https://doi.org/10.55764/2957-9856/2026-3-77-91.36

МРНТИ 70.17.47
УДК 556.048 631.67:255. 631.563.2

Б. С. Ботантаева[1], А. Р. Вагапова[*2], К. Е. Калиева[3]

[1] К. т. н., ассоц. профессор (Казахский автомобильно-дорожный институт им. Л. Б. Гончарова, Алматы, Казахстан; *botantaeva_b@mail.ru*)
[2 *]К. т. н., ассоц. профессор (Казахский национальный исследовательский технический университет имени К. И. Сатбаева, Алматы, Казахстан; ***vagapova–alina@rambler.ru***)
[3] PhD, старший преподаватель (Казахский национальный аграрный исследовательский университет, Алматы, Казахстан; *karla_3@mail.ru*)

СНИЖЕНИЕ РИСКА РАЗРУШЕНИЯ ВОДОХРАНИЛИЩ В АРАЛО-СЫРДАРИИНСКОМ БАССЕЙНЕ В РЕСПУБЛИКЕ КАЗАХСТАН

Аннотация. Рассмотрены вопросы снижения вероятности разрушения водохранилищ, расположенных в Арало-Сырдариинском водном бассейне. Разработка направлена на повышение надёжности эксплуатации Шардаринской плотины. Согласно нормативу СНиП 3.04–01–2023. «Гидротехнические сооружения. Строительные нормы Республики Казахстан» [1] величины расчётных максимальных расходов воды определяются исходя из ежегодной вероятности превышения, установленной в зависимости от категории сооружения, отдельно для основного и проверочного случаев расчёта. Предложены методические подходы к оценке риска аварийных ситуаций. При анализе риска отказа гидротехнических объектов в Республике Казахстан использованы принципы, разработанные Д. В. Стефанишиным и изложенные в его трудах по нормативной безопасности плотин [3,4]. Рассматриваются организационно-технические меры по обеспечению устойчивости гидротехнических систем, а также оценены необходимые инвестиции в мероприятия по предотвращению возможных разрушений. В Казахстане выявлены 18 сооружений, требующих капитального ремонта и реконструкции. Для эффективного управления каскадом водохранилищ реки Сырдария требуется внедрение современной системы наблюдения за формированием стока и мониторинга гидротехнических и гидрологических параметров. Для накопления достаточного объёма наблюдательных данных необходимо восстановить сеть метеостанций и гидропостов, а также провести модернизацию и строительство новых контрольно-измерительных систем на объектах, включая резервные источники электроснабжения и средства экстренного оповещения населения при возникновении чрезвычайных ситуаций.

Ключевые слова: водохранилище, гидротехнические сооружения, затопление, безопасность ГТС, риск разрушения, аварии, речной бассейн.

Введение. Опыт многолетней эксплуатации плотин и других гидротехнических сооружений на реках свидетельствует о том, что в условиях возникновения аварийных ситуаций эти объекты, формирующие водохранилища и удерживающие водный напор, способны вызвать чрезвычайно тяжёлые последствия, охватывающие обширные территории. Последствия подобных аварийных событий выражаются не только в значительных материальных потерях, но и в угрозе человеческим жизням [1-3].

Международный опыт эксплуатации гидротехнических систем демонстрирует тенденцию к увеличению частоты аварий на подобных сооружениях [4]. В большинстве случаев это связано с прохождением паводков, превышающих расчётные параметры, заложенные при проектировании. Эта ситуация обусловлена ограниченностью наблюдательных данных по экстремальным гидрологическим процессам, а также воздействием изменений климата и интенсивной антропогенной деятельности, оказывающей влияние на водный режим рек и водохранилищ [5, 6].

Среди многочисленных видов техногенных катастроф гидродинамические аварии, возникающие вследствие разрушения плотин, занимают одно из ведущих мест по масштабам причиняемого ущерба и тяжести последствий. Основными причинами таких происшествий, как показывает анализ, являются недостаточная изученность природных условий, неточности в инженерных расчётах, нарушение правил эксплуатации, а также активное освоение территорий нижнего бьефа, подверженных риску затопления при возможных прорывах гидротехнических сооружений [7, 8].

Актуальность исследования определяется необходимостью повышения надёжности и безопасности гидротехнических сооружений в условиях изменяющегося климата и растущего антропогенного воздействия на водные объекты. В современных условиях чрезвычайно важно совершенствовать методы оценки устойчивости плотин, прогнозирования их поведения при нештатных ситуациях и минимизации возможных последствий аварий. Решение этих задач имеет существенное значение для обеспечения экологической, экономической и социальной безопасности территорий, прилегающих к гидротехническим объектам. Для расчетов использованы СНиПы, методики, указанные в литературе. Статья имеет особую ценность при преподавании гидрологии, безопасности жизнедеятельности, строительства гидротехнических сооружений и может быть использована при корректировке СКИОВР.

Дополнительной угрозой является физический износ гидротехнических сооружений. В условиях слабого государственного контроля отсутствие своевременного ремонта и обслуживания ведёт к накапливанию дефектов и увеличению вероятности аварий. В последние десятилетия наблюдается значительное ухудшение состояния водопропускных систем на ряде гидроузлов.

Систематические исследования по предотвращению негативного воздействия водной стихии начали проводиться сравнительно недавно – с 1960–1970-х годов. Решение задачи защиты от наводнений на тот момент связывали преимущественно со строительством гидротехнических комплексов, способных регулировать паводковый сток и снижать риск подтоплений. Тем не менее, несмотря на крупные вложения в инженерные меры, ущерб от наводнений не снижается, а, напротив, продолжает расти. Это свидетельствует о том, что исключительно инженерными решениями проблему не устранить.

Современный подход требует комплексного анализа, охватывающего не только технические и гидрологические аспекты, но также географические, экономические и социальные факторы.

В результате анализа научных источников, посвящённых вопросам предупреждения наводнений и минимизации их последствий, были выявлены работы, сыгравшие значительную роль в становлении и развитии данного научного направления. Существенный вклад в формирование теоретических и практических основ борьбы с наводнениями внесли исследователи, среди которых можно выделить Б. Д. Зайкова, Г. И. Швеца, Ю. Б. Виноградова, К. С. Померанца, А. Б. Авакяна, А. А. Таратунина, а также Ю. Л. Воробьёва и соавторов. Их исследования послужили основой для дальнейшего развития методик прогнозирования, регулирования паводковых стоков и оценки ущерба, наносимого водными стихиями [9].

Наряду с отечественными исследованиями значительный вклад в изучение проблем предотвращения и последствий наводнений внесли зарубежные учёные. В частности, в работах Р. У. Крейга, Дж. С. Миллера, Э. Х. Браунаи Д. М. Уильямса рассматриваются вопросы оптимизации систем противопаводковой защиты, интеграции инженерных и природных решений, а также совершенствования методов оценки риска затопления. Существенное внимание уделяется адаптации гидротехнических сооружений к изменяющимся климатическим условиям и разработке современных технологий мониторинга состояния водных объектов.

В зарубежной научной практике активно развиваются направления, связанные с моделированием паводковых процессов и использованием геоинформационных систем (ГИС) для прогнозирования зон возможного затопления. Исследователи, такие, как К. Андерсон и М. Шульц, отмечают эффективность применения цифровых моделей рельефа и спутниковых наблюдений при управлении водными ресурсами и снижении ущерба от наводнений [11].

Сравнительный анализ отечественных и зарубежных подходов показывает, что казахстанская и российская научные школы традиционно уделяют внимание инженерно-гидротехническим аспектам защиты территорий, в то время как зарубежные специалисты акцентируют внимание на системном управлении рисками, экологической устойчивости и социально-экономических последствиях. Совмещение этих подходов представляется перспективным направлением дальнейших исследований, направленных на повышение надёжности гидротехнических сооружений и снижение последствий гидродинамических аварий.

Целью исследования является адаптация принципов нормативной безопасности и анализа риска отказов ГТС к условиям Арало-Сырдарьинского бассейна для обоснования необходимых инвестиций в модернизацию систем мониторинга и предотвращение разрушения плотин.

Научная значимость работы заключается в систематизации гидрологических рисков Арало-Сырдариинского бассейна с учетом текущей деградации гидротехнических сооружений.

Практическая ценность подтверждается разработанным комплексом мер по мониторингу устойчивости плотин, который может быть внедрен в деятельность подразделений Министерства водных ресурсов и ирригации РК.

В **социальном аспекте** реализация предложенных стратегий позволит минимизировать риски для жизни населения и предотвратить экономический ущерб в аграрном секторе. Кроме того, результаты исследования служат обновленной базой для **подготовки инженерных кадров** в вузах Казахстана по направлению «водное хозяйство».

Материалы и методы исследования. В бассейне реки Сырдария функционируют свыше 18 водохранилищ, из которых девять имеют объём, превышающий 10 млн м^3 [12]. В целом техническое состояние этих водохранилищ можно оценить как удовлетворительное. Наиболее крупные и значимые объекты приведены в таблице 1.

Основная часть подпорных сооружений в регионе выполнена в виде земляных плотин. Такие конструкции уязвимы перед переливом воды через гребень, что представляет серьёзную угрозу их разрушения [1, 13].

Особую стратегическую важность представляют следующие водохранилища: Шардаринское, отнесённое к I классу ответственности, а также Бугунское и Бадамское, относящиеся к III классу ответственности [9,14].

Таблица 1 – Характеристика водохранилищ бассейна р. Сырдария [12]

Table 1 – Characteristics of reservoirs in the Syr Darya River basin [12]

Водохранилище	Водоток рек	Год ввода в эксп.	Класс ГТС	Объем водохранилища, млн м^3			Макс. расход водосбросов, м^3/с	
				отм. НПУ	при НПУ	отм. ФПУ	Проект	Факт
Шардаринское водохранилище	Сырдария	1966	I	252,0	5197*	253,0	4160,0	2600
Бугунское	Бугун	1963	III	259,85	370,0	261.38	90,0	184
Северное Аральское море	Сырдария	2007 I-очередь	I	42,0	27070,0	43,04	256,0	367,0
*Емкость водохранилища по замерам 1977 года.								

Шардаринское водохранилище располагается в Туркестанской области республики, на нижнем участке среднего течения реки Сырдария. Его акватория протянулась на север от Туркестанского хребта, включая отдельные части равнин Голодной степи, низины Арнасай и долины реки Сырдария [15].

Гидротехнический комплекс водохранилища сформирован за счёт функционирования двух основных плотин, обеспечивающих его наполнение и регулирование водных ресурсов. Одна из них построена непосредственно на Сырдарие в районе города Шардары, вторая перекрывает понижение Арнасай, расположенное на границе с Узбекистаном.

Согласно проектным данным площадь водосборного бассейна до створа Шардаринской плотины составляет 174 000 км^2. Среднемноголетний объем стока обеспеченностью 50 % – 14,5 км^3, а в период половодья – около 8,8 км^3. Максимальный расчётный расход воды при вероятности 0,1 % достигает 5413 м^3/с [15].

Гидротехнический комплекс включает в себя основные структурные элементы, такие, как Шардаринский и Арнасайский узлы сооружений, а также систему инженерных сооружений, обеспечивающих защиту прилегающих территорий от затопления и подтопления.

Шардаринский узел представляет собой комплекс сооружений, включающий намывную плотину, здание русловой гидроэлектростанции (совмещённое с водосбросными устройствами), а также Кызылкумский регулятор, расположенный на левом берегу.

Плотина сооружена методом гидромеханизированного намыва с использованием песчаных грунтов местного происхождения [16]. Верховой откос укреплён железобетонной облицовкой,

уложенной на основание из гравийно-песчаного слоя, что обеспечивает его устойчивость к размыву и воздействию волновых нагрузок [13].

В зонах деформационных швов размещён двухслойный фильтр обратного типа.

Низовой откос выполнен из гравелисто-суглинистого грунта с обустройством трубчатого дренажа и трёхслойного фильтра. Для отвода фильтрационных вод предусмотрена система дренажных канав с саморазгружающимися скважинами. По верхней части плотины проложена автодорога с асфальтовым покрытием, ширина которой составляет 6 м.

В состав водопроводящих сооружений гидроэлектростанции входят глиняный понур, железобетонный водобой, рисберма, а также подпорные стенки, предназначенные для регулирования уровней воды в верхнем и нижнем бьефах.

Водоприёмные камеры водосбросов и турбинные водоводы оборудованы как рабочими, так и ремонтными затворами. Габариты затворов составляют 5×6 м для водосбросов и 5×5 м для турбинных водоводов. Подъём ремонтных затворов выполняется с помощью козлового крана грузоподъёмностью 2×25 т, а управление рабочими затворами осуществляется посредством гидравлических подъёмников с усилием до 50 т.

Кызылкумский регулятор включает башенный водоприёмник и трёхочковую трубную конструкцию размером 4,5×3,5 м, проходящую под телом плотины. Башня, расположенная в акватории водохранилища, соединена с трубой, состоящей из пяти секций длиной по 20 м каждая. Внутри башни установлены рабочие и ремонтные затворы размером 3,5×4,5 м, управление которыми осуществляется электроприводным подъёмником грузоподъёмностью 30 т, а также козловым краном аналогичной грузоподъёмности.

Арнасайский узел сооружений состоит из земляной плотины и водосбросного сооружения. Плотина выполнена методом послойной насыпи с использованием местных супесчаных грунтов. Верховой откос укреплён железобетонными плитами, что обеспечивает устойчивость откоса и защиту от размыва при колебаниях уровня воды, с устройством ленточных трёхслойных фильтров в зонах швов. Верхняя часть облицовки завершена парапетной стенкой высотой 0,8 м.

По гребню плотины проходят автомобильная и железная дороги, а также линии связи. На расстоянии около 24 м от оси плотины расположена линия электропередачи напряжением 110 кВ, соединяющая Шардару с Жетысайем.

Сбросное сооружение Арнасайского узла предназначено для пропуска и отвода избыточных паводковых вод. Оно представляет собой открытый водосливной комплекс, в состав которого входят щитовая секция, а также сопрягающие элементы – понур, водобой и рисберма, обеспечивающие безопасное снижение скорости потока и предотвращение размыва основания.

Щитовая секция сооружения включает четыре пролёта шириной по 10 м каждый. В её конструкции предусмотрены как ремонтные затворы размером 10×8 м, так и рабочие – 10×6 м. Управление затворами осуществляется при помощи козлового крана с грузоподъёмностью 2×125 т, обеспечивающего их надёжное поднятие и опускание при регулировании сброса воды.

Инженерная защита северо-западной части Голодной степи от процессов подтопления осуществляется посредством системы защитных гидротехнических сооружений. В её состав входят обвалованная дамба, система вертикального дренажа, включающая 39 скважин глубиной 50–60 м [12,17], разветвлённая сеть водоотводных и сбросных каналов, а также насосные станции, предназначенные для перекачки избыточных вод.

Для систематизации основных характеристик Шардаринского гидроузла представлен свод параметров, включающий сведения о водохранилище, плотинах, защитных дамбах и пропускной способности гидротехнических сооружений. В таблице 2 приведены данные о проектных и фактических объёмах водохранилища, отметках нормального и максимального подпорного уровня, а также о горизонтальном мертвом объёме и площади зеркала водной поверхности при заданном уровне. Кроме того, представлены конструктивные параметры Шардаринской и Арнасайской плотин, включая длину, высоту, ширину гребня и заложение откосов, а также характеристики защитной дамбы. Отдельно выделена пропускная способность гидросооружений при паводковых расходах с обеспеченностью 0,01%, что позволяет оценить их функциональную способность при экстремальных гидрологических условиях.

Таблица 2 – Основные технические параметры Шардаринского гидроузла*

Table 2 – Main technical parameters of the Shardara hydroelectric complex*

№	Наименование		Показатели
1. Параметры водохранилища			
1	Полный объем водохранилища	по проекту	5700 млн м^3
		при промерах 1977 года	5197 млн м^3
2	Полезный объем	по проекту	4700 млн м^3
		при промерах 1977 года	4230 млн м^3
3	Мертвый объем водохранилища	по проекту	1000 млн м^3
		при промерах 1977 года	967 млн м^3
4	Отметка нормального подпорного уровня (НПУ)		252 м Б.С.
5	Максимальный подпорный уровень (МПУ)		253 м Б.С.
6	Горизонт мертвого объема (ГМО)		244 м Б.С.
7	Площадь зеркала водохранилища при НПУ	по проекту	900 км^2
		при промерах 1977 года	783,4 км^2
2. Конструктивные параметры Шардаринской плотины			
1	Общая длина плотины		5300 м
2	Отметка гребня		254,5 м Б.С.
3	Отметка парапета		255,5 м Б.С.
4	Максимальная высота сооружения		28,5 м
5	Максимальная ширина гребня		12,6 м
6	Заложение откосов:	выше бермы	1:4
		ниже бермы	1:4,5
3. Основные характеристики Арнасайского узла			
1	Длина плотины		2020 м
2	Отметка гребня		254,5 м Б.С.
3	Максимальная высота сооружения		10,4 м
4	Ширина гребня		16,5 м
5	Заложение откосов:	верховой	1:3
		низовой	1:3
6	Толщина укрепления верхового откоса		0,25 м
4. Параметры защитной дамбы			
1	Длина дамбы		18,5 м
2	Ширина по верху		4,0 м
3	Максимальная высота		5,5 м
4	Заложение откосов		1:3
5. Гидравлическая характеристика сооружений			
1	Максимальная пропускная способность при паводке с обеспеченностью		*0,01%*
2	Водосбросы ГЭС		1282 м^3/с
3	Гидроагрегаты ГЭС		518 м^3/с
4	Кызылкумский регулятор		200 м^3/с
5	Арнасайский сброс		2160 м^3/с
*Составлено автором по данным [15, 17]).			

Восстановление водосброса Шардаринской плотины. Настоящая разработка выполняется для обеспечения безопасности Шардаринской плотины.

Разработка проекта по восстановлению водосброса Шардаринской плотины направлена на обеспечение её безопасной эксплуатации. Гидроузел включает земляную плотину, гидроэлектростанцию и водосброс с проектной пропускной способностью 1500 м^{3}с. Дополнительно Кызылкумский водовыпуск рассчитан на 200 м^3/с. Арнасайский гидроузел, включающий аналогично земляную плотину и катастрофический водосброс, рассчитан на пропуск 2160 м^3/с.

В результате длительной эксплуатации фактические пропускные способности водосбросов снизились. Так, рабочий водосброс Шардаринской плотины способен пропускать только 682 м^3/с из-за вибрационных воздействий при прохождении паводков, а Арнасайский сброс – всего 600 м^3/с, что обусловлено возведением двух подпорных плотин в нижнем бьефе на территории Узбекистана [17,18]. В настоящее время максимальный допустимый расход воды в нижнем бьефе Шардаринской плотины составляет 1200 м^3/с в летний период и 600 м^3/с зимой.

Согласно гидрологическим расчётам, выполненным для экстремальных условий (обеспеченность 0,1 %, или один раз в тысячу лет), потребность в дополнительной пропускной способности составляет 500 м^3/с. Таким образом, суммарная проектная способность системы водосбросов должна достигать 3532 м^3/с [19]. В ходе инженерного анализа рассмотрены три возможные конфигурации размещения дополнительного водосброса. Принят вариант с размещением на левом берегу Сырдарии. Комплекс дополнительных сооружений включает подводящий канал, водослив и отводящий канал, трасса которого проходит вдоль бывшей железнодорожной ветки. Из четырёх возможных вариантов трассировки отводящего канала был выбран тот, при котором предусмотрено пересечение Кызылкумского канала методом дюкера, проложенного под отводящим каналом водосброса. Суммарный максимальный расход паводковых вод, сбрасываемых из Шардаринского водохранилища в Сырдарию, может достигать 2400 м^3/с, что создаёт угрозу затопления нижележащих территорий. В связи с этим предлагается использовать Коксарайский контррегулятор для частичной трансформации паводкового стока и снижения расхода до безопасного уровня 1800 м^3/с.

Бугунское водохранилище расположено в Туркестанской области Казахстана на реке Бугун, вблизи одноимённого населённого пункта. Оно сформировано двумя плотинами: одна перекрывает русло реки Бугун, другая – понижение Каражантак. Основная задача водохранилища – регулирование стока рек Бугун и Арысь для последующего распределения по Арысскому магистральному каналу с целью ирригации 70,6 тыс. га сельхозугодий.

Проектирование водохранилища было выполнено в 1955 году институтом «Казгипроводхоз» (г. Алматы), а его строительство завершилось в 1963 году. В состав основных сооружений гидроузла входят Бугунская плотина, Каражантакская дамба, водосбросное и водовыпускное сооружения, а также водораздельный узел с головным шлюзом Туркестанского магистрального канала, который обеспечивает подачу воды в Арысский канал.

Бугунская плотина возведена из уплотнённого местного суглинка. Верховой откос укреплён сборными железобетонными плитами толщиной 12 см (до отметки 252,70 м) и 10 см (до отметки 247,21 м), уложенными на гравийно-песчаное основание толщиной 35 см. Плиты сгруппированы в карты размерами 12×12 м и 12×16 м, что обеспечивает равномерное распределение нагрузок и повышает устойчивость откоса к воздействию водного потока, между которыми предусмотрены температурно-усадочные швы с трёхслойным обратным фильтром под ними. Поверх облицовки выполнен дополнительный слой монолитного железобетона, обеспечивающий герметизацию всех стыков. В прибрежной зоне предусмотрены отдельные монолитные ленты, предназначенные для защиты вертикальных и горизонтальных соединений. Парапет выполнен как единое конструктивное целое с облицовкой напорного откоса, что повышает его прочность и устойчивость. Низовой откос укреплён методом высевания травяного покрова для предотвращения эрозии. В основании откоса устроена дренажная система из гончарных труб диаметром 150 мм, заключённых в трёхслойный фильтр. Система дополнена 23 смотровыми колодцами и шестью отводами, направляющими собранные воды в водоотводные канавы.

Каражантакская дамба возведена из уплотнённых суглинистых грунтов. Её поперечный профиль отличается сложной конфигурацией, что обусловлено прохождением по низовому откосу оросительного канала, предназначенного для подачи воды на противоположную сторону долины.

Верховой откос укреплён железобетонными плитами толщиной 10 см, поверх которых уложена каменная наброска из несортированного камня для защиты от размыва. Низовой откос оснащён дренажной системой аналогичной конструкции, включающей гончарные трубы диаметром 150 мм, десять смотровых колодцев и два водоотводных канала.

Водовыпуск и водосброс Бугунского гидроузла выполнены в виде железобетонной двухочковой трубы, состоящей из 5 секций длиной по 13,5 м каждая. Сечение каждого очка составляет 2,5×2,5 м. Шахта затворов размещена между второй и третьей секциями и встроена в тело плотины, что обеспечивает её защиту и устойчивость конструкции. Верхняя часть шахты заканчивается рабочей площадкой на уровне гребня плотины, где установлены двухвинтовые подъёмные механизмы грузоподъёмностью 20 т, предназначенные для управления затворами. Внутри шахты размещены четыре колесных затвора: два рабочих и два ремонтных. Управление осуществляется с помощью двухвинтовых подъемников, оборудованных как ручным, так и электрическим приводом. Основное электроснабжение гидроузла происходит через трансформаторную подстанцию мощностью 100/10 кВА, обеспечивающую питание всех технологических систем. В качестве резервного источника используется мобильная дизельная электростанция, предназначенная для автономной работы оборудования в аварийных ситуациях. За трубным водосбросом расположен водобойный колодец, который конструктивно связан с вододелительным сооружением и служит для гашения энергии потока и предотвращения размыва нижнего бьефа.

Вододелительный узел включает головной шлюз Туркестанского магистрального канала (ТМК) с расчётной пропускной способностью 45 $м^3$/с, а также шлюз сбросного канала, рассчитанный на 90 $м^3$/с. Конструкция головного шлюза ТМК состоит из двух пролётов шириной по 5 м, перекрываемых сегментными затворами. За порогом предусмотрен укреплённый участок длиной 12 м и шириной от 11 до 12 м, обеспечивающий устойчивость конструкции при пропуске потока. Шлюз сбросного канала выполнен в виде двух пролётов шириной по 6 м, оборудованных сегментными затворами, рассчитанными на напор до 4 м. Длина укреплённого участка за порогом составляет 15 м, ширина – от 13 до 14 м. Оба сегментных затвора снабжены канатными подъёмными механизмами грузоподъёмностью по 10 т, обеспечивающими надёжное управление водопропускным процессом.

Подпитывающий Арысский канал служит для переброски части свободного стока реки Арысь в Бугунское водохранилище, обеспечивая его наполнение и устойчивый водный баланс. Концевая часть Арысского магистрального канала проходит в непосредственной близости от зоны затопления водохранилища. Ширина канала по дну составляет 10 м, откосы имеют уклон 1,5. Наружный откос дамбы канала выполнен с коэффициентом заложения 1:17, что обеспечивает устойчивость сооружения и предотвращает эрозионное разрушение при повышении уровня воды.

Согласно архивным данным эксплуатирующей организации (Южно-Казахстанское управление водного хозяйства), за период эксплуатации зафиксированы три случая предаварийного состояния: в 1969, 1980 и 1982 годах. Все инциденты были вызваны штормовыми воздействиями:

1969 г. – в первые годы работы водохранилища произошло разрушение уложенных на отдельных участках плит размером 12×12 м и толщиной 10–12 см, образующих карты. Восстановительные работы включали бетонирование швов, а в наиболее пострадавших зонах – сплошное бетонирование крепления откоса.

1980 г. – штормовые волны вызвали перелив воды через парапет, что привело к разрушению гребня плотины и повреждению низового откоса. В процессе реконструкции был возведён усиленный парапет, поверхность гребня укреплена асфальтовым покрытием, а откос полностью восстановлен и усилен для повышения устойчивости сооружения к воздействию волновых нагрузок.

1982 г. – вследствие сильного шторма произошло разрушение крепления левобережного примыкания плотины и части Каражантакской дамбы. В ходе восстановительных работ напорный откос был укреплён методом каменной наброски, что позволило повысить устойчивость сооружения к воздействию волновых нагрузок.

Основные гидротехнические характеристики водохранилища и сооружений приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Основные характеристики Бугунского водохранилищного гидроузла

Table 3 – Main characteristics of the Bugun reservoir hydroelectric complex

№	Наименование		Показатели
1. Параметры водохранилища			
1	Объем водохранилища	полный	370 млн $м^3$
		полезный	363 млн $м^3$
		мертвый	4,0 млн $м^3$
3	Отметка нормального подпорного уровня (НПУ)		259,85 м Б.С.
4	Максимальный подпорный уровень (МПУ)		261,38 м Б.С.
5	Горизонт мертвого объема (ГМО)		248,5 м Б.С.
6	Площадь зеркала водохранилища при НПУ		63,5 $км^2$
2. Конструктивные параметры Бугунской плотины			
1	Общая длина сооружения		5,2 км
2	Отметка гребня		262,0 м Б.С.
3	Отметка парапета		262,9 м Б.С.
4	Максимальная высота плотины		21,0 м
5	Максимальная ширина гребня		8,0 м
6	Заложение откосов отличается в зависимости от расположения:	выше бермы	2,5–3,8
		ниже бермы	2,0–3,0
3. Основные параметры Каражантакской дамбы			
1	Длина дамбы		3,2 км
2	Отметка гребня		262,0 м Б.С.
3	Отметка парапета		262,9 м Б.С.
4	Максимальная высота дамбы		10,0 м
5	Максимальная ширина гребня		8,0 м
6	Угол заложения откосов	верховой	2,5
		низовой	1,5–2,5
4. Гидравлические характеристики			
1	Максимальная пропускная способность всех сооружений при паводках с обеспеченностью		0,5%
2	Водовыпуск и водосброс		90 $м^3/с$

При анализе риска аварий гидротехнических сооружений Республики Казахстан применены методологические подходы, разработанные Д. В. Стефанишиным и изложенные в его работе «Оценка нормативной безопасности плотин по критериям риска» [3, 4].

В таблице 4 приведены значения коэффициента удельного ущерба (Ку) и нормативных рисков, предложенные А. Б. Васильевым и Ю. Б. Мгалобеловым для грунтовых плотин.

Таблица 4 – Нормативные риски и коэффициенты надежности устойчивости земляных плотин разных классов ответственности (по СНиП 3.04–01–2023 «Гидротехнические сооружения. Строительные нормы Республики Казахстан») [1]

Table 4 – Standard risks and reliability factors for the stability of earth dams of different responsibility classes (SNiP 3.04–01–2023 “Hydraulic structures. Construction Norms of the Republic of Kazakhstan”) [1]

Класс ответственности	Коэффициент надежности k_e по СНиП 3.04-01-2023	Коэффициент устойчивости K_y		По нормам РФ риски 1/год	
		Основное сочетание нагрузок	Особое сочетание нагрузок	Нижний предел $\lambda_{осн}$	Верхний предел $\lambda_{осн}$
I	1,25	1,56	1,41	$3\cdot10^{-5}$	$5\cdot10^{-5}$
II	1,20	1,50	1,35	$4\cdot10^{-4}$	$5\cdot10^{-4}$
III	1,15	1,44	1,30	$3\cdot10^{-3}$	$4\cdot10^{-3}$
IV	1,10	1,38	1,24	$5\cdot10^{-3}$	$6\cdot10^{-3}$

Для количественной оценки риска аварийной ситуации на гидротехническом сооружении использовалась зависимость, учитывающая вероятность превышения расчетного расхода, надежность пропускной способности водосбросных сооружений и техническое состояние сооружения:

$$\lambda_c = \frac{P\%}{100 K_Q K_t}, \quad (1)$$

где λ_c – риск возникновения аварийной ситуации на гидротехническом сооружении; P – вероятность превышения расчетного расхода, %; K_Q – коэффициент надежности при определении расчетного расхода; K_t – коэффициент работоспособности сооружения.

Коэффициент надежности K_Q определялся как отношение суммарной пропускной способности водосбросных сооружений к расчетному расходу соответствующей нормативной обеспеченности:

$$\mathrm{Kq} = \frac{Q}{Qp + \Delta \mathrm{Q}}, \quad (2)$$

где Q – суммарная пропускная способность водосбросных сооружений гидроузла, м³/с; Q_p – расчетный расход соответствующей обеспеченности, м³/с; ΔQ – ошибка определения расчетного расхода.

При наличии необходимых гидрологических данных ошибка определения расчетного расхода может быть найдена по зависимости

$$\Delta \mathrm{Q} = \mathrm{Qp}\ \mathrm{Kp}\ \frac{Cv}{\sqrt{N-1}}, \quad (3)$$

где Kp – коэффициент, учитывающий принятую обеспеченность расчетного расхода; C_v – коэффициент вариации максимальных расходов; N – продолжительность ряда гидрологических наблюдений, лет.

Коэффициент работоспособности сооружения определялся с учетом продолжительности эксплуатации объекта и нормативного срока службы:

$$K_t = 1 - \frac{t}{2T}, \quad (4)$$

где t – продолжительность эксплуатации сооружения, лет; T – нормативный срок службы, лет.

Для Шардаринского и Бугунского гидроузлов использовались расчетные расходы и их обеспеченности, приведенные в исходных проектных и технических материалах. Для Шардаринского гидроузла принята обеспеченность расчетного расхода P = 0,1%, для Бугунского – P = 0,5%. Продолжительность эксплуатации определялась от года ввода гидроузла в эксплуатацию до расчетного года исследования.

Результаты. На основании приведенных технических и гидрологических характеристик выполнена количественная оценка риска аварийных ситуаций для Шардаринского и Бугунского гидроузлов. В соответствии с принятой методикой расчет осуществлялся с учетом обеспеченности расчетного расхода, пропускной способности водосбросных сооружений и продолжительности эксплуатации гидротехнического сооружения.

Для Шардаринского гидроузла расчет риска выполнен при обеспеченности расчетного расхода P = 0,1%. Расчетный максимальный расход составляет Qp = 5413 м³/с, а суммарная пропускная способность водосбросных сооружений — 4160 м³/с. Коэффициент надежности пропускной способности определяется отношением фактической расчетной пропускной способности к расчетному расходу:

$$K_q = \frac{4160}{5413} = 0{,}7686.$$

В соответствии с принятой методикой коэффициент работоспособности сооружения составляет $K_t = 0{,}760$. Расчет ежегодного риска выполняется по зависимости

$$\lambda_c = \frac{P}{100 K_q K_t}.$$

После подстановки исходных значений получаем

$$\lambda_c = \frac{0.1}{100 \cdot 0{,}7686 \cdot 0{,}760} = 0{,}001712 \approx 0{,}0017.$$

Для Бугунского гидроузла расчет риска выполнен при обеспеченности расчетного расхода P = 0,5%. Расчетный расход составляет Qp = 184 м^3/с, а пропускная способность водосбросного сооружения – 90 м^3/с. Коэффициент надежности пропускной способности определяется следующим образом:

$$K_q = \frac{90}{184} = 0{,}4891.$$

Коэффициент работоспособности сооружения, принятый в соответствии с расчетной методикой, K_t = 0,785. Ежегодный риск аварийной ситуации определяется по зависимости

$$\lambda_c = \frac{P}{100 K_q K_t}.$$

Подставляя исходные значения, получаем

$$\lambda_c = \frac{0.5}{100 \cdot 0{,}4891 \cdot 0{,}785} = 0{,}01302 \approx 0{,}013.$$

Таблица 5 – Расчетные значения риска аварийной ситуации

Table 5 – Calculated values of accident risk

Показатели	Шардаринское водохранилище	Бугунское водохранилище
Класс ответственности	I	III
Год ввода в эксплуатацию	1966	1963
Обеспеченность P, %	0,1	0.5
Расчетный расход Qp, м^3/с	5413	184
Пропускная способность Q, м^3/с	4160	90
K_Q	0,7686	0,4891
K_t	0,760	0,785
$K_Q K_t$	0,5841	0,3839
λ_c, 1/год	0,001712	0,013022

Согласно таблице 5, уровень риска разрушения плотины Шардаринского водохранилища в её текущем техническом состоянии составляет *0,0017*, что превышает нормативное значение риска *0,001*.

Для Бугунского водохранилища рассчитанный уровень риска также превышает допустимое значение и равен *0,013*. В отношении Северного Аральского моря степень риска оказалась ниже предельного уровня, установленного для объектов *III класса ответственности,* что позволяет отнести его к *IV классу ответственности* по критериям нормативной документации.

Проектирование Коксарайского гидроузла осуществлялось с учётом изменившихся гидрологических условий региона, и для него уровень риска был принят соответствующий *I классу ответственности*, обеспечивая высокую степень надёжности.

1. Обеспечение безопасности гидротехнических сооружений. В бассейне реки Сырдария и её притоков расположены три крупных гидротехнических сооружения:

1) Шардаринское водохранилище, классифицированное как объект I класса ответственности;

2) Бугунское водохранилище, относящееся к объектам III класса ответственности;

3) Северное Аральское море, также имеющее статус объекта I класса ответственности.

Анализ показал, что разрушение плотины Шардаринского водохранилища может привести к катастрофическим последствиям, включая затопление города Кызылорды и множества других населённых пунктов, расположенных в пойме реки [15]. С целью повышения безопасности на Шардаринском водохранилище запланировано строительство дополнительного водосбросного сооружения с пропускной способностью *500 м^3/с,* а также обеспечение функционирования *Арнасайского катастрофического водосброса* на расходы до 1500 м^3/с. Реализация данных мероприятий позволит снизить степень риска до уровня, приближенного к нормативному значению – 0,0011.

Для *Бугунского водохранилища* предусмотрены капитальный ремонт затворов, реконструкция водосбросных сооружений и усиление парапетного ограждения. Это приведёт к снижению степени риска до 0,0108, что лишь незначительно превышает допустимый норматив.

В случае с *Северным Аральским морем*, согласно положениям «Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Сырдарии», предлагается строительство аварийной перемычки в заливе имени Шевченко. Этот проект позволит уменьшить степень риска до 0,0058 и предотвратить значительные последствия в случае разрушения всей плотины.

В целом по бассейну насчитывается 18 гидротехнических объектов, нуждающихся в реконструкции и капитальном ремонте. Для эффективного управления каскадом водохранилищ необходима современная система мониторинга, включающая:

– контроль формирования стока;

– наблюдение за техническим и гидрологическим состоянием сооружений;

– оперативную оценку риска на основе реальных данных.

В настоящее время количество функционирующих гидропостов недостаточно для надёжного контроля паводковых процессов. Необходимы восстановление системы метеостанций и гидрологических постов, а также модернизация контрольно-измерительных систем на сооружениях. Особое внимание следует уделить организации резервного энергоснабжения и созданию системы экстренного оповещения населения при возникновении чрезвычайных ситуаций.

2. Капитальные вложения в мероприятия по снижению риска. Объём требуемых капитальных вложений определяется на основе сопоставления фактической степени риска разрушения плотин (включая риск перелива и техническое состояние сооружений) с нормативными требованиями расчётной обеспеченности, регламентированными СНиП РК.

Обсуждение. Аварийные ситуации на гидротехнических узлах представляют собой серьёзную угрозу разрушения плотин и затопления территорий [21], расположенных в нижнем бьефе, вследствие образования волны прорыва. Воздействие этой волны на элементы инфраструктуры сравнимо с действием ударной волны, где основным разрушительным фактором выступает стремительное перемещение значительных объемов воды.

Разрушительное влияние волны прорыва обусловлено прежде всего высокой скоростью потока и перемещением водным потоком крупных масс, включая строительные элементы, валуны, древесину и прочие фрагменты, способные нанести дополнительные повреждения сооружениям и окружающей территории [21].

Согласно нормативному документу, действующему на территории Республики Казахстан, СНиП 3.04–01 2023 «Гидротехнические сооружения. Строительные нормы Республики Казахстан» при проектировании и оценке безопасности водохозяйственных объектов расчетные максимальные расходы воды определяются исходя из ежегодной вероятности превышения (обеспеченности). Показатели обеспеченности выбираются в зависимости от класса сооружения и устанавливаются для двух расчётных ситуаций – *основной и проверочной* (таблица 6) [8].

Таблица 6 – Ежегодная вероятность превышения Р, % расчетных максимальных расходов воды в зависимости от класса сооружения

Table 6 – Annual probability of exceeding P, % of the calculated maximum water flow rates depending on the class of the structure

Расчетный случай	Класс сооружений I	Класс сооружений II	Класс сооружений III	Класс сооружений IV
Основной	0,1	1,0	3,0	5,0
Проверочный	0,01*	0,1	0,5	1,0
*С учетом гарантийной поправки ΔQ% в соответствии со СНиП 2.01.14–83.				

Для разработки адаптированной методики экспертной оценки состояния гидротехнических сооружений в условиях Республики Казахстан требуется накопление достаточного объёма статистических данных **и** результатов технических обследований аналогичных объектов, что позволит обеспечить достоверность и применимость предложенных критериев.

В Российской Федерации на основе систематического анализа сведений о произошедших авариях были получены достоверные количественные показатели, отражающие особенности отказов плотин различных типов – грунтовых, бетонных, арочных и контрфорсных. На базе этих статистических данных разработаны методические принципы, позволяющие проводить оценку и прогнозирование риска аварийности гидротехнических сооружений. Однако при проектировании объектов III и IV классов расчётные параметры зачастую принимались с минимальными запасами, что снижало уровень общей безопасности сооружений. Это обусловлено как экономическими соображениями, так и отсутствием детализированных данных о гидрологических режимах конкретных водных объектов. В результате многие гидротехнические сооружения этих классов требуют проведения дополнительной оценки состояния и корректировки эксплуатационных режимов с целью обеспечения их надёжности и долговечности. Подобные упущения являются частыми причинами возникновения аварийных ситуаций [1]. Особенно критична эта проблема для грунтовых плотин, поскольку в случае несоответствия проектного водосбросного расхода фактическим значениям, установленным по нормированной обеспеченности, возможно возникновение переливов через гребень, что, как правило, приводит к полному разрушению сооружения [7].

В условиях отсутствия детальных инженерно-геологических изысканий и результатов технической диагностики отдельных элементов гидроузла оценка вероятности возникновения аварии выполнялась на основе двух ключевых параметров:

1. Коэффициент надёжности при определении расчётного расхода с заданной обеспеченностью.

2. Коэффициент технической надёжности гидротехнического сооружения.

Значение первого показателя определяется длиной наблюдательного ряда по водным расходам, величиной расчетной обеспеченности, классом гидротехнического сооружения в соответствии с СНиП 3.04-01-2023, а также сроком его эксплуатации без проведения капитального ремонта. Оценка проводилась по установленным эмпирическим зависимостям.

Проведены расчеты уровня безопасности для трёх водохранилищ: Шардаринского, Бугунского и Северного Аральского моря. Разрушение любого из них способно повлечь за собой значительные человеческие потери и масштабный экономический ущерб. Среди перечисленных объектов наибольшую потенциальную угрозу представляет возможное разрушение плотины Шардаринского водохранилища, так как в этом случае произойдёт затопление обширной территории в нижнем бьефе и более 50 населённых пунктов, включая город Кызылорду.

При оценке риска аварий водохранилищ максимально возможный расход воды определялся с учётом гарантированной поправки, представляющей собой сумму расчетного расхода при вероятности превышения $P = 0,1\%$ и возможной ошибки, связанной с данной обеспеченностью.

Анализ проводился по двум ключевым факторам:

– вероятности перелива воды через гребень плотины вследствие недостаточности гидрологических данных;

– степени физического износа элементов плотины и водосбросных сооружений в процессе длительной эксплуатации.

Анализ данных проводился с целью всесторонней оценки полученных результатов и выявления закономерностей исследуемого процесса. На первом этапе выполнены систематизация и обработка исходных данных, что позволило определить основные тенденции, диапазоны изменений и характер распределения исследуемых показателей. Далее были рассчитаны статистические характеристики, отражающие количественные и качественные особенности изучаемого объекта.

В ходе анализа установлены основные закономерности изменения показателей, определены причины выявленных различий и оценена их статистическая и практическая значимость. Полученные результаты позволили выявить существующие тенденции, определить наиболее существенные факторы воздействия и оценить эффективность рассматриваемых процессов и мероприятий.

Выводы. Согласно расчётам, выполненным проектным институтом «Казгипроводхоз» в рамках «Схемы комплексного использования и охраны водных ресурсов бассейна р. Сырдарии с притоками», ориентировочные капитальные затраты на капитальный и текущий ремонт межхозяйственных и хозяйственных водохранилищ и водозаборных узлов составляют:

общий объём финансирования – 3863,401 млн тенге, в том числе:

строительство дополнительного водосброса на Шардаринском водохранилище – 1600,24 млн тенге;

аварийная перемычка на плотине Северного Аральского моря – 402,888 млн тенге.

Реализация указанных мероприятий позволит значительно повысить надёжность эксплуатации гидротехнических сооружений и снизить потенциальные риски разрушения до нормативных уровней.

ЛИТЕРАТУРА

[1] СН РК 3.04-01-2023. Гидротехнические сооружения: строительные нормы Республики Казахстан. – 17 с.

[2] СП РК 3.04-101-2013. Гидротехнические сооружения: свод правил Республики Казахстан. – Астана, 2014. – 35 с.

[3] Стефанишин Д. В. Об оценке показателей безопасности и риска отказа плотин для установления нормативных уровней их надежности // Гидротехническое строительство. – 2010. – № 5. – С. 34-41.

[4] Стефанишин Д. В. Проблемы мониторинга и оценки безопасности гидротехнических сооружений в современных условиях. – М.: Энергоатомиздат, 2012. – 218 с.

[5] Заурбек А. К., Кипшакбаев Н. К. Водные ресурсы Казахстана: оценка, прогноз, управление – Алматы: КазНИИВХ, 2021. – 320 с.

[6] Мальковский И. М. Географические основы водообеспечения природно-хозяйственных систем Казахстана. – Алматы: Институт географии, 2018. – 204 с.

[7] ICOLD (International Commission on Large Dams). Dam Failures – Statistical Analysis: Bulletin 99. – Paris: ICOLD, 1995. – 72 p.

[8] Ахметов А. С., Муртазин Б. М. Анализ гидрологического режима реки Сырдария в условиях изменения климата / // Водное хозяйство Казахстана. – 2023. – № 2(94). – С. 12-18.

[9] Требования к безопасности гидротехнических сооружений: технический регламент: утв. постановлением Правительства Республики Казахстан от 12 января 2009 г. № 8. – Астана, 2009.

[10] Наводнения / Под ред. А. Б. Авакяна, Ю. Л. Воробьева, В. А. Осипова. – М.: Полиграфия, 2006. – 316 с. — (Безопасность России. Правовые, социально-экономические и научно-технические аспекты).

[11] Михайлов П. К., Кузнецова Е. В. Применение ГИС-технологий и данных дистанционного зондирования для мониторинга зон затопления // Геоинформационные системы в гидрологии и гидротехнике. – 2022. – № 4. – С. 45-52.

[12] Ресурсы речного стока Казахстана. Т. 1. Возобновляемые ресурсы поверхностных вод Республики Казахстан / Под ред. И. М. Мальковского. – Алматы, 2012. – 684 с.

[13] Розанов Н. Н. Гидротехнические сооружения. – М.: Стройиздат, 1985. – 432 с.

[14] Указ Президента Республики Казахстан от 1 ноября 2004 г. № 1466. Перечень водохозяйственных сооружений, имеющих особое стратегическое значение.

[15] Основные гидрологические характеристики рек Средней Азии и Казахстана / Под ред. В. В. Голубцова. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 420 с.

[16] Мелентьев П. В. Намывные земляные сооружения. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 288 с.

[17] Технический паспорт Шардаринского гидроузла. – Шардара: ГКП «Шардаринское водохранилище», 2022.

[18] Отчет о результатах обследования технического состояния гидротехнических сооружений Шардаринского водохранилища. – Алматы: ТОО «Институт “Казгипроводхоз”», 2021. – 84 с.

[19] Рябцев А. Д. Коксарайский контррегулятор как фактор обеспечения безопасности в низовьях Сырдарьи // Водное хозяйство Казахстана. – 2011. – № 1. – С. 5-11.

[20] Техническое заключение по анализу причин деформаций креплений верховых откосов плотин Бугунского гидроузла. – Шымкент: Южно-Казахстанское управление водного хозяйства, 1983. – 42 с.

[21] Заурбек А. К., Абдукаримова С. К. Оценка надежности и безопасности функционирования крупных гидротехнических сооружений Арало-Сырдарьинского водохозяйственного бассейна // Водное хозяйство Казахстана. – 2023. – № 3(95). – С. 14-22.

[22] Муртазин Е. Ж., Калшабеков Б. А. Совершенствование системы мониторинга и раннего предупреждения чрезвычайных ситуаций на водохранилищах Южного Казахстана // Водное хозяйство Казахстана. – 2024. – № 1(96). – С. 28-35.

[23] НДЦС РК 8.01-08-2022. Порядок определения сметной стоимости строительства в Республике Казахстан. – Астана, 2022.

[24] Волков В. И. Оценка надежности низконапорных гидротехнических сооружений при ограниченной гидрологической информации // Вестник КазНИТУ. – 2022. – № 5. – С. 88-94.

[25] СН РК 2.03-02-2012. Инженерная защита в зонах затопления и подтопления. – Астана, 2014. – 17 с.

[26] НДЦС РК 8.02-01-2025 Укрупнённые показатели стоимости строительства зданий и сооружений. Нормативы предельной стоимости строительства. – 170 с.

[27] Отчет о научно-исследовательской работе по разделу ТЭД «Экологическое оздоровление казахстанской части Приаралья». Раздел «Гидрологическая оценка р. Сырдари и Малого моря». – Алматы, 1993.

[28] Предварительное ТЭО «Комплекс сооружений по пропуску зимних расходов р. Сырдария». – Алматы, 2007.

[29] Программа бассейна Аральского моря. Проект «GEF», Компонент А1 / Национальная рабочая группа «Казахстан. – Алматы, 2001.

[30] Anderson M. J. An analysis of disparities within direct and indirect risk / M. J. Anderson // Risk Analysis. – 2024. – DOI: 10.1111/risa.17664 – URL: https://doi.org/10.1111/risa.17664

[31] Cimpianu, C. I., Mihu-Pintilie A., Stoleriu C. C. Managing flood hazard in a complex cross–border region using Sentinel–1 SAR and Sentinel–2 optical data: a case study from Prut River Basin (NE Romania) // Remote Sensing. – 2021. – Vol. 13, No. 23. – Art. 4934. – DOI: 10.3390/rs13234934 – URL: https://doi.org/10.3390/rs13234934

REFERENCES

[1] SP RK 3.04-01-2023. Hydraulic Structures: Construction Standards of the Republic of Kazakhstan. 17 p. (in Russ.).

[2] SP RK 3.04-101-2013. Hydraulic Structures: Code of Practice of the Republic of Kazakhstan. Astana, 2014. 35 p. (in Russ.).

[3] Stefanishin D. V. On the Assessment of Safety Indicators and Dam Failure Risk for Establishing Regulatory Levels of Their Reliability // Hydraulic Engineering. 2010. No. 5. P. 34-41 (in Russ.).

[4] Stefanishin D. V. Problems of Monitoring and Safety Assessment of Hydraulic Structures under Modern Conditions. Moscow: Energoatomizdat, 2012. 218 p. (in Russ.).

[5] Zaurbek A. K., Kipshakbayev N. K. Water Resources of Kazakhstan: Assessment, Forecasting, and Management. Almaty: KazNIIIVH, 2021. 320 p. (in Russ.).

[6] Malkovsky I. M. Geographical Foundations of Water Supply for Natural and Economic Systems of Kazakhstan. Almaty: Institute of Geography, 2018. 204 p. (in Russ.).

[7] ICOLD (International Commission on Large Dams). Dam Failures – Statistical Analysis: Bulletin 99. Paris: ICOLD, 1995. 72 p.

[8] Akhmetov A. S., Murtazin B. M. Analysis of the Hydrological Regime of the Syr Darya River under Climate Change Conditions // Water Management of Kazakhstan. 2023. No. 2(94). P. 12-18 (in Russ.).

[9] Requirements for the Safety of Hydraulic Structures: Technical Regulation: Approved by Resolution No. 8 of the Government of the Republic of Kazakhstan dated January 12, 2009. Astana, 2009 (in Russ.).

[10] Floods / Edited by A. B. Avakyan, Yu. L. Vorobyov, V. A. Osipov. Moscow: Poligrafiya, 2006. 316 p. (Safety of Russia. Legal, Socio-Economic and Scientific-Technical Aspects). (in Russ.).

[11] Mikhailov P. K., Kuznetsova E. V. Application of GIS Technologies and Remote Sensing Data for Monitoring Flooded Areas. // Geographic Information Systems in Hydrology and Hydraulic Engineering. 2022. No. 4. P. 45-52 (in Russ.).

[12] River Runoff Resources of Kazakhstan. Vol. 1. Renewable Surface Water Resources of the Republic of Kazakhstan / Edited by I. M. Malkovsky. Almaty, 2012. 684 p. (in Russ.).

[13] Rozanov N. N. Hydraulic Structures. Moscow: Stroyizdat, 1985. 432 p. (in Russ.).

[14] On the List of Water Management Facilities of Special Strategic Importance: Decree of the President of the Republic of Kazakhstan No. 1466 dated November 1, 2004 (in Russ.).

[15] Main Hydrological Characteristics of the Rivers of Central Asia and Kazakhstan / Edited by V. V. Golubtsov. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1980. 420 p. (in Russ.).

[16] Melentyev P. V. Hydraulic Fill Earth Structures. Moscow: Energoatomizdat, 1985. 288 p. (in Russ.).

[17] Technical Passport of the Shardara Hydraulic Complex. Shardara: Shardarinskoe Reservoir State Municipal Enterprise, 2022 (in Russ.).

[18] Report on the Results of the Technical Condition Survey of the Hydraulic Structures of the Shardara Reservoir. Almaty: «Institute “Kazgiprovodkhoz”» LLP, 2021. 84 p. (in Russ.).

[19] Ryabtsev A. D. The Koksaray Counter-Regulator as a Factor in Ensuring Safety in the Lower Syr Darya // Water Management of Kazakhstan. 2011. No. 1. P. 5-11 (in Russ.).

[20] Technical Report on the Analysis of the Causes of Deformation of the Upstream Slope Protection of the Dams of the Bugun Hydraulic Complex. Shymkent: South Kazakhstan Water Management Department, 1983. 42 p. (in Russ.).

[21] Zaurbek A. K., Abdukarimova S. K. Assessment of the Reliability and Safety of the Operation of Major Hydraulic Structures in the Aral-Syr Darya Water Management Basin // Water Management of Kazakhstan. – 2023. – No. 3(95). – P. 14-22 (in Russ.).

[22] Murtazin E. Zh., Kalshabekov B. A. Improvement of the Monitoring and Early Warning System for Emergencies at Reservoirs in Southern Kazakhstan // Water Management of Kazakhstan. 2024. No. 1(96). P. 28-35 (in Russ.).

[23] NDCS RK 8.01-08-2022. Procedure for Determining the Estimated Cost of Construction in the Republic of Kazakhstan. Astana, 2022 (in Russ.).

[24] Volkov V. I. Reliability Assessment of Low-Head Hydraulic Structures under Limited Hydrological Information // Bulletin of KazNITU. 2022. No. 5. P. 88-94 (in Russ.).

[25] SN RK 2.03-02-2012. Engineering Protection in Flood and Waterlogging Zones. – Astana, 2014. – 17 p.

[26] NDCS RK 8.02-01-2025. Enlarged Construction Cost Indicators for Buildings and Structures. Maximum Construction Cost Standards. 170 p. (in Russ.).

[27] Research Report on the TED Section “Environmental Rehabilitation of the Kazakh Part of the Aral Sea Region”. Section “Hydrological Assessment of the Syr Darya River and the Small Aral Sea”. Almaty, 1993 (in Russ.).

[28] Preliminary Feasibility Study “Complex of Structures for Conveying Winter Flows of the Syr Darya River”. Almaty, 2007 (in Russ.).

[29] Aral Sea Basin Program. GEF Project, Component A1. National Working Group “Kazakhstan”; Production Cooperative “Institute Kazgiprovodkhoz”. Almaty, 2001 (in Russ.).

[30] Anderson, M. J. An Analysis of Disparities within Direct and Indirect Risk / M. J. Anderson // Risk Analysis. 2024. DOI: 10.1111/risa.17664 – URL: https://doi.org/10.1111/risa.17664.

[31] Cimpianu C. I., Mihu-Pintilie A., Stoleriu C. C. Managing Flood Hazard in a Complex Cross-Border Region Using Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 Optical Data: A Case Study from Prut River Basin (NE Romania) // Remote Sensing. 2021. Vol. 13, No. 23. Art. 4934. DOI: 10.3390/rs13234934 – URL: https://doi.org/10.3390/rs13234934

Б. С. Ботантаева[1], А. Р. Вагапова[*2], К. Е. Калиева[3]

[1] Т. ғ. к., қауым.профессор (Л. Б. Гончарова атындағы Қазақ автомобиль-жол институты, Алматы, Қазақстан; *botantaeva_b@mail.ru*)
[2 *]Т. ғ. к., қауым.профессор (Қ. И. Сатбаев атындағы Қазақұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; ***vagapova-alina@rambler.ru***)
[3] PhD докторы,аға оқытушы (Қазақ ұлттық аграрлық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан; *karla_3@mail.ru*)

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫНЫҢ АУМАҒЫНДАҒЫ АРАЛО-СЫРДАРИЯ АЛАБЫНДАҒЫ СУ ҚОЙМАЛАРЫНЫҢ ҚИРАУ ҚАУІППІН АЗАЙТУ

Аннотация. Бұл зерттеу Арал-Сырдария су бассейніндегі су қоймаларының бұзылу қаупін төмендету мәселесін қарастырады. Жобаның мақсаты – Шардара бөгетінің сенімді әрі қауіпсіз жұмысын қамтамасыз ету. ҚНжЕ 3.04–01–2023 «Гидротехникалық құрылыстар» [1] нормасына сәйкес, судың есептік ең жоғары шығыны құрылыстың санатына қарай жыл сайынғы асып кету ықтималдығына негізделіп, негізгі және тексеру есептері үшін жеке-жеке анықталады. Мақалада апаттық жағдайлар қаупін бағалау бойынша әдістемелік тәсілдер ұсынылған. Қазақстан Республикасындағы гидротехникалық нысандардың апат қаупін бағалау кезінде Д. В. Стефанишин ұсынған тәуекел критерийлері бойынша бөгеттердің қауіпсіздігін бағалау әдістері қолданылды [3, 4]. Мақалада гидротехникалық жүйелердің қауіпсіздігін арттыруға бағытталған ұйымдастыру-техникалық іс-шаралар мен апаттардың алдын алуға қажетті инвестициялық шығындар қарастырылған. Қазақстанда күрделі жөндеуді және қайта құруды қажет ететін 18 нысан анықталған. Сырдария өзенінің су қоймаларын тиімді басқару үшін ағынның қалыптасу процесіне және нысандардағы техникалық, гидрологиялық көрсеткіштерге бақылау жүргізетін заманауи бақылау жүйесін енгізу қажет. Жеткілікті деректерді жинау үшін метеостанциялар мен гидропосттар жүйесін қалпына келтіру, сондай-ақ бақылау-өлшеу құрылғыларын жаңғырту мен жаңаларын орнату, қосалқы энергия көздерімен жабдықтау және төтенше жағдай кезінде халықты ескерту жүйелерін қамтамасыз ету қажет.

Түйін сөздер: су қоймасы, гидротехникалық құрылыстар, су тасқыны, ГТҚ қауіпсіздігін бағалау, ГТҚ жойылу қаупі, ГТҚ апаттары, өзен бассейні

B. S. Botantayeva[1], A. R. Vagapova[*2], K. Ye. Kaliyeva[3]

[1] Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Kazakh Automobile and Road Institute named after L. B. Goncharov, Almaty, Kazakhstan; *botantaeva_b@mail.ru*)
[2 *]Candidate of Technical Sciences, Associate Professor (Kazakh National Research Technical University named after K. I. Satbayev, Almaty, Kazakhstan; ***vagapova-alina@rambler.ru***)
[3] PhD (Kazakh National Agrarian Research Uuniversity, Almaty, Kazakhstan; *karla_3@mail.ru*)

REDUCING THE RISK OF RESERVOIR DESTRUCTION IN THE ARALO-SYRDARYA BASIN OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

Abstract. This paper explores ways to reduce the risk of structural failure of reservoirs located in the Aral–Syrdarya basin. The project is aimed at strengthening the safety and reliability of the Shardara Dam. According to the regulatory document SN 3.04–01–2023 “Hydraulic structures. Construction Norms of the Republic of Kazakhstan” [1], peak design discharges must be based on the annual probability of exceedance, determined by the structure class, and calculated for two separate cases: main and verification. The article introduces a methodology for assessing accident risks. In the context of Kazakhstan, the assessment relied on the approaches developed by D. V. Stefanishin, who proposed evaluating dam safety using risk–based criteria [3, 4]. The article outlines technical and organizational measures to improve the reliability of hydraulic systems, as well as estimates the investment required to reduce the probability of dam failure. Across Kazakhstan, 18 hydraulic structures have been identified as needing major repair or reconstruction. Efficient management of the reservoir cascade along the Syr Darya River requires a modern monitoring system to track runoff formation and control hydrological and technical parameters at key sites. To build a reliable data base, it is necessary to restore the network of meteorological stations and hydrological posts, upgrade and install new measuring devices at hydraulic facilities, ensure backup power sources for hydraulic units, and provide emergency warning systems for the public.

Key words: reservoir, hydraulic structures, flooding, safety, structural failure risk, accidents, river basin.