

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/vol9-4.php>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN417.pdf>

Статья опубликована 27.08.2017

Ссылка для цитирования этой статьи:

Глазов А.И., Колесников Ю.М. Применение прогнозных статистических моделей для оценки эксплуатационного состояния судоходных гидротехнических сооружений // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 9, №4 (2017) <http://naukovedenie.ru/PDF/57TVN417.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ.

УДК 627.33

Глазов Александр Иванович

ФГБОУВО «Национальный исследовательский Московский государственный строительный университет»
Россия, Москва¹
Кандидат технических наук, доцент
E-mail: GlazovAI@mgsu.ru

Колесников Юрий Михайлович

Кандидат технических наук, доцент
E-mail: kolesoys@rambler.ru

Применение прогнозных статистических моделей для оценки эксплуатационного состояния судоходных гидротехнических сооружений

Аннотация. Организация контроля состояния эксплуатируемых судоходных гидротехнических сооружений (СГТС) требует применения новых подходов ввиду ряда факторов, отражающих фактическое положение дел: старения сооружений и развития деструктивных процессов на них, ужесточения требований к обеспечению безопасности объектов, авария которых может вызвать катастрофические последствия, и др. Современная практика диагностирования состояния СГТС должна базироваться на использовании методов математической статистики, позволяющих анализировать степень влияния различных факторов на поведение конструкций, создавать прогнозные регрессионные модели и назначать критерии оценки состояния сооружений. Статистические методы связаны с построением имитационных (регрессионных) моделей, основанных на построении эмпирической зависимости между измеряемыми в ходе натуральных наблюдений параметрами системы «сооружение – грунтовое основание – грунтовая засыпка» и факторами, которые влияют на изменение этих параметров во времени. С помощью этих моделей можно дать прогнозную оценку величин параметров указанной расчетной системы. В статье приведены примеры разработанных авторами для конкретных гидротехнических объектов статистических прогнозных моделей. Они получены на основе данных многолетних наблюдений за уровнями воды в пьезометрах, раскрытием температурно-осадочного шва между нижней головой и секцией судоходного шлюза, раскрытием шва между порогом и днищем нижней головы.

¹ 129337, Центральный федеральный округ, г. Москва, Ярославское шоссе, д. 26

Ключевые слова: судоходные гидротехнические сооружения; безопасность; контроль состояния; диагностические показатели; критерии безопасности; оперативная оценка; статистическая прогнозная модель

В настоящее время на внутренних водных путях Российской Федерации функционирует значительное количество судоходных гидротехнических сооружений (СГТС), срок эксплуатации которых исчисляется уже многими десятилетиями [4]. Очевидно, что их реальное эксплуатационное состояние в той или иной мере отличается от рассматриваемого на стадии проектирования. Вместе с тем, СГТС являются весьма сложными и ответственными сооружениями, возникновение аварийных ситуаций на которых может привести к тяжелым социально-экономическим последствиям. Решение проблемы их безопасной эксплуатации базируется на теоретических положениях, а также на практических методах контроля, оценки и регулирования безопасности, регламентированных соответствующими нормативно-техническими и методическими документами. Следует отметить, что большая роль здесь отводится повышению уровня организации и проведения натурных наблюдений – одному из важнейших системных факторов обеспечения эксплуатационной надежности и безопасности гидротехнических объектов [1, 10]. Натурные наблюдения, выполняемые с учетом современных требований, позволяют снизить риск аварии и повреждений СГТС, оптимизировать режим их эксплуатации, своевременно и эффективно производить противоаварийные и ремонтные работы, способствуя тем самым снижению эксплуатационных затрат и продлению срока службы.

Для оценки безопасности СГТС необходимо иметь критериальные значения показателей его состояния. Измеренные на данном сооружении с помощью технических средств или вычисленные на основе измерений количественные, а также качественные характеристики его состояния, составляют совокупность контролируемых показателей [2, 6, 7, 9]. Под диагностическими показателями понимаются наиболее значимые для оценки безопасности сооружения и «чувствительные» к внешним воздействиям контролируемые показатели, позволяющие получить оценку его текущего состояния и безопасности. Они назначаются из числа контролируемых (количественных и качественных) показателей состояния в наиболее ответственных (или «опасных») зонах СГТС. При этом перечень диагностических показателей может изменяться в процессе эксплуатации. Диагностические показатели выбираются из совокупности контролируемых показателей с учетом соблюдения некоторых условий (например, диагностический показатель должен поддаваться прогнозу с помощью детерминистических или статистических прогнозных моделей [9]) и для них определяются критериальные значения. Методика контроля безопасности эксплуатируемых сооружений, основанная на использовании процедуры сопоставления текущих значений диагностических показателей их состояния, полученных по результатам натурных наблюдений, с критериальными значениями (или критериями безопасности) [3, 6, 7] нашла наибольшее распространение, так как позволяет оперативно выявить состояние сооружения и отклонения в его работе от проектных требований.

Наиболее опасные зоны, состав количественных и качественных показателей, контролируемых в период эксплуатации, включая диагностические показатели и их критериальные значения, должны определяться при разработке проекта в соответствии с требованиями нормативных документов по проектированию и уточняться в процессе эксплуатации СГТС. Последние, как сложные системы, уникальны, поэтому номенклатура показателей состояния для каждого объекта индивидуальна, однако некоторые показатели являются общими, в частности: осадки, горизонтальные смещения, характеристики фильтрационного и температурного режимов. При этом назначаемые в составе проекта критериальные значения диагностических показателей обязательно увязываются со

сценариями возможных аварий, опасными зонами сооружения и основными возможными формами разрушений гидротехнических объектов.

Перечень диагностических показателей должен обеспечивать возможность оперативной оценки эксплуатационного состояния на конкретном сооружении и оперативного принятия мер по обеспечению безопасности [3]. Кроме того, в процессе эксплуатации на основе анализа работы гидросооружения состав диагностических показателей может дополняться рядом новых, неучтенных на стадии проекта, но существенных для нормального функционирования конкретного объекта.

Определение критериальных значений диагностических показателей для эксплуатируемых сооружений необходимо производить на основе многофакторного анализа следующей информации:

- результатов сопоставления критериальных значений показателей, разработанных в составе проекта, со значениями, полученными на эксплуатируемом сооружении при максимальных фактических силовых воздействиях основного и особого сочетания нагрузок;
- результатов поверочных расчетов наиболее ответственных элементов сооружения с использованием данных о фактических физико-механических характеристиках материалов сооружения и грунтов основания и засыпок;
- результатов анализа статистических моделей (и расчетов по ним), построенных с использованием данных натуральных наблюдений и фактических нагрузок.

Оперативная оценка технического состояния сооружения производится путем сравнения измеренных (или вычисленных на основе измерений) количественных, а также качественных значений диагностических показателей с их критериальными значениями и с прогнозируемым интервалом изменения диагностических показателей. Для обоснования оценки и прогноза состояния СГТС в процессе их эксплуатации рекомендуется разрабатывать прогнозные математические модели – статистические и детерминистические [6, 7]. Прогнозная модель – это зависимость (формула), график или правило (например, в виде компьютерной программы), с помощью которых можно вычислить ожидаемое значение диагностического показателя при любых текущих значениях нагрузок и воздействий и тем самым предсказывать (прогнозировать) величину диагностического показателя.

Прогнозные модели на стадии проектирования базируются на детерминистических расчетных моделях. Заметим, что проектные расчеты по обоснованию устойчивости, механической и фильтрационной прочности гидротехнических сооружений по существу являются прогнозными. Однако они выполняются не на реальные нагрузки и воздействия, а на регламентированные нормами по проектированию гипотетические экстремальные сочетания нагрузок. При этом предполагается, что превышение реальными нагрузками расчетных сочетаний маловероятно. При сравнении измеренных (натурных) диагностических показателей с результатами проектных расчетов различие между ними зачастую столь значительно, что не позволяет корректно судить о состоянии сооружения. Причинами таких различий между расчетными и натурными данными могут быть: недостаточное соответствие проектной расчетной модели реальной работе сооружения; несоответствие физико-механических характеристик материалов, заложенных в расчетную модель сооружения и его основания, их реальным свойствам. Для повышения эффективности детерминистических расчетов следует произвести ее корректировку, включающую: идентификацию (отождествление) расчетной модели и природы посредством проверки гипотез модели на основании данных натуральных наблюдений; калибровку модели, то есть уточнение вводимых в модель физико-механических характеристик материалов сооружения и грунтов основания и засыпок. Кроме того, отметим то обстоятельство, что для подавляющего числа СГТС на стадии проекта детерминистические

математические модели не разрабатывались, а значит, их создание для эксплуатируемых сооружений потребует значительных дополнительных временных и финансовых затрат. Таким образом, применение детерминистических моделей может быть оправдано лишь при проведении детальных обследований СГТС, организуемых, как правило, с целью последующей реконструкции последних.

Если достоверные расчетные значения диагностических показателей получить сложно, то критериальные значения могут быть установлены статистическим методом по результатам анализа данных многолетних наблюдений за состоянием и условиями работы сооружения. Применение методов математической статистики позволяет анализировать степень влияния различных факторов на поведение сооружений, создавать прогнозные регрессионные модели и назначать критерии оценки состояния СГТС. Статистическая прогнозная модель работы сооружения – это регрессионное уравнение, связывающее значения показателя состояния сооружения (например, перемещение, осадка, угол поворота, взаимное смещение секций по швам, напряжение и т. д.) с характеристиками внешних воздействий. Такие зависимости ретроспективно отражают все наблюдавшиеся случаи эксплуатации и с высокой степенью достоверности позволяют прогнозировать поведение сооружения, то есть предсказывать, какие значения показателей его работы должны быть зафиксированы измерениями при данном сочетании внешних нагрузок и воздействий. Прогнозная модель используется как в качестве фильтра, отсеивающего из наблюдаемых случаев эксплуатации те, которые отклоняются от нормальных, так и инструмента анализа аномального поведения сооружений (оперативного выявления начала деструктивных процессов и проявлений скрытых дефектов). Статистическая (регрессионная) прогнозная модель строится на базе обработки данных натуральных измерений за предыдущий период и применяется при наличии представительного временного ряда измерений в диапазоне воздействий, ранее испытанных сооружением [5, 9].

Специфика состава регрессионных зависимостей, алгоритмов регрессионного анализа применительно к контролю состояния гидротехнических сооружений заключается в том, что основными факторами, влияющими на их работу, как правило, являются гидростатическое давление воды, боковое давление грунта засыпки, температурные воздействия и время. Статистическая обработка результатов наблюдений с целью получения аппроксимирующих зависимостей требует индивидуального подхода к анализу данных по каждому показателю и знания физической сути процесса, контролируемого этим показателем. Необходимо иметь в виду, что упрощение статистической модели за счет числа учитываемых факторов, влияющих на значения показателя состояния, может оказаться опасным вследствие неоправданного расширения доверительного интервала аппроксимации. С точки зрения статистики выход вновь полученного результата измерения за границы доверительного интервала свидетельствует (с заданной вероятностью) о том, что этот результат не принадлежит к числу данных, описываемых статистической моделью. С физической точки зрения этот факт следует интерпретировать (при уверенности в отсутствии грубой ошибки измерения) как признак изменения характера процесса, контролируемого данным показателем, что требует принятия мер по выявлению возможных причин этого изменения. Таким образом, статистическая прогнозная модель является действенным инструментом оперативного контроля, позволяющим обнаруживать проявления деструктивных процессов на самых ранних стадиях их развития.

Аппарат регрессионного анализа состоит из трех основных частей, служащих для: 1) подбора состава переменных уравнения регрессии, формирования регрессионной матрицы; 2) вычисления параметров регрессии; 3) представления результатов вычислений. В качестве факторных показателей, учитывающих в регрессионных зависимостях влияние перечисленных факторов, могут использоваться, например:

- абсолютные или относительные значения параметров, характеризующих нагрузки от гидростатического давления воды;
- значение температуры, измеренное в сооружении (температурные воздействия);
- значения, вычисленные с помощью временных функций различной формы (время).

Параметры регрессии рассчитываются в предположении стохастического характера и нормальности распределения наблюдаемых случаев эксплуатации. Коэффициенты уравнений регрессии вычисляются методом наименьших квадратов. Принимая во внимание тот факт, что уравнения регрессии предназначены для прогнозирования, к составу факторных показателей этих уравнений, к характеристикам сходимости между измеренными и вычисленными значениями (критерий Фишера, стандартное отклонение и др.) предъявляются особые требования, которыми следует руководствоваться при создании статистической модели. Одним из основных требований к составу факторных показателей уравнений регрессии является обеспечение такой величины стандартного отклонения, которая позволяла бы прогнозировать нормальное состояние сооружений, исключая риск, как первого рода – недооценка опасности, так и второго рода – переоценка опасности контролируемой ситуации [8]. Выполнение этого требования достигается включением в состав уравнений регрессии только значимых факторов. Результаты регрессионного анализа могут быть представлены в графической и в табличной форме. Графическое представление результатов регрессионного анализа, как правило, состоит во временных графиках измеренных, вычисленных значений анализируемого показателя и значений составляющих уравнения регрессии. Все статистические расчеты и графическое представление результатов прогноза могут быть произведены с использованием современных программных средств для статистической обработки данных.

Изложенный выше подход в части диагностирования состояния эксплуатируемых гидротехнических сооружений является общепризнанным, однако в настоящее время применительно к СГТС он практически не используется. Отсюда следует вывод о том, что существующее здесь положение не отвечает современным тенденциям в области контроля состояния безопасности ответственных гидротехнических объектов. Ниже приведем примеры построения регрессионной модели для трех диагностических показателей СГТС – пьезометрического уровня воды (УВ), осадки секции судоходного шлюза (S) и раскрытия строительного шва (Z).

Известно, что по показаниям закладных пьезометров на подошве нижней головы можно судить об эффективности гашения напора по длине шлюза (от величины остаточного напора зависят как выходные градиенты напора фильтрационного потока, так и противодействие на подошву головы). Наиболее эффективным методом раннего обнаружения отклонений от режима фильтрации, сложившегося на сооружении на сегодняшний день, можно считать использование прогнозных статистических моделей. В качестве примера нами была произведена статистическая обработка показаний пьезометра П10-9, установленного на нижней голове шлюза № 26 Саратовского гидроузла, с целью построения прогнозной модели. Как видно на рисунке 1, в пьезометре прослеживается неинтенсивное снижение уровней воды во времени. Тем не менее, оно оказалось статистически значимым, что привело к необходимости введения в модель фактора времени t . Аналогичным критерием (значимостью) необходимо руководствоваться и при выборе других факторных показателей. В нашем случае уровень воды в пьезометре П10-9 помимо времени, зависит от уровней обоих бьефов – верхнего (УВВ) и нижнего (УНБ), что обусловлено расположением исследуемого пьезометра на сооружении. Это обстоятельство нашло отражение в полученной нами формуле прогнозной модели для отметки уровня воды в пьезометре (УВ), вид которой приведен на рисунке 1. Следует отметить, что прогнозная модель (регрессионная зависимость) характеризуется весьма малым значением σ (ошибка регрессии), что свидетельствует о ее достаточной точности. Таким

образом, можно говорить о высокой степени достоверности прогноза и возможности в рассматриваемом случае выявления негативных процессов, влияющих на режим фильтрации, на ранней стадии развития.

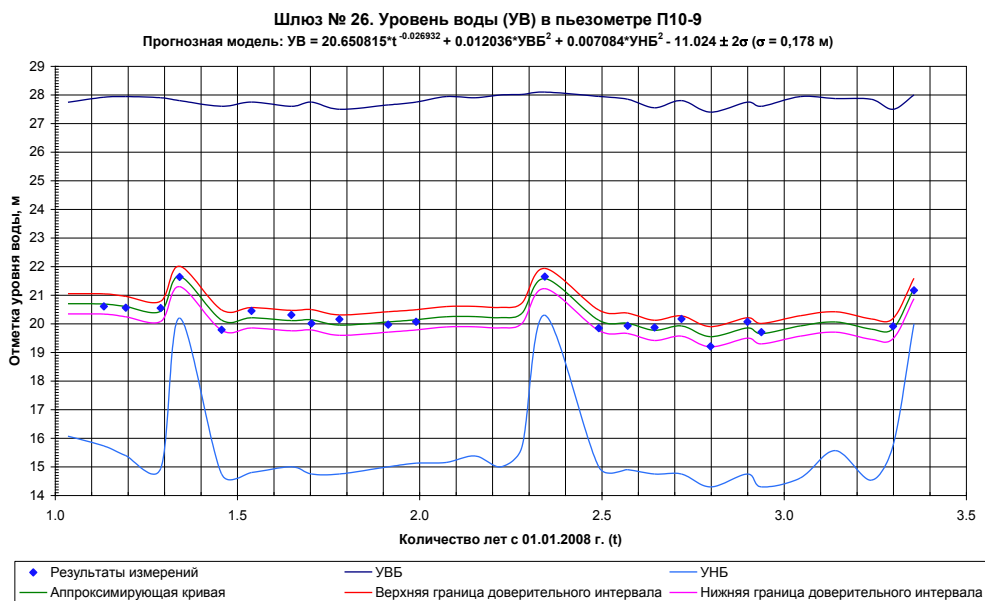


Рисунок 1. Статистическая прогнозная модель изменения уровня воды в пьезометре (разработан авторами)

При оценке процесса вертикальных перемещений элементов судоходных шлюзов следует иметь в виду то обстоятельство, что они работают в условиях циклического изменения вертикальных нагрузок, которое обусловлено многократным наполнением и опорожнением камеры шлюза. Это делает протекающий процесс осадок элементов шлюзов (секций, голов) более сложным по сравнению с другими гидротехническими сооружениями (бетонные плотины, здания ГЭС и насосных станций и др.). При этом на него оказывают влияние и конструктивные особенности самой камеры шлюза. Рассмотрим пример использования регрессионного анализа для построения прогнозных моделей осадки секции шлюза, которая была применена для анализа и диагностирования поведения судоходного шлюза, входящего в состав одного из гидроузлов ФГУП «Канал имени Москвы». В целях формирования полного пакета подобных моделей для указанного объекта нами сначала была произведена статистическая обработка данных по осадкам, предварительно откорректированных с учетом изменения высотного положения реперов, и получены аппроксимирующие их формулы для прогнозирования величины осадки и расчета доверительных интервалов в зависимости от ряда факторов. В качестве основных факторов (в разных сочетаниях в зависимости от конкретного элемента сооружения) принимались: время t , прошедшее с начала года первой нивелировки реперов (количество лет с 01.01.1946 г.); превышение УВБ над порогом верхней головы шлюза Y , м; глубина воды в камере h , м; количество слитых призм N с начала сезона навигации до момента нивелировки (косвенная характеристика интенсивности нагрузки). На рисунке 2 показана прогнозная модель осадки шлюза, базирующаяся на весьма представительном ряде наблюдений.

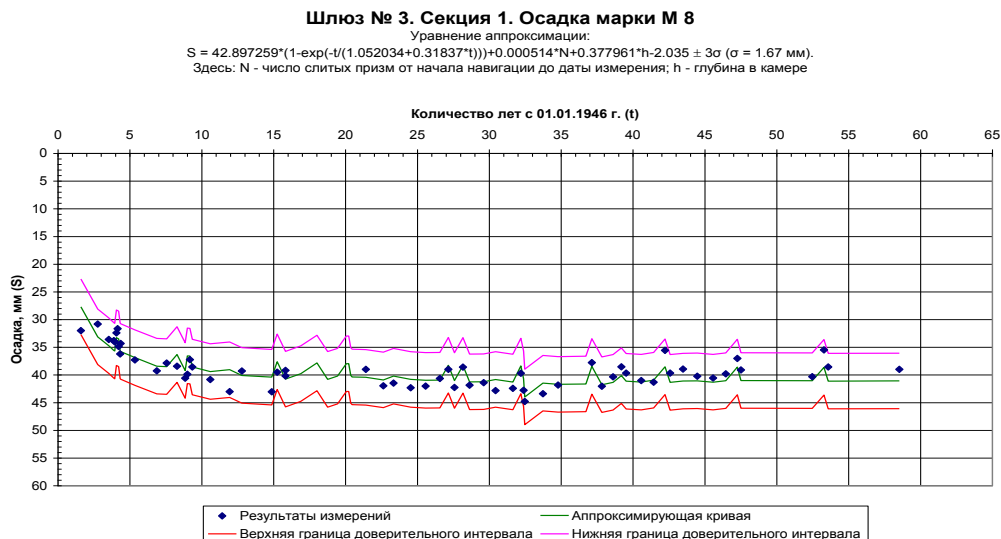


Рисунок 2. Статистическая прогнозная модель осадки секции шлюза (разработан авторами)

Здесь же приведена регрессионная зависимость, посредством которой может быть получено прогнозируемое значение осадки секции шлюза. При этом напомним, что прогнозная модель является инструментом анализа аномального поведения сооружений, то есть оперативного выявления начала деструктивных процессов и проявлений скрытых дефектов.

Статистической обработкой результатов натуральных наблюдений за раскрытием строительного шва Z между порогом и днищем нижней головы судходного шлюза гидроузла № 3 была установлена аналитическая зависимость для прогнозирования его раскрытия (рисунок 3). При этом уточним, что на рисунке 3 для наглядности показана развертка во времени значений исследуемого параметра. При разработке регрессионной зависимости было установлено, что в данном случае единственным значимым фактором, определяющим процесс раскрытия шва, является температура бетона, которая имеет сезонный характер изменения (поэтому величина раскрытия шва, как видно на развёртке, периодически изменяется во времени). В дополнение отметим, что на данном объекте раскрытие шва Z и температура бетона T фиксируются посредством закладной аппаратуры, расположенной в массиве бетона порога и днища. Обратим также внимание и на то, что наличие данных о температуре непосредственно массива бетона позволяет значительно повысить точность прогнозной модели в сравнении с моделями, в которых учет температуры бетона осуществляется косвенными методами.

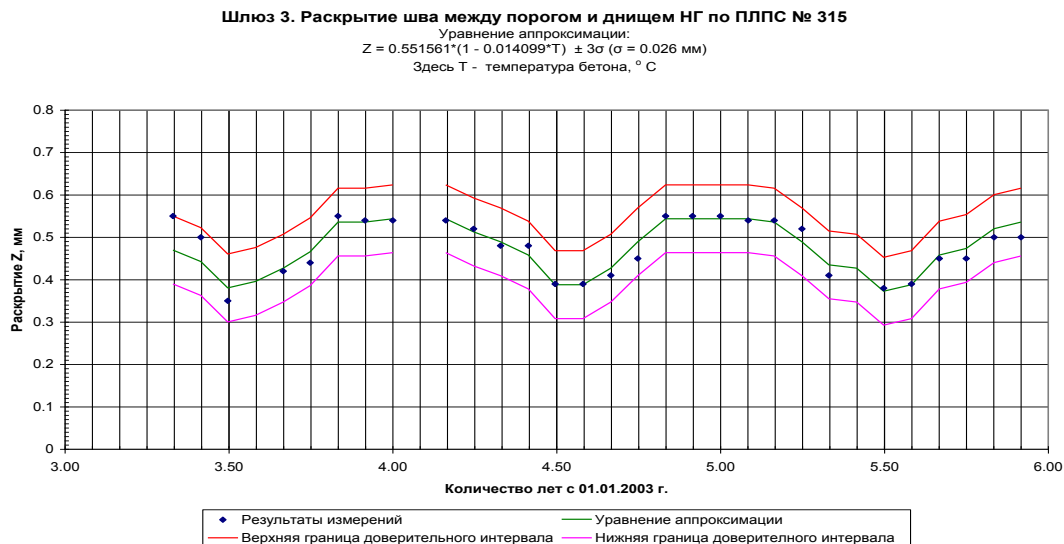


Рисунок 3. Статистическая прогнозная модель раскрытия строительного шва между порогом и днищем нижней головы шлюза (разработан авторами)

Приведенные примеры построения прогнозных статистических моделей свидетельствуют о том, что процедуры регрессионного анализа весьма важны для достоверной и оперативной диагностики состояния эксплуатируемых СГТС, прогноза изменения контролируемых показателей, включая назначение на стадии эксплуатации их предельных значений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Блинов И. Ф., Царев А. И. Натурные наблюдения как средство обеспечения безопасности гидротехнических сооружений // Безопасность энергетических сооружений. М.: АО «НИИЭС». Вып.1. 1998. – С. 53-59.
2. Брызгалов В. И., Гордон Л. А. Критерии безопасности плотины Саяно-Шушенской ГЭС // Безопасность энергетических сооружений. М.: ОАО «НИИЭС». Вып.7. 2000. – С. 37-48.
3. Иващенко И. Н. Методика оперативной оценки безопасности гидротехнических сооружений // Труды Гидропроекта. Вып.135. М., 1990. – С. 12-19.
4. Колесников Ю. М., Колосов М. А. Характеристика современного эксплуатационного состояния судоходных шлюзов // Материалы международной научно-практической конференции «Безопасность речных судоходных гидротехнических сооружений». СПб.: СПГУВК. 2008. – С. 49-70.
5. Лобач А. А. Аппарат регрессионного анализа результатов наблюдений за состоянием гидротехнических сооружений // Безопасность энергетических сооружений. М.: ОАО «НИИЭС». Вып.16. 2007. – С. 41-44.
6. Методика определения критериев безопасности гидротехнических сооружений. РД 153-34.2-21.342-00 / Разработана И. Н. Иващенко, А. И. Царевым, И. Ф. Блиновым и др. М., НИИЭС, 2000. – 34 с.
7. Методические рекомендации по контролю технического состояния и оценке безопасности судоходных гидротехнических сооружений / Разработаны Г. В. Мельником, В. А. Есиновским, С. Н. Левачевым и др. М., Федеральное агентство морского и речного транспорта. 2011. – 136 с.
8. Monitoring of Dams and their Foundations. State of the Art. International Commission Large Dams, Bulletin № 68. Jakarta. Indonesia. 1986. – P. 75.
9. Пособие к «Методике определения критериев безопасности гидротехнических сооружений» / Под редакцией И. Н. Иващенко, И. Ф. Блинова. М.: ОАО «НИИЭС», 2004. – 125 с.
10. Радкевич Д. Б. О роли диагностического контроля в обеспечении безопасной эксплуатации гидросооружений // Труды Гидропроекта. Вып.135. М., 1990. – С. 3-6.

Glazov Aleksandr Ivanovich

Moscow state university of civil engineering, Russia, Moscow
E-mail: GlazovAI@mgsu.ru

Kolesnikov Yury Mikhaylovich

Russia, Moscow
E-mail: kolesoys@rambler.ru

Application of predictive statistical models for estimation of operational condition of navigable hydraulic engineering structures

Abstract. The organization of control of a condition of the operated navigable hydraulic engineering structures demands application of the new approaches reflecting actual situation: aging of constructions and development of destructive processes on them, toughening of requirements to safety of responsible objects. Modern practice of diagnosing of a condition of navigable hydraulic engineering structures has to be based on use of the methods of mathematical statistics allowing to analyze extent of influence of various factors on the behavior of constructions, to create a predictive models and to appoint criteria for assessing of a condition of constructions. Statistical methods are connected with creation of the imitating models based on building of empirical dependence between the parameters characterizing work of designs, measured in the course of natural observations and factors which influence change of these parameters in time. With the help of these models it is possible to give predictive estimate of parameters of the considered settlement system. The article gives examples of predictive statistical models developed by the authors for specific hydrotechnical objects. They are obtained on the basis of data from long-term observations of water levels in piezometers, disclosure of a temperature- sedimentary seam between the lower head and the navigable lock section, etc.

Keywords: navigable hydraulic engineering constructions; safety; control of a condition; diagnostic indicators; safety criteria; operational assessment; predictive statistical model