

## Гидротехническое строительство

УДК 502/504:551.326:627.88

*А. В. Багин, аспирант*

*Д. В. Козлов, доктор техн. наук, профессор*

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования  
«Московский государственный университет природообустройства»

### **ОЦЕНКА ДЕФОРМАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК БЕРЕГОУКРЕПИТЕЛЬНЫХ СООРУЖЕНИЙ ИЗ ГАБИОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ЛЕДОВЫМ ПОКРОВОМ**

*В последнее время в России габионы все больше используются для укрепления берегов рек, водоемов с целью контроля за эрозией. Тем не менее, существующих знаний недостаточно. Мало изучен вопрос воздействия льда на габионные конструкции, в том числе работа габионов в различных районах России, включая районы с суровыми климатическими условиями.*

*Last years gabions are getting more popular in Russia for riverbank protection, reservoir bank protection, and erosion control. Nevertheless the existing knowledge about gabions is not enough. It means that for now there are no studied the question of ice impact to gabion structures and only practical experience in different regions of Russia including in the region with the strong climate conditions.*

В последние годы габионные конструкции в России все более широко применяют в гидротехническом строительстве при возведении и реконструкции сложных берегоукрепительных сооружений, причальных стенок, облицовке дамб, укреплении конусов мостовых переходов, строительстве водопропускных сооружений (рис. 1). Оценка характера взаимодействия этих конструкций с ледовым покровом водоемов, особенно в северных

регионах России, остается очень актуальным вопросом на сегодняшний день.

Действие ледового покрова проявляется различно и зависит от многих факторов: длины ледового поля, толщины льда, слоя снега, температуры и интенсивности ее повышения, коэффициента трения по материалу и грунту, механических свойств льда, колебаний горизонта воды в водоеме, формы водоема и сооружения в плане [1].

В общем случае на откосные сооружения ледовый покров может оказывать различное воздействие: статическое давление от сплошного термического расширения из-за повышения температуры окружающей среды; динамическое воздействие плавающих льдин; вырывающее воздействие, возникающее при изменении уровня воды в водоеме.

Величина ледовой нагрузки, воздействующей на сооружение, прежде всего

зависит от геометрических параметров ледяного образования, степени смерзания в точках контакта обломков, слагающих образование (т. е. прочности структурных связей), скорости его движения [2].

В связи с этим необходимо определить возможные ограничения по применению габионных конструкций в различных условиях окружающей среды, в частности в условиях прямого воздействия на конструкции ледовых полей.

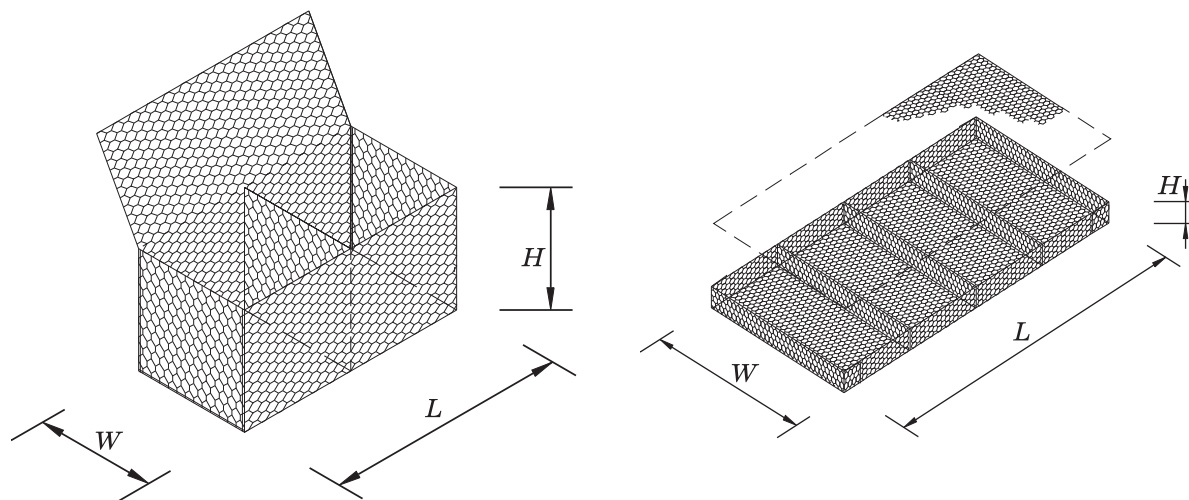


Рис. 1. Общий вид габионных конструкций

При проектировании берегоукрепительных сооружений с применением габионных конструкций, предназначенных для эксплуатации в условиях с тяжелым ледовым режимом, необходимо учитывать возможность воздействия на нихдвигающихся ледовых полей, нагрузки от которых могут быть экстремальными. Если возникают максимально возможные силы сцепления (смерзания) обломков образования, прочность сооружения будет максимальной, т. е. применение габионов — это и есть расчетный случай.

Максимальное внедрение сооружения в лед  $X_{max}$  в каждом случае имеет характерную зависимость от размеров ледяного поля, массы, свойств и начальной скорости дрейфа. Максимальное внедрение может быть определено из балансового энергетического соотношения [2]:

$$\frac{M_T v^2}{2} = \int_0^{x_{max}} F_{ice} dx, \quad (1)$$

где  $M_T$  — масса ледяного поля, т;  $v$  — скорость дрейфа ледяного образования, м/с;  $F_{ice}$  — нагрузка от ледяного поля, кН;  $X_{max}$  — максимальное возможное внедрение ледяного поля, м.

Для определения пассивного сопротивления обычно принимают расчетную модель предельного равновесия грунта, используя теорию предельного равновесия или различного рода приближенные решения, основанные на этой модели.

По мере прорезания набережной поля льда образуется ограниченный, прилегающий к поверхности габиона уплотненный объем скоплений в виде призмы выпора из упорядоченно ориентированных обломков льда, сдвигающейся далее по образовавшимся поверхностям скольжения. При перемещении стенки возникают силы сопротивления сдвигу, препятствующие выпору.

В результате на передней стенке (границе) берегоукрепительного сооружения возникает все увеличивающаяся реакция обломков льда, которая к мо-

менту выпора всей призмы достигает максимальной величины. Эту реакцию называют пассивным сопротивлением, или отпором. Данный физический процесс аналогичен процессу деформации сыпучей среды.

Ледовую нагрузку  $F_{ice}$  определяют по формуле [3, 4]:

$$F_{ice} = F_{b, p} = m k_b k_v R_c D h_c, \quad (2)$$

где  $m$  — коэффициент формы конструкции в плане (определяют по табл. 29 [4]);  $k_b$  — коэффициент смятия (см. табл. 30 из [4]);  $k_v$  — коэффициент скорости (см. табл. 31 из [4]);  $h_c$  — расчетная толщина консолидированной части, м;  $R_c$  — прочность консолидированной части при сжатии, МПа;  $D$  — ширина сооружения по урезу воздействия льда, м.

Наиболее полный анализ и оценка взаимодействия льда и габионов была выполнена на основании натуральных данных по объекту «Реконструкция ограждающей дамбы города Томска».

Томск расположен на правом берегу реки Томи в 70 км выше ее впадения в Обь (рис. 2). Значительная часть городской территории расположена в пределах правобережной прирусловой поймы на потенциально затопляемых отметках местности и защищена от затопления земляной дамбой, построенной в послевоенные годы. Исследуемый участок реки Томи расположен в нижнем течении реки в пределах Западно-Сибирской низменности. Площадь водосбора составляет 57 800 км<sup>2</sup>. Климат района работ резко-континентальный, с теплым коротким летом и продолжительной зимой с низкими температурами; атмосферное увлажнение избыточное, многолетняя мерзлота отсутствует, расчетная глубина сезонного промерзания суглинистых почвогрунтов — 2,4 м, супесчаных — 2,2 м. Согласно СНиП 2.04.05–91 «Строительная климатология и геофизика», район изысканий относится к климатическому району 1В, температура наиболее холодной пятидневки составляет –40 °С, средняя температура наиболее холодного месяца –23,7 °С. С конца 1950-х гг. в связи с начавшейся разработкой русловых карьеров и сбросом подогретых вод от предприятий города

Северска существенно изменились морфометрические характеристики русла, термический и ледовый режимы реки от города Томска до устья реки Томи. В период ледостава на участке Белобородовского плеса наблюдается полынья и заторы здесь не формируются.

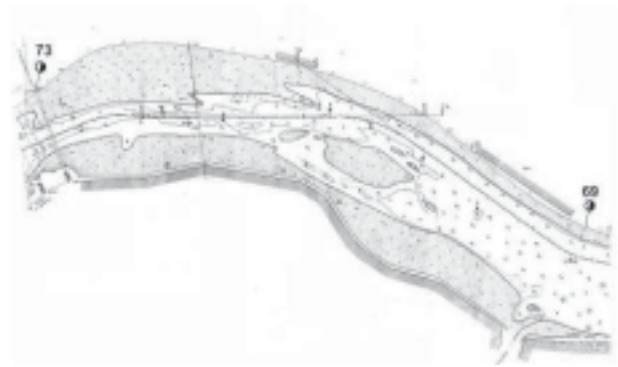


Рис. 2. Участок 73...69 км реки Томи

По характеру водного режима река Томь относится к рекам с весенне-летним половодьем и паводками в теплое время. Основной фазой водного режима является половодье, в период которого проходит 60...90 % годового стока и отмечаются максимальные расходы и уровни воды.

Начало половодья приходится на середину апреля. Согласованность хода уровней и расходов воды нарушается в период осеннего и весеннего ледохода и во время ледостава. Подъем уровней весной начинается в начале — середине апреля, продолжительность подъема уровней составляет около 30 дней. Максимальные расходы воды наблюдаются в конце апреля — середине мая. Окончание половодья приходится на середину — конец июня. Средняя продолжительность половодья — 60...80 дней.

После прохождения половодья устанавливается летне-осенняя межень продолжительностью три-четыре месяца — с конца июня по октябрь. Наименьшие расходы за период летне-осенней межени наблюдаются в августе — сентябре.

Межень устанавливается в конце октября — начале ноября и продолжается до начала подъема половодья (середина апреля). Наименьший зимний расход зафиксирован в 1934 г.

В пределах изучаемого участка река течет в невысоких берегах, сложенных аллювиальными породами. Пойма двусторонняя, шириной до 4 км, изобилует протоками и старицами. Преобладающие отметки поверхности поймы 78...80 м (Балтийская система отметок). На участке проведения изысканий река равнинная, с малыми уклонами, составляющими в межень 0,03...0,05 ‰, в половодье — от 0,07...0,08 ‰ на плесе до 0,2...0,3 ‰ на перекатных участках. Скорость течения реки в половодье достигает 1,5...2,0 м/с. В связи с посадкой уровней, вызванной разработкой русловых карьеров, выход воды на пойму происходит крайне редко. Правая пойма с расположенными на ней строениями отгорожена от русла защитной дамбой. Средняя скорость течения реки в межень изменяется от 0,8...1,0 м/с на перекатных участках до 0,5...0,8 м/с на плесе.

После очищения реки ото льда подъем уровня продолжается, достигая максимальных отметок в период прохождения наибольшего расхода воды — 14-15 мая. Подъем уровня на пике половодья составляет 6...8 м над уровнем зимней межени. Спад половодья в многоводные годы продолжается до середины июля. На спаде половодья и в течение межени возможны колебания уровня воды в пределах до 1...2 м вследствие выпадающих в это время дождей.

Ледостав происходит, как правило, в середине ноября, а ледоход — в третьей декаде апреля. Толщина льда

в марте достигает 1,2 м. Под действием тепловых факторов перед ледоходом толщина ледяного покрова уменьшается на 50...70 %. Размеры отдельных льдин достигают 30...50 м<sup>2</sup>.

Среди рассмотренных вариантов крепления верхового откоса был изучен вариант крепления откоса дамбы с применением габионных конструкций. Габионные конструкции — это контейнеры из металлической сетки двойного кручения с шестиугольными ячейками, изготовленные из проволоки с антикоррозийным покрытием, наполненные каменным материалом. Габионные конструкции — габионы и матрасно-тюфячные габионы (матрацы «Рено») — выпускают различных размеров (в плане и по высоте) и применяют для площадного покрытия откосов. Данное крепление выполняется аналогично креплению каменной наброской. Оно обеспечивает прочность, гибкость, водопроницаемость, долговечность. Габионы — дополнительный армирующий инструмент — более устойчивы к подмывам откоса.

Техническое решение по защите откосов дамбы предусматривало укладку матрацев Рено по склону с упорным зубом внизу откоса и устройством фартука с заведением его до дна реки. Толщина крепления матрацами Рено варьировалась от 0,17 м в верхней части откоса до 0,3 м — низовом откосе, размеры коробчатых габионов для устройства упорного зуба — 4×1×1 м (рис. 3, 4).

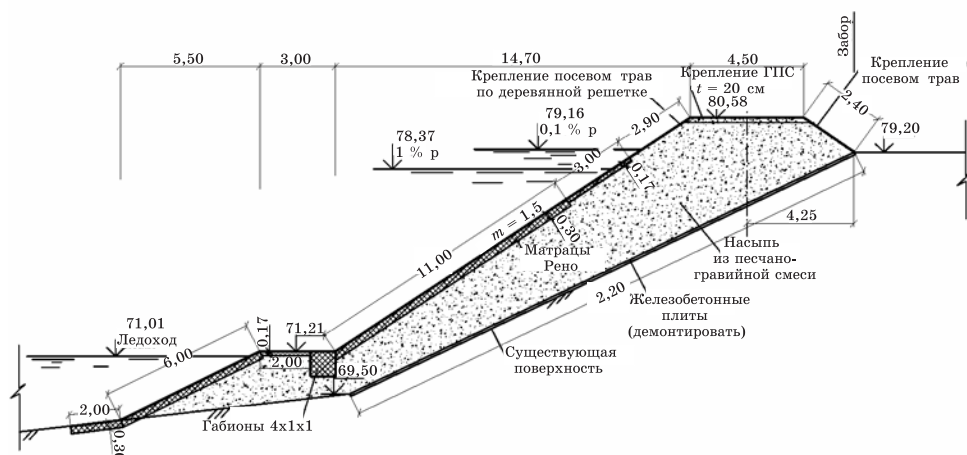


Рис. 3. Типовое поперечное сечение дамбы



Рис. 4. Внешний вид дамбы в процессе строительства укрепления откосов матрацами Рено

Расчеты общей устойчивости были выполнены по круглоцилиндрическому методу (метод Бишопа) с применением программного комплекса компании Маккаферри — MacStars2000. Исходные данные для проведения расчета: инженерно-геологические изыскания (сцепление, угол внутреннего трения, вес грунта в сухом и водонасыщенном состояниях), гидрологический режим реки, всевозможные механические нагрузки, сейсмичность.

По результатам выполненного расчета был получен коэффициент общей устойчивости  $1,526 > 1,35$ , что, согласно требованиям, предъявляемым к надежности при проектировании берегозащитных сооружений такого класса, является достаточным (рис. 5).

Эффективность защиты габионными конструкциями матрацного типа

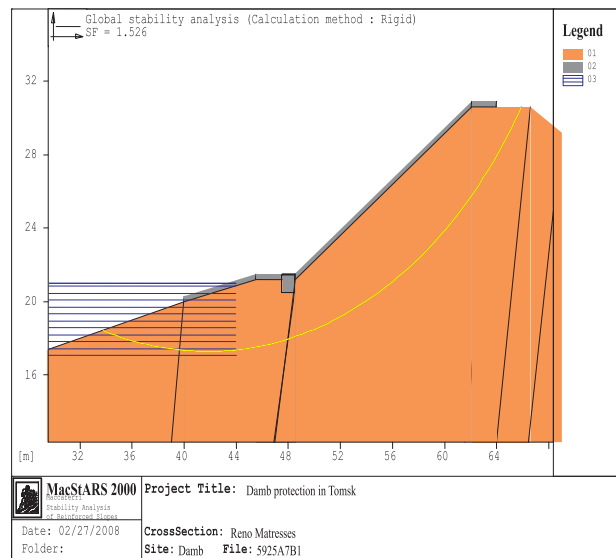


Рис. 5. Расчет общей устойчивости

при взаимодействии с ледовым покровом необходимо оценивать по трем параметрам (рис. 6, 7):

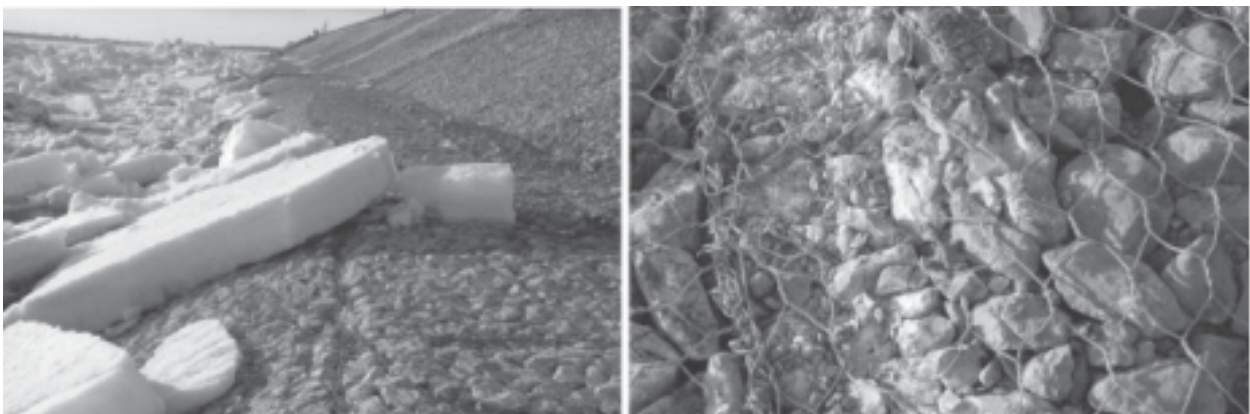


Рис. 6. Наползание льда на откосы дамбы. Локальные повреждения конструкции крепления

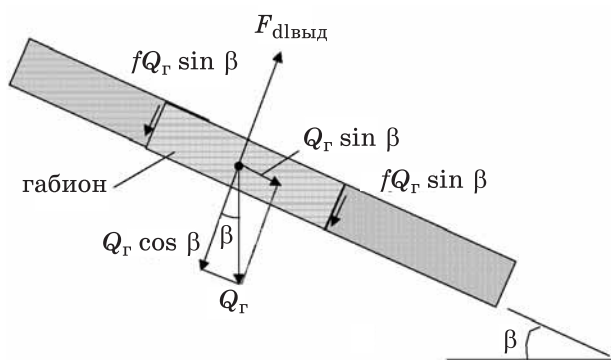


Рис. 7. Схема к расчету укрепления откоса габионами

на действие вырывающей силы от льда при изменении уровня воды в водоеме;

на действие вырывающего момента силы от льда при изменении уровня воды;

на прочность проволоки металлической сетки каркаса габиона.

При этом должно выполняться следующее неравенство [4]:

$$k \geq |k|;$$

$$k = \frac{F_{\text{д1уд. г}}}{F_{\text{д1выд}}},$$

где  $k$  — коэффициент устойчивости;  $|k|$  — коэффициент запаса ( $|k| = 1, 1, 1, 3$ );  $F_{\text{д1уд. г}}$  — удерживающая сила от габионной структуры, кН/м;  $F_{\text{д1выд}}$  — выдавливающая сила от ледового массива.

Действие момента силы определяют по зависимости

$$k = \frac{M_{\text{д1уд. г}}}{M_1},$$

где  $M_{\text{д1уд. г}}$  — момент удерживающих сил, кН·м/м

Прочность проволоки будет обеспечена, если растягивающие напряжения  $\sigma$  от действия вырывающей силы льда  $F_{\text{д1выд}}$  не превысят допустимых  $\sigma_{\text{доп}}$ :

$$\sigma \leq \sigma_{\text{доп}}.$$

Применение габионных конструкций по сравнению с каменной наброской позволяет снизить объем камня (ориентировочно на 20...30 %) за счет уменьшения толщины крепления откоса и использовать для заполнения габионных конструкций каменный материал окатанной формы и меньшей фракции.

В период эксплуатации данное крепление позволяет избежать самопогружения части каменного материала из

каменной наброски в воронку размыва дна русла реки, которое неизбежно при креплении каменной наброской.

При визуальном обследовании крепления откосов Томской дамбы по истечении двух сезонов эксплуатации выявлены локальные повреждения конструкций и разрывы отдельных проволок. Нарушена целостность верхних крышек матрацев Рено, выполненных из сетки двойного кручения. Наибольшие повреждения получены вследствие наползания ледового поля на откос дамбы, т. е. динамического воздействия (см. рис. 6). При этом значительных горизонтально-вертикальных изменений конструкций не зафиксировано.

### Выводы

Габионные конструкции при взаимодействии с ледовыми полями наиболее устойчивы к возникающим сдвигающим моментам и менее устойчивы к динамическому воздействию дрейфующих ледовых образований и наползанию ледовых масс на откосную часть крепления.

При проектировании гидротехнических сооружений с применением габионных конструкций в расчетах необходимо учитывать проявление действия дополнительных удерживающих сил: вес армирующего каркаса габиона; сопротивление сил трения в местах соединения габионов друг с другом (в верхней и нижней частях габиона); вес камня в габионе; половину веса соседних от расчетного габионов (снизу и сверху); вес ледяной призмы над габионом; прочность армирования металлической сетки каркаса габиона.

**Ключевые слова:** берегоукрепительные сооружения, габионные конструкции, ледовый покров, откосные сооружения, матрац Рено, дрейфующие ледовые образования, Томская дамба.

### Список литературы

1. Шабанов, А. Д. Крепление напорных земляных откосов [Текст] / А. Д. Шабанов. — М. : Стройиздат, 1971. — 184 с.
2. Тимохов, Л. А. Динамика морских льдов (математические модели) : монография [Текст] / Л. А. Тимохов, Д. Е. Хейсин. — Л. : Гидрометеиздат, 1987. — 272 с.

3. Беккер, А. Т. Проблема исследований надежности морских сооружений континентального шельфа [Текст] : дис. ... д-ра техн. наук ; защищена 25.05.1998 : утв. 30.05.1998 / Беккер Александр Тевьевич. — М., 1998. — 187 с.

4. Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов) [Текст] : строительные нормы и правила 2.06.04-82 (1995). — Взамен СНиП II-57-75 / Госстрой СССР. — М. : Стройиздат, 1983. — 184 с.

УДК 502/504:627.8

**Г. М. Каганов**, доктор техн. наук, профессор

**В. И. Волков**, канд. техн. наук, профессор

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Московский государственный университет природообустройства»

## К ОЦЕНКЕ СОСТОЯНИЯ НИЗКОНАПОРНЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ ПРИ ОТСУТСТВИИ ПРОЕКТНОЙ ДОКУМЕНТАЦИИ

*В статье на примере обследования гидротехнических сооружений одного из гидроузлов Московской области приведена методика оценки технического состояния и уровня безопасности гидротехнических сооружений и гидроузла в целом. Рассмотрены сценарии развития неблагоприятных процессов, вызванных повреждениями сооружений гидроузла и недостаточным качеством его эксплуатации.*

*In this article on an example of investigation of hydraulic engineering structures of one of hydrounits of the Moscow area the methodology of an assessment of a technical state and safety level of hydraulic engineering structures and hydrounit as a whole is given. The scenarios of development of adverse processes caused by damages of structures of hydrounit and insufficient quality of its operation are considered.*

Одной из основных задач обследований гидротехнических сооружений, в том числе и при проведении инвентаризации, является оценка их состояния и уровня безопасности.

Разработанные для этого методики, представленные в виде стандартов различных ведомств [1–4], ориентированы главным образом на достаточно крупные сооружения (I, II, III классов), для которых сохранилась проектная документация. Особая ситуация возникает при оценке состояния и уровня безопасности небольших сооружений IV (иногда и III) класса, для которых нет проектной документации, отсутствуют службы эксплуатации, т. е. исключена возможность получить даже минимальную устную информацию.

В Московском государственном университете природообустройства, проводившем в 1997 г. по поручению Роскомвода инвентаризацию гидротехнических сооружений в Российской

Федерации, а в последующие годы по заданию Министерства природных ресурсов их обследования, накоплен большой опыт, на основе которого разработана и апробирована методика детального обследования низконапорных гидротехнических сооружений при отсутствии проектной документации.

Оценка состояния и уровня безопасности указанных гидротехнических сооружений на основе детальных обследований выполняется без использования экспертных оценок, базирующихся на балльной системе и специальных расчетах по известным матричным схемам [4]; представляется, что квалифицированный специалист-гидротехник способен по результатам обследований в зависимости от характера действующих факторов и повреждений оценить состояние и уровень безопасности сооружений, а также выдать необходимые рекомендации.