволяет утверждать, что основными проблемами, негативно влияющими на безопасность работы шпунтовых стен, являются два основных фактора:

- коррозионный износ шпунта стен камер по причине высокой агрессивности водной среды;
- обрывы анкерных тяг, вызванных дефектами производства работ при строительстве.

Остановимся на исследовании коррозионного износа шпунта, который носит ярко выраженный язвенный характер.

Методика исследования язвенного коррозионного износа шпунта и основные способы ее реализации изложены в отчете ГПИ «Гипроречтранс» (арх. 65699), выпущенного по результатам работ, проводившихся на Пермском шлюзе в 80-е годы. В отчете был представлен обзор и анализ методов исследования коррозионного износа, а также подход к исследованию влияния коррозии, в том числе и язвенной на несущую способность стен камер шлюзов с позиций теории надежности.

В то время Заказчиком была поставлена задача, исследовать величину коррозионного износа в подводной части шпунта, а также в зоне переменного уровня (выше этого уровня коррозия практически отсутствовала). Прежде всего интересовал ответ на вопрос, какова фактическая величина коррозионного износа и опасна ли она для конструкций? То есть возможен ли отказ шпунта?

Отказом отдельной шпунтовой сваи считалось достижение в любом ее сечении напряжений, превышающих предельные значения. Возможность превышения этих значений определялась уменьшением момента инерции шпунта по причине коррозионного поражения металла. Причем совершенно естественно, что вследствие характера коррозионного поражения шпунта момент инерции при переходе от сечения к сечению меняется случайным

образом, то есть является случайной функцией по аргументу, которым является длина шпунта.

Лицевая поверхность шпунтовой сваи, пораженной коррозией, рассматривалась как один из специальных видов случайной функции – случайное поле, на характер которого, с учетом результатов визуального обследования накладывался ряд ограничений. В частности учет однородного характера поражения поверхности шпунта позволил использовать гипотезу об однородности и изотропности этого поля.

Было показано, что для изучения поверхности шпунта достаточно иметь информацию об одномерных сечениях этих поверхностей – сечениях поля. Такими сечениями поля могут быть профили поверхности шпунта – профилограммы (рис. 2, 3), которые рассматриваются как стационарные эргодические случайные функции. При этом все характеристики для оценки надежности отдельной шпунтовой сваи получались посредством обработки профилограмм.

В этой же работе была сформулирована общая задача оценки надежности отдельной шпунтовой сваи, пораженной коррозией язвенного типа. Функция надежности вычислялась как вероятность случайного события, состоящего в том, что на интервале $0 \div t$ не произойдет ни одного выброса за пределы области допустимых состояний в пространстве качества.

То есть вычислялась вероятность того, что ни в одном сечении шпунтовой сваи по всей высоте ее подводной части не возникают напряжения, превышающие предельные.

$$P(t) = P \left[\frac{|M(\phi)|}{J(\phi)} y < y_{\text{пред.}} ; 0 \leq \phi \leq t \right] \quad (1)$$

Профиль шпунтины № 71 стены I - 1 (0,15 м от дна)

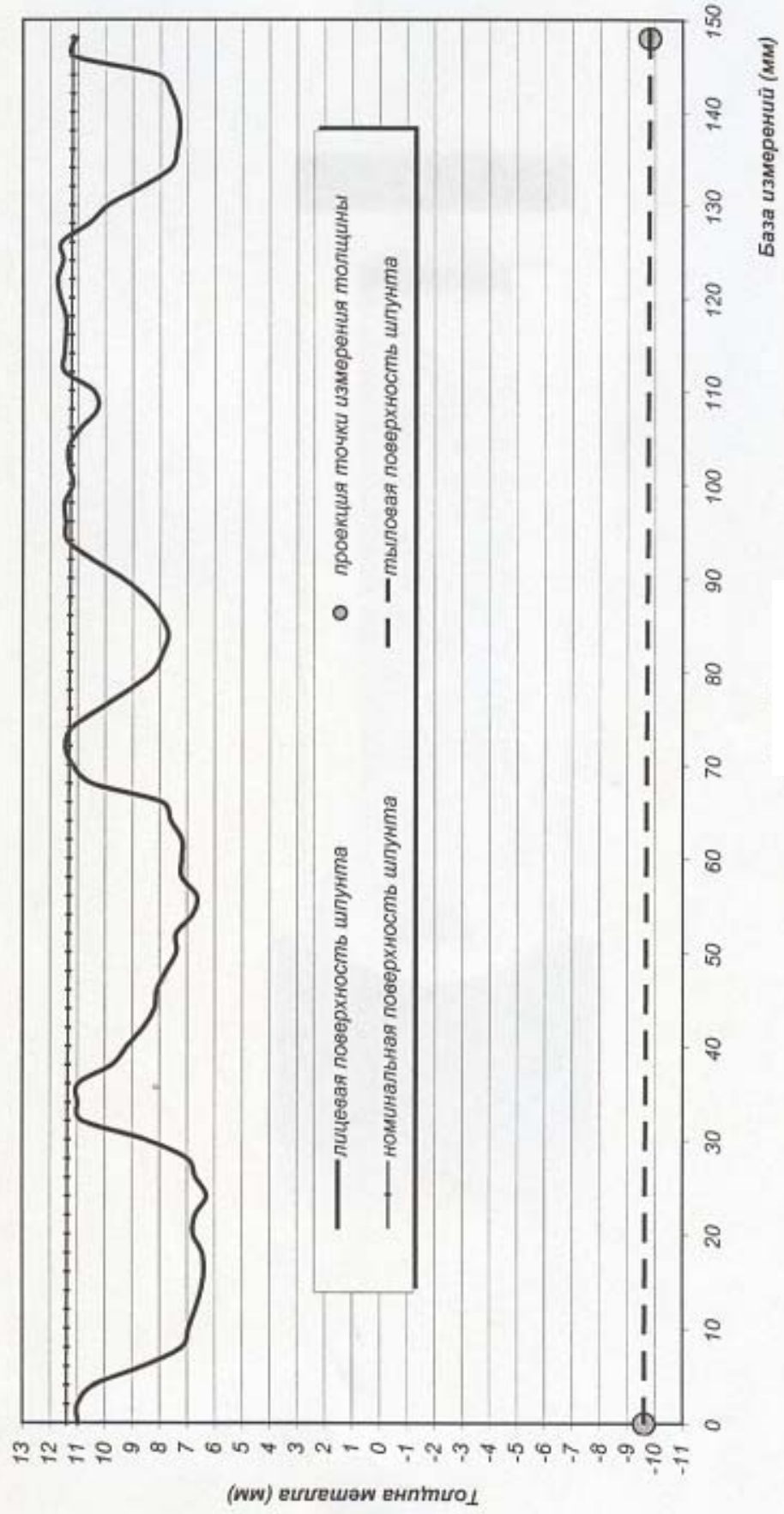


Рис. 2

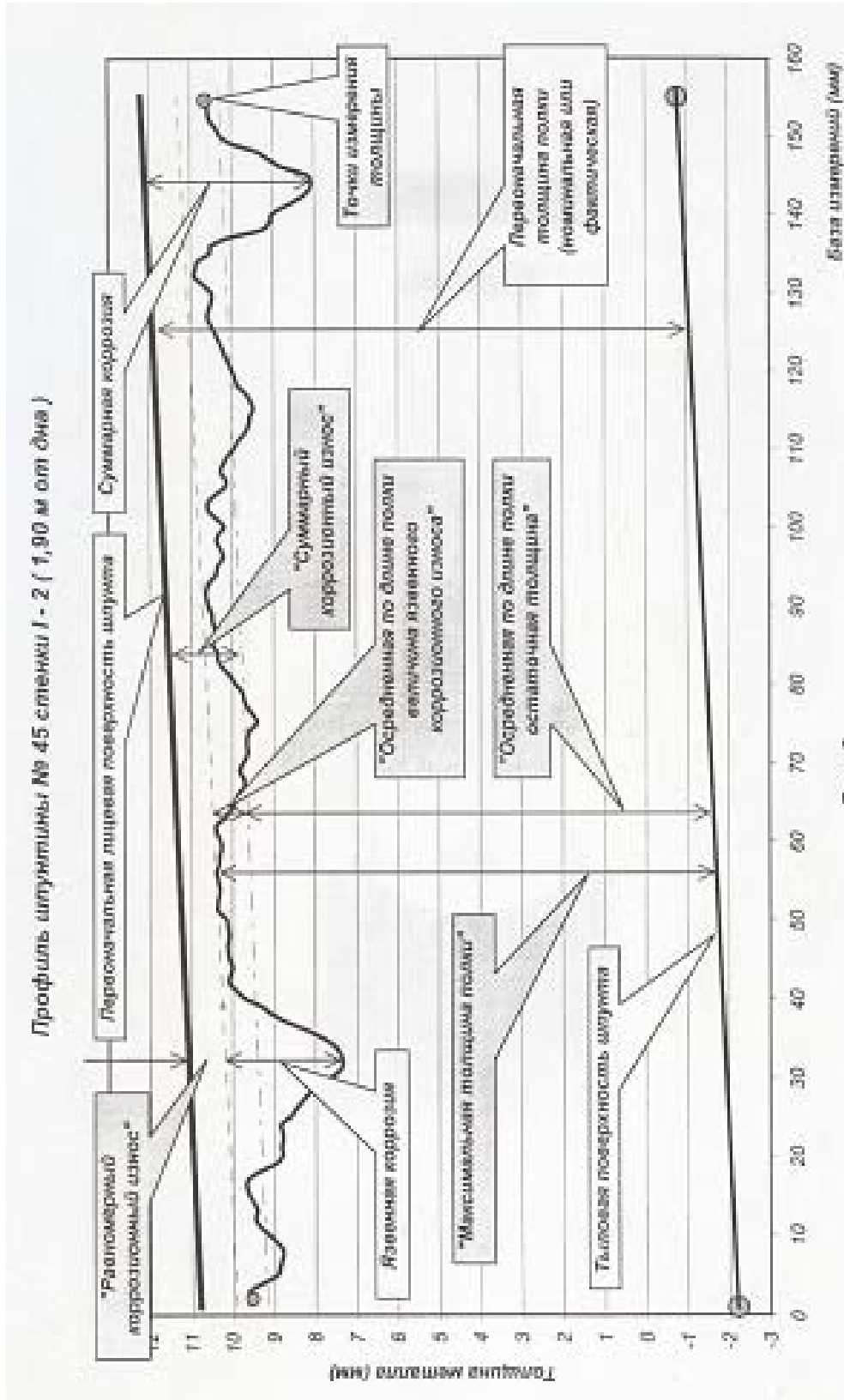


Рис. 3

Решение этой задачи в общем случае представляет серьезные трудности. Однако для систем, у которых выброс за пределы допустимой области является редким событием, возможны упрощения.

Вероятность выброса за пределы области допустимых состояния можно с достаточной точностью оценить через математическое ожидание числа выбросов на отрезке [0; t].

$$P(t) \approx 1 - \int_0^t \lambda_+(v_*; \tau) d\tau \quad (2)$$

где $\int_0^t \lambda_+(v_*; \tau) d\tau$ – математическое ожидание числа выбросов непрерывного дифференцируемого случайного процесса на отрезке [0; t] за уровень V_*

$\lambda_+(v_*; \tau)$ – математическое ожидание числа положительных пересечений уровня V_* случайным процессом за единицу параметра t .

Для упрощения задачи формула (1) преобразовывалась таким образом, что бы процесс и уровень подчинялись нормальному закону распределения

$$P(t) = P \left[\underset{\text{пред.}}{y} \quad J(\phi) > M(\phi) y; 0 \leq \phi \leq t \right] \quad (3)$$

При этом для решения задачи удобнее было левую часть считать уровнем, а правую – процессом.

Причем процесс (левая часть) является нормальной стационарной случайной функцией, а уровень (правая часть) – нормальной нестационарной случайной функцией.

В дальнейшем мы воспользовались формулой для выбросов нестационарного гаусовского процесса за нестационарный гаусовский уровень.

Для упрощения изложения мы не приводим здесь саму формулу; тем, кто интересуется деталями расчетов можно порекомендовать ознакомиться с литературой, указанной в конце публикации.

Отметим, что, поскольку у нас процесс стационарный, то эту формулу удалось упростить.

Здесь мы опять опустим весьма громоздкие математические выкладки.

Отметим только, что для решения нашей задачи, а именно вычисления вероятности того, что ни в одном сечении шпунтовой сваи по всей высоте ее подводной части не возникают напряжения, превышающие предельные, необходимо было вычислить несколько характеристик:

– характеристики распределения допускаемых напряжений

$$\left\langle y_{\text{пред.}} \right\rangle; D[y_{\text{пред.}}]$$

– характеристики распределения момента инерции

$$\left\langle J(\phi) \right\rangle; D [J(\phi)] ; K_{J(\phi)}(t, t')$$

Вычисление последних характеристик проводилось по результатам автоматической обработки снятых на объекте профилограмм. Причем наиболее трудной и интересной задачей было вычисление корреляционной функции величины момента инерции сечения $K_{J(\phi)}(t, t')$.

Реально сам момент инерции вычислялся с помощью операции интегрирования случайной функции (для упрощения изложения отметим, что за эту функцию можно принять координату лицевой поверхности шпунта). А для того, чтобы найти корреляционную

функцию интеграла от случайной функции необходимо дважды проинтегрировать корреляционную функцию исходной случайной величины.

Решение этой задачи также очень трудоемко. По этой причине в работе был разработан упрощенный метод вычислений, который можно найти в отчетах Гипроречтранс.

Итак, с помощью разных ухищрений была найдена искомая величина $P(t)$.

Вопрос в том, что с ней делать?

Ясно, что отказ одной шпунтовой свай никак не отразится на состоянии целой стены камеры шлюза.

Задача была решена следующим образом.

1. Имея информацию о вероятности отказа одной шпунтовой сваи

$P_i = 1 - P(t)$ и зная общее число шпунтовых свай в стене N , можно

получить математическое ожидание числа отказавших свай в одной стене

$$m = N \times P_i$$

а также дисперсию числа отказов

$$D = N \times P_i \times (1 - P_i)$$

Имея m и D можно определить с заданной обеспеченностью общее количество отказавших шпунтовых свай в стене шлюза.

2. Далее можно определить математическое ожидание и дисперсию количества отказавших шпунтовых свай, стоящих рядом

$$M = 1 / P_i$$

$$D_M = [1 - P_i] / P_i^2$$

Эти величины будут характеризовать возможное количество рядом стоящих отказавших свай.

Имея величины m , D , M , D_M мы имеем возможность дать оценку изменения несущей способности всей шпунтовой стены в зависимости от величины коррозионного износа.

Наглядную картину изменения несущей способности шпунтовой стены во времени можно получить из нижеприведенного графика (рис. 4), построенного в координатах

$m_{95\%}$ - число отказавших свай в стене, вычисленное с 95% обеспеченностью;

T – срок эксплуатации в годах.

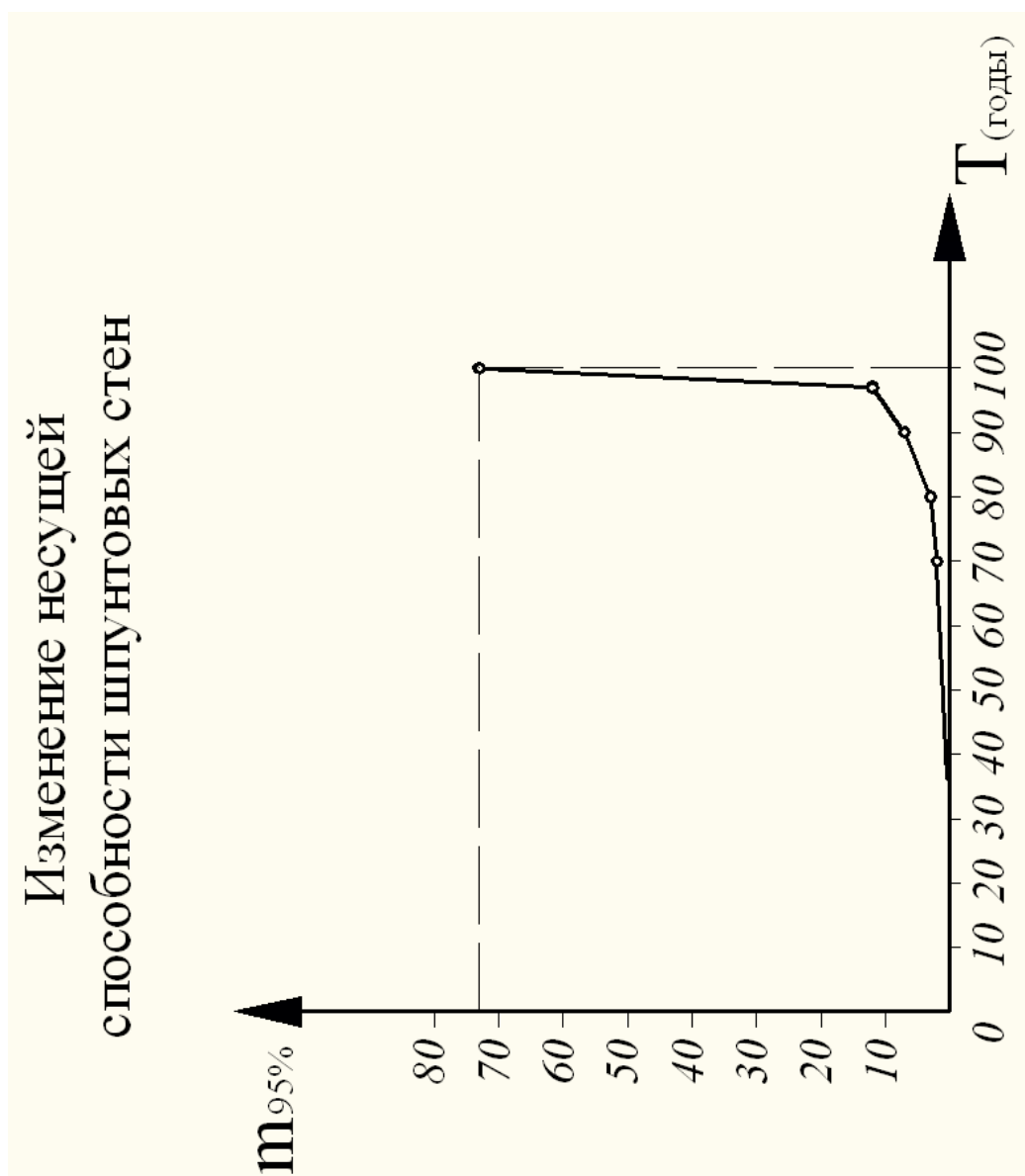


Рис. 4

При этом мы принимали, что скорость коррозионного износа имеет линейный характер.

Надо отметить, что целевое обследование стен камер Пермского шлюза отнюдь не ограничилось изучением коррозии.

Были выполнены:

- натурные и расчетные исследование напряженного состояния шпунтовых свай стен камеры шлюза;
- исследования свойств металла шпунтовых свай;
- анализ показателей химического состава воды р. Камы за последние 50 лет, и много другое.

В частности были разработаны несколько моделей профилометров и ряд приспособлений, обеспечивших успешное выполнение работ.

В конце 90-х годов исследования были продолжены.

Они полностью подтвердили выводы предыдущей работы. А именно, что коррозия в зоне переменного уровня и подводной зоне не представляет опасности для сооружения.

Однако в придонной зоне (0,5 м выше отметки дна камеры) был обнаружен участок чрезвычайно интенсивного коррозионного износа.

Так для шпунта отдельных камер величина коррозии составила 4,3 мм, а скорость коррозионного износа – 0,10 мм / год.

То есть скорость коррозионного износа в 1,5÷2 раза превышала расчетную, а величина суммарного коррозионного износа составляла 86% от предусмотренного проектом запаса в толщине металла на коррозию.

С учетом этих данных для всех стен камер шлюза (а всего их 24) и для всех типов шлюзов был рассчитан остаточный ресурс по критерию достижения предельного состояния.

Приведенная выше оценка надежности шпунтовой свай, пораженной язвенной коррозией, а также шпунтовой стены, состоящей из этих свай, является лишь частным случаем применения весьма эффективного математического аппарата, позволяющего оценить

вероятность выброса случайного процесса за пределы области допустимого состояния.

Такой подход должен найти применение при обработке временных рядов наблюдений за теми или иными показателями работы гидротехнических сооружений.

А это в свою очередь, несомненно, повысит эффективной такой обработки, а, следовательно, эффективность оценки технического состояния сооружений.

Интерес также может представлять разработанная Гипроречтрансом методика прогнозной оценки количества поврежденных элементов сооружений в форме области возможного числа отказавших элементов во времени.

В принципе для того, чтобы получить такую прогнозную оценку необходимы данные о динамике повреждений за довольно большой период времени.

Однако практика обследования судоходных гидротехнических сооружений показывает, что часто такой информации нет. Мы имеем данные только о числе повреждений в одной временной точке, а именно в тот момент, когда проводятся обследования

Единственным показателем, который может быть оценен по такой выборке, является вероятность отказа за время наблюдений. Характер статистической информации не позволяет даже определить возможный тип функции распределения.

В сложившейся ситуации для определения показателей надежности можно использовать специальные математические методы расчета, относящиеся к распределениям с монотонной функцией интенсивности.

Данные методы широко применяются как раз в тех случаях, когда неизвестны истинные законы распределения наработок до отказа, однако на основании опыта, анализа физики появления тех или иных повреждений

(отказов) можно сформулировать определенные качественные свойства исследуемых величин.

Так например многие физические объекты подвержены износу и старению, то есть с течением времени они ухудшают показатели надежности. Эти объекты имеют «возрастающую» или «возрастающую в среднем» функцию интенсивности отказов со временем и их функции распределения соответственно обозначаются как ВФИ или ВСФИ-распределения.

Особенностью упомянутых функций распределения времени безотказной работы является то, что на основании минимальной имеющейся информации можно получить граничные оценки для времени безотказной работы.

В частности, при известном одном моменте распределения, например – времени наработки на отказ (T),

нижняя граница вероятности безотказной работы определяется –

$$P(t) \begin{cases} e^{-t/T} & \text{для } t < T \\ 0 & \text{для } t \geq T \end{cases}$$

верхняя граница –

$$P(t) \begin{cases} 1 & \text{для } t \leq T \\ e^{-wt} & \text{для } t > T \end{cases}$$

где t – текущее время

На рисунке 5 заштрихована область, ограничивающая возможные значения $P(t)$ для любых стареющих распределений.



Рис. 5

Зная значения вероятности безотказной работы можно в свою очередь определить вероятность отказа

$$P^*(t) = 1 - P(t)$$

Кроме того, при одном известном значении квантиля нижняя и верхняя границы безотказной работы определяются как

$$P(t) \begin{cases} \geq e^{-\alpha t} & \text{для } 0 \leq t \leq \varepsilon_p \\ \leq e^{-\alpha t} & \text{для } t > \varepsilon_p \end{cases}$$

где « α » определяется из условия

$$a = -e_p^{-1} \ln(1-p)$$

В этом случае, зная вероятности безотказной работы также можно определить вероятность отказа

$$P^*(t) = 1 - P(t)$$

На рисунке 6 заштрихована область, полученная при известном значении среднего времени наработки на отказ и одном известном значении квантиля.

Если в результате контроля в момент времени T_0 получено число отказавших элементов - N_0 , а общее число таких элементов - N , то

$$p = N_0 / N, \epsilon_p = T_0$$

Таким образом, если в период времени T_0 кроме известного значения отказавших элементов N_0 иметь информацию о их среднем времени наработки на отказ (T) и их общем числе (N), то для элементов, за которыми налажен подобный контроль имеется возможность определить область возможных значений отказов для периода времени $t > T_0$.

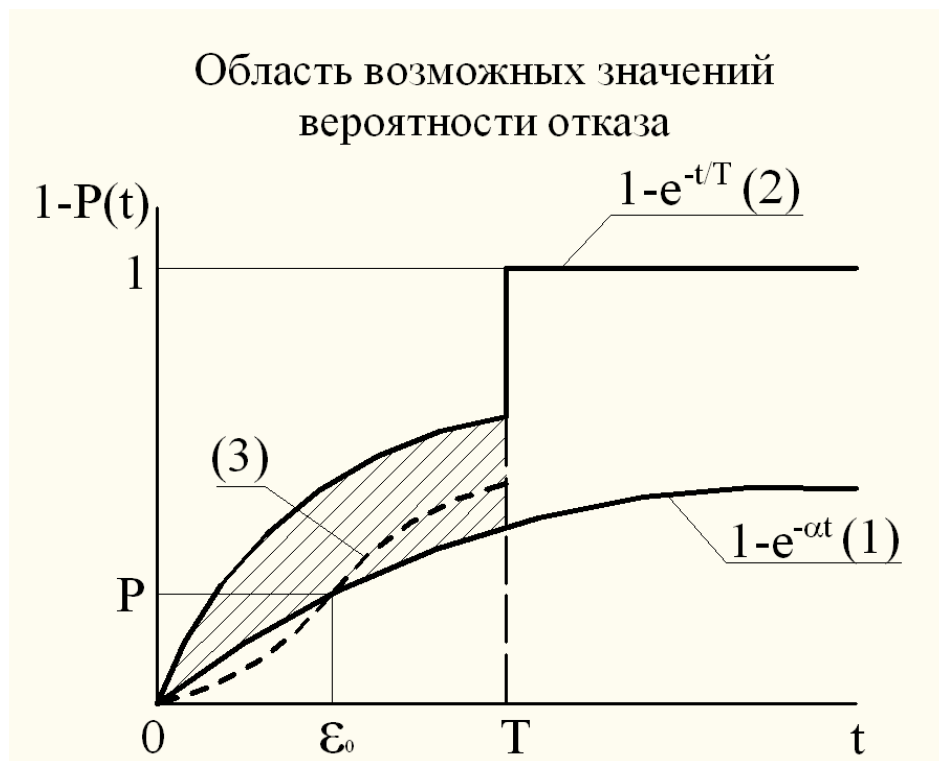


Рис. 6

1 – нижняя граница; 2 – верхняя граница; 3 – процесс отказа элементов

Умножая полученную по графику вероятность отказов $P^*(t)$ на N можно получить график (Рис. 7) с областью возможного числа отказов элементов для различных периодов времени эксплуатации.

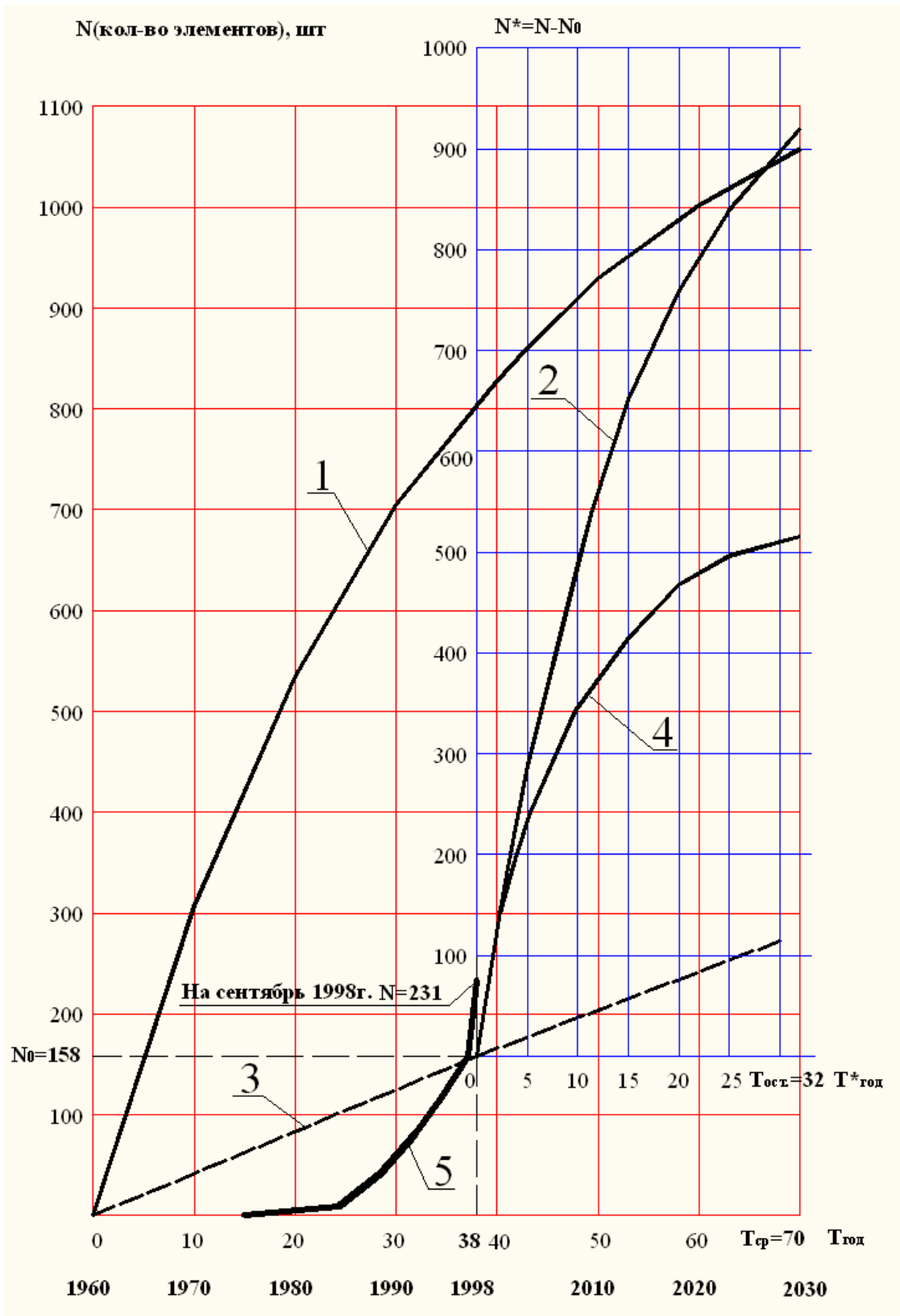


Рис. 7

- 1, 2 – верхняя граница числа возможных отказов элементов;
 3 – нижняя граница числа возможных отказов элементов;
 4 – верхняя граница необходимого темпа производства ремонтных работ;
 5 – фактический темп производства ремонтных работ.

Подобная информация как раз необходима для оценки технического состояния исследуемой конструкции, а также для разработки стратегии ее ремонта.

Можно привести множество других интересных примеров. В частности чрезвычайно интересен опыт Гипроречтранс при обследовании железобетонных и деревянных конструкций. Но это тема отдельного большого разговора.

Представляется, что все выше сказанное достаточно убедительно свидетельствует, о том, что имеющейся в отрасли опыт обследования гидросооружений позволяет получить достоверные оценки состояния сооружения. **Однако для получения такого результата необходимо, чтобы этим делом занимались специалисты.**

Литература

1. Болотин В.В. *Методы теории вероятностей и теории надежности в расчетах сооружений.* – М.: Стройиздат, 1981. – 351 с.
2. Чирков В.П.. *Вопросы надежности механических систем (В помощь слушателям семинара по надежности и прогрессивным методам контроля качества промышленных изделий).* – М.: Знание, 1982.
3. Хусу А.П. *О некоторых функционалах на случайных полях.* – Л.: Вести ЛГУ, № 1 (1957).
4. Хусу А.П., Ю.Р. Виттенберг, Пальмов В.А. *Шероховатость поверхностей. Теоретико-вероятностный подход.* – М.: Наука, 1975.
5. Венцель Е.С. *Теория вероятностей.* – М.: Наука, 196–576 с. с ил.
6. Свешников А.А. *Прикладные методы теории случайных функций.* – Л.: Судпромгиз, 1961.
7. *Надежность технических систем: Справочник /Ю.К. Беляев, В.А. Богатырев, В.В. Болотин и др.: Под ред. И.А. Ушакова.* – М.: Радио и связь, 1985. – 608 с., ил.
8. Барлоу Р., Прошан Ф. *Статистическая теория надежности и испытания на безотказность. / Пер. с англ.* – М.: Наука, 1984. – 328 с.

