

Раздел 4. Экологическая безопасность

УДК. 556.18 + 626/627

ВЫБОР МЕТОДА ОЦЕНКИ УСТОЙЧИВОСТИ СИСТЕМ ВОДОСНАБЖЕНИЯ С ВОДОХРАНИЛИЩАМИ ЕСТЕСТВЕННОГО СТОКА КРЫМСКОГО ПОЛУОСТРОВАНиколенко И.В.¹, Мельникова Н.С.², Каримов Э.А.³^{1,2} ФГАОУ ВО «Крымский федеральный университет им В.И. Вернадского»,

Институт «Академия строительства и архитектуры»,

295493, Республика Крым, г. Симферополь, улица Киевская, 181.

¹ e-mail: nikoshi@mail.ru³ Симферопольский филиал ГБУ РК «Крыммелиоводхоз»³ e-mail: karimov_ervin@mail.ru

Аннотация. Представлены подходы к оценке устойчивости систем водоснабжения как условий отсутствия перебоев в подаче воды требуемого качества потребителям с обеспечением эксплуатационного уровня количественных параметров по напорам и подаче. Выполнен сравнительный анализ свойств надежности и устойчивости сложных технических систем. В статье проведена оценка устойчивости систем водоснабжения двух городов Республики Крым с водохранилищами естественного на основе экспертной балльно-индексной системы для двух периодов: засушливый (2020) и водообильный (2022). Определены классы устойчивости водохранилищ, обеспечивающих водой эти города. Проанализированы основные причины потери устойчивости систем водоснабжения. Представлены факторы обеспечения устойчивости систем водоснабжения, которые являются важным аспектом обеспечения безопасного, надежного и эффективного функционирования этих систем.

Предмет исследования. Физико-географические, морфометрические и гидрологические признаки водохранилищ естественного стока Крымского полуострова, как факторы влияющие на устойчивость системы водоснабжения

Материалы и методы. Выполнен анализ методик определения устойчивости, сбор и обработка основных гидрологических данных водохранилищ естественного стока Крымского полуострова. Проведен анализ условий потери устойчивости систем водоснабжения.

Результаты. Определены условия потери устойчивости систем водоснабжения, которые связаны с состоянием водных объектов с учетом внешних воздействий, а также установлены факторы обеспечения устойчивости систем водоснабжения.

Выводы. Обеспечение устойчивости систем водоснабжения является сложным и многофакторным процессом, требующим комплексного подхода. Результаты исследования показывают, что балльно-индексную методику можно использовать для общей оценки экологического состояния водных объектов, но она не является универсальным инструментом для анализа систем водоснабжения. Эта методика дает лишь приблизительные данные и не дает полной картины состояния системы. Для получения более точных результатов необходимо проводить детальный анализ системы водоснабжения с учетом общей оценки состояния водных объектов и учитывать все факторы, влияющие на устойчивость системы, а также проводить регулярный мониторинг, контроль качества воды и источников водоснабжения, чтобы своевременно выявлять и устранять возможные проблемы. Только при учете всех факторов и проведении регулярных мероприятий по контролю и мониторингу можно гарантировать безопасность и надежность систем водоснабжения для населения и окружающей среды.

Ключевые слова: устойчивость, система водоснабжения, меры по повышению устойчивости, балльно-индексный метод, оценка устойчивости, класс устойчивости.

ВВЕДЕНИЕ

Возможности потребления человечеством запасов пресной воды ограничиваются природно-климатическими, антропогенными, техническими, экономическими и многими другими факторами. Увеличение численности населения, изменения социально-бытовых условий и стиля жизни, тенденции развития мировой экономики, сопутствующие этому изменения климата, увеличение антропогенной нагрузки на экосистемы и природные водные объекты, являются причинами ограничений по объемам потребления воды в некоторых регионах мира. Дефицит водных ресурсов, особенно пресной воды, является глобальной мировой проблемой, которая становится одним из современных вызовов человечеству [1, 2]. Перспектива глобального потепления, вызванного накоплением в атмосфере

углекислого газа и других поглощающих тепло газов, вводит в общемировую водную систему новые неуправляемые факторы. Современные тенденции по увеличению периода наблюдений и учету влияния дополнительных факторов, которые ранее не наблюдались или не учитывались, приводит к изменениям представлений о стационарности природно-климатических процессов как основополагающей концепции, согласно которой гидрологические системы изменяются и колеблются в пределах известного набора границ на основе многолетних наблюдений [3, 4].

В некоторых регионах Российской Федерации в маловодные периоды возникает дефицит водных ресурсов, который оказывает существенное влияние на режимы хозяйственно-бытового водоснабжения [5]. В эти периоды возникновение дефицита обусловлено следующими причинами: неравномерностью распределения водных ресурсов

по территории страны и ее регионов, ограниченностью регулирующих возможностей водохранилищ для удовлетворения ресурсной потребности всех видов потребителей, нерациональное использование водных ресурсов, в том числе в результате применения экстенсивных методов водопользования, а также отсутствием комплексности и системности в использовании водных ресурсов на отдельных водохозяйственных участках [3, 6, 7]. Также для многих регионов России могут быть неблагоприятными для водопользования изменения режима осадков, обусловленные природно-климатическими и антропогенными факторами. Увеличение неравномерности выпадения осадков означает одновременное усиление угрозы, как наводнений, так и засух в некоторых регионах страны, что существенно влияет на устойчивость систем водоснабжения (СВ) [5].

К регионам России с дефицитом водных ресурсов относится Крымский полуостров что обусловлено природно-климатическими условиями, отсутствием крупных природных источников воды, а также экстенсивными методами водопользования. Поэтому проблема водоснабжения для Крыма является актуальной на протяжении нескольких тысячелетий. В 2020 и 2021 годах регион столкнулся с серьезной проблемой нехватки пресной, в том числе и питьевой воды. В результате, в этот период, часть населенных пунктов Крыма были переведены на график подачи воды, а в крупных водоемких городах была прекращена централизованная подача горячей воды. [3, 8].

Дефицит водных ресурсов является одной из экзистенциальных угроз национальной безопасности стран и их регионов, так как, вода является ресурсом, без которого человек не может жить, обеспечить сельскохозяйственное и промышленное производство, а также экологическую безопасность регионов проживания. Поэтому необходимо оценивать степень обеспечения качественного и устойчивого функционирования СВ, которые представляют собой сложный комплекс взаимосвязанных инженерных устройств и сооружений, обеспечивающих потребителей водой заданного качества в требуемом количестве и при необходимых напорах. СВ предназначены для забора воды из природных источников, ее очистки и бесперебойную подачу потребителям. Поведение такой системы характеризуется открытостью, изменчивостью и стохастичностью, в виду действия различных объективных и субъективных факторов. Под устойчивой работой СВ понимается бесперебойная подача воды потребителям с ее поддержанием в работоспособном состоянии при обеспечении количественных показателей давления и расхода на конструкциях подачи и распределения воды, а также качественных показателей в соответствии с требованиями действующих нормативных документов. Для повышения

надежности СВ и возможности выполнения ремонтных работ коммуникаций, оборудования сооружений они проектируются и эксплуатируются таким образом, чтобы при выходе из строя каких-либо элементов системы их можно было отключить, не нарушая функционирования всей системы. Для этих целей в СВ предусматривают определенное количество резервных агрегатов, переключений и перемычек, позволяющих подавать воду в любой напорный трубопровод и отключать поврежденные сооружения и линии.

Устойчивость СВ во многих научных исследованиях и на практике принимается как условия отсутствия перебоев в подаче воды требуемого качества потребителям с обеспечением эксплуатационного уровня количественных параметров на сооружениях подачи и распределения воды по давлению и расходу [9 -12]. Одно из определений устойчивости СВ представлено как ее способность сохранять свою целостность и установленный режим деятельности с обеспечением оптимального общесистемного параметра по качеству воды при заданной подаче и напоре, для конкретного количества потребителей и времени, в течение которого допускаются перебои в их снабжении водой [9]. В работе [10] предложен комплексный подход к оценке устойчивости работы объектов СВ и предложена процедура вычисления минимально допустимых значений параметров надежности при снижении потребителю подачи воды и напора по сравнению с их расчетными значениями. Принципы устойчивой и надежной работы сооружений при реконструкции объектов СВ рассмотрены в работе [11], а в условиях сокращения водопотребления в работе [12]. Несмотря на эти известные представления, проблема трактовки понятия «устойчивость СВ», вместе с полным описанием его характеристик, остается не полностью установленной. На качество функционирования СВ и их устойчивость существенное влияние оказывает большое количество факторов, в том числе параметры и временные характеристики источников водоснабжения. К примеру, обеспечение высоких показателей надежности СВ и всех ее элементов: водозаборов, сооружений очистки, подачи и распределения, при дефиците воды в источниках водоснабжения либо при существенном изменении ее показателей качества не могут обеспечить устойчивость СВ и требует принятия специальных дополнительных технических, технологических и организационных решений. Рассмотрение устойчивости всей СВ должно быть основано на том, что теоретический анализ в принципе не может быть ограничен одним каким-то типом связей между элементами, например, движением воды в трубопроводах или надежностью силовых агрегатов насосных станций. В пределе анализ устойчивости СВ должен охватить всю совокупность ее элементов: от источника водоснабжения – до водоразборного крана потребителя. Вопрос оценки влияния показателей и характеристик источников

водоснабжения на устойчивость СВ в некотором временном интервале остается малоисследованным.

Вопрос об устойчивости природных экосистем, в том числе водных является одним из важнейших и актуальных в современном мире. Научный интерес к оценке устойчивости и изменчивости природных экосистем различных уровней иерархии, их чувствительности к внешним воздействиям формировался во второй половине прошлого века. Методологические основы оценки устойчивости и экологического благополучия водных объектов связаны с решением проблемы количественного описания большого числа процессов, определяющих способность систем сохранять свои свойства неизменными, или возвращаться в исходное состояние после утраты его на некотором временном интервале.

Водные ресурсы являются частью глобальных систем природопользования, но используются и управляются они на местном и региональном уровнях, поэтому основное влияние на устойчивость СВ оказывают локальные системы управления [2, 5]. Сложность анализа устойчивости СВ состоит в том, что сохранение их свойств и режимов функционирования зависит как от влияния природно-климатических факторов, так и от антропогенных воздействий. Это требует учета и тех, и других в оценочных исследованиях. Кроме этого, успешность получения результата зависит от определения граничных состояний устойчивости СВ между классами исследуемых свойств по совокупности параметров. Для вододефицитных регионов проблемы обеспечения устойчивости СВ являются особо важными и актуальными. Поэтому в данной работе рассмотрены основные подходы по решению проблем устойчивости СВ с учетом основных характеристик водных ресурсов Крыма.

ОБЗОР И АНАЛИЗ ПУБЛИКАЦИЙ

Понятие «устойчивость» является одним из основных в науке и технике, так как определяет характеристики одной из главных форм поведения различных сложных систем, в том числе управляемых, физических, социально-экономических, экологических и др. Устойчивость используется для описания стабильности системы, процесса или последовательности их состояний, как свойства и способности противостоять внешним естественным и антропогенным воздействиям, а также внутренним процессам, которые нарушают структуру и нормальное функционирование как всей системы или процесса, так и отдельных их частей в течении определенного отрезка времени. Устойчивость системы рассматривается как два ее взаимосвязанных свойства:

- возможность системы сопротивляться действиям внешней среды и работать в нормальном режиме с заданными допустимыми отклонениями;
- способность процесса возвращаться к исходному состоянию после прекращения воздействия, которое нарушило это состояние.

В технических системах свойство «устойчивость» является ближайшим пересечением со свойством «надёжность», как качество, развернутое во времени. Надёжность – свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования. Поэтому надёжность объекта является комплексным свойством, её оценивают по четырём показателям – безотказности, долговечности, ремонтпригодности и сохраняемости или по сочетанию этих свойств в виде комплексных показателей. Надёжность является одной из важнейших характеристик технических систем, которые учитываются на этапах разработки, проектирования и эксплуатации самых различных технических систем. Большая часть понятий, свойств и показателей, связанных с надёжностью систем стандартизированы и имеют однозначные представления. Предметом исследований надёжности являются изучение причин, вызывающих отказы систем, нарушающих работоспособное состояние, определение закономерностей, которым они подчиняются, разработка способов контроля параметров и характеристик, методов расчётов и испытаний, изыскание путей и средств повышения надёжности.

Для технических систем часть понятий, свойств и показателей устойчивости имеют однозначные представления в основном для простых систем, а формально стандартизированы только для отдельных сфер исследований, и находятся в непрерывной стадии развития. При сохранении, поддержании и восстановлении работоспособного состояния техническая система является устойчивой, но при выходе из работоспособного состояния – система теряет устойчивость. При этом потеря устойчивости может обнаружиться как во времени, так и по параметрам функционирования и в пространстве. Поэтому показатели надёжности технических систем позволяют только оценить вероятность устойчивой работы.

Определение главных понятий теории устойчивости для механических систем, получившее широкое признание, представил русский ученый А.М. Ляпунов в конце 19-го века. Согласно его представлению, линия движения (развития) может называться устойчивой только при следующих условиях: система не выйдет за пределы промежутка константности, при определенных ограничениях колебаний, указанных исходя из малого предельного отклонения. Для обеспечения устойчивости определяются ограничения для возмущений, при которых система не выйдет из зоны константности. Противоположность устойчивости — нестабильность. По мнению А. М. Ляпунова, она направлена на определении возмущений, когда

изначально небольшие различия впоследствии могут привести к серьезным расхождениям. Прослеживается обратно пропорциональная зависимость: чем серьезнее воздействие возмущающих факторов, тем труднее сохранить нужные свойства устойчивости.

Теория устойчивости движения, после А.М. Ляпунова применялась в разных сферах деятельности аналитически и практически по разным направлениям усилиями многих исследователей. Выяснялись условия устойчивости при больших начальных и постоянно действующих возмущениях, на конечном промежутке времени, при случайных воздействиях и т.д. Исследования систем на устойчивость в общем виде представляются как решения двух основных задач на определенном временном интервале функционирования.:

- оценка устойчивости системы при заданном значении параметров, то есть определение значений параметров, которые приводят к нарушению работоспособности;

- определение диапазонов изменения параметров системы, которые не нарушают ее устойчивость.

Устойчивость движения по Пуассону предполагает, что соответствующая фазовая траектория параметров при времени процесса $t \rightarrow \infty$

не покидает ограниченной области фазового пространства. Находясь в этой области бесконечно долго, она неизбежно будет возвращаться в сколь угодно малую область нахождения начальной точки. Время возврата может соответствовать периоду или квазипериоду при регулярном движении и представляет собой случайную последовательность, если решение соответствует режиму динамического хаоса. Фактически стационарное состояние называется устойчивым, если небольшие отклонения не выводят систему слишком далеко из области этого стационарного состояния. Стационарное состояние называется асимптотически устойчивым, если малые отклонения от него со временем затухают. Стационарное состояние называется неустойчивым, если малые отклонения со временем увеличиваются. Иногда используют менее строгий критерий, понимая устойчивость как ограниченность решения сверху и снизу, то есть устойчивость по Лагранжу. Для экосистем, представленных неограниченным числом постоянно меняющихся во времени процессов, этот вид устойчивости может быть наиболее характерным. Наглядная иллюстрация устойчивости по Лагранжу, Пуассону и Ляпунову приведена на рис. 1.

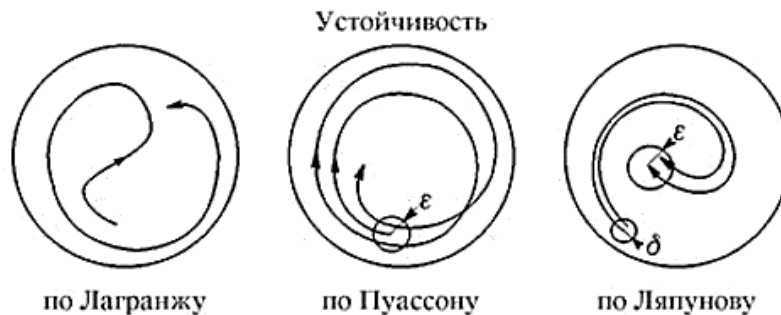


Рис. 1 Иллюстрация устойчивости по Лагранжу (траектория остается в замкнутой области), по Пуассону (траектория многократно возвращается в ϵ -область начальной точки) и по Ляпунову (две близкие на старте траектории всегда остаются близкими).

Fig. 1 Illustration of Lagrangian stability (the trajectory remains in a closed region), Poisson stability (the trajectory repeatedly returns to the ϵ -region of the starting point) and Lyapunov stability (two trajectories close at the start always remain close).

Для оценки устойчивости сложной технической или природной системы необходимо четко определить условия, действующих на нее внешних и внутренних факторов, постоянство каких ее свойств и диапазона параметров, существенно и в какой мере. Следует также охарактеризовать внешние факторы, а также область допустимых их изменений относительно которых система будет считаться неизменной. В качестве примеров потери устойчивости СВ можно привести условия:

- повышение давления в водопроводной сети выше установленного значения приводит к многочисленным повреждениям и авариям на локальных участках;

- увеличение мутности исходной воды в паводковый период вне "проектной зоны" очистных сооружений вызывает нарушение технологического

процесса ее очистки и инициирует перевод системы водоснабжения на другой источник или режим работы;

- отсутствие заданного уровня воды в источнике водоснабжения.

Подходы к анализу устойчивости СВ на основе системного анализа сформулированы в работе Василенко С.Л., в которых предложено рассматривать всю топологическую совокупность элементов применительно к данной системе: от источника водоснабжения – до потребителя [9]. Под системой обычно понимается объект, который можно определенным образом разделить на взаимодействующие и взаимосвязанные между собой элементы - подсистемы. То есть системой называется некоторая целостность и совокупность элементов, находящихся в определенных связях и

отношениях друг с другом и с внешней средой. С учетом такого подхода, устойчивость СВ – способность системы сохранять свою целостность и режим функционирования, когда количество потребителей и время, в течение которого они не обеспечиваются водой нормативного качества в нужном количестве, не превышают заданной величины отклонения параметров.

Обеспечение устойчивости СВ предусматривает снабжение водой нормативного качества, объема и напора, в том числе и в чрезвычайных ситуациях и условиях, с возможным переводом на другой режим функционирования. Это соответствует общему принципу Ле-Шателье-Брауна: при внешнем воздействии, выводящем систему из состояния устойчивого равновесия, равновесие смещается в сторону противодействия изменению, то есть в направлении, при котором эффект внешнего воздействия ослабляется. Сложность анализа устойчивости СВ состоит в том, что сохранение либо нарушение их свойств и режимов может быть вызвано как естественными причинами, так и антропогенным воздействием. Это требует учета и тех, и других в оценочных исследованиях.

Проблема оценки устойчивости экосистем и входящих в их состав подсистем – одна из важнейших в современной экологии. В работах А.Д. Арманд, В. В. Дмитриева, Примака Е.А., Пузаченко Ю.Г., Светлосанова В.А., Снакина В.В., Фрумина Г.Т. рассматривались методы оценки устойчивости экосистем, в том числе водных объектов и к настоящему времени в литературе накопилось достаточно большое количество различных, часто противоречивых представлений о стабильности и устойчивости экосистем [13 - 19]. Широкий перечень понятий, связанных с устойчивостью водных систем приводится в работах В.В. Дмитриева [14] и Г.Т. Фрумина [19]. Общим для всех подходов анализа проблемы устойчивости экосистем является: наличие природной экосистемы, обладающей определенной структурой и наличие воздействий как природного, так и антропогенного характера, стремящихся либо вывести экосистему из определенных областей, считающихся устойчивыми, либо воздействовать на параметры экосистемы, тем самым в определенных случаях изменяя структуру последней, что тоже соответствует неустойчивости экосистемы [14, 17].

Методологические основы оценки устойчивости и экологического благополучия водных объектов связаны с решением проблемы количественного описания большого числа процессов, определяющих способность систем сохранять свои свойства неизменными, или возвращаться в исходное состояние после утраты его на некотором временном интервале [13, 16]. Следует отметить, что в настоящее время в практике водопользования отсутствует единый, общепринятый метод интегральной оценки неаддитивных свойств экологических систем: устойчивости, экологического благополучия водоема и др.

Работы, по количественной оценке, устойчивости природных экосистем условно разбиты на несколько групп [14, 17]. На основе применения классической теории устойчивости строятся модели природных экосистем с использованием систем дифференциальных уравнений, с последующим изучением устойчивости таких модельных систем к различного рода возмущениям. На таких моделях применяются разработанные в математике различные методы. Основной сложностью применения таких моделей природных экосистем является трудности создания достаточно адекватной действительности математической модели. Для количественной оценки устойчивости природных экосистем также применяется поиск и исследование характеристики, которая адекватно отображает устойчивость всей системы в целом. Несмотря на простоту оценки устойчивости по такой характеристике, основной сложностью является обоснование соответствия и правильности ее выбора для описания устойчивости всей природной экосистемы, а также возможная неоднозначность получаемых решений. Возможен подход, который является синтезом двух рассмотренных, который заключается в следующем: составляется и исследуется устойчивость математической модели в виде системы дифференциальных уравнений, в результате модельных исследований природной экосистемы из ее параметров формируется характеристика, которая адекватно отображает устойчивость изучаемой системы.

Разработка различных методик оценки устойчивости базируется также на более простых индикаторных подходах и индексах состояния, устойчивости, а также моделях-классификациях, подавляющее большинство которых построено на балльном или балльно-индексном подходе [20]. Ценность этих исследований в том, что в них выделяются основные параметры оценки устойчивости, а также предлагаются оценочные шкалы и обозначается весомость отдельных критериев оценивания. Это обуславливает необходимость поиска приемов и разработки методов интегральной оценки неаддитивных свойств сложных природных систем. Под уязвимостью водной экосистемы при индикаторном подходе понимается ее неспособность сохранять квазипостоянными свои свойства и параметры режимов в условиях, действующих на нее внешних и внутренних нагрузок. Устойчивой водной экосистемой, подверженной действиям внешних и (или) внутренних воздействий, называется ее способность сохранить свои свойства и внутренние структурные связи, а также находиться внутри области устойчивого состояния на определенном временном интервале функционирования.

При оценке устойчивости водных объектов необходимо учитывать режимы их функционирования, так как они обуславливаются разными процессами и природными механизмами. Устойчивость водных систем циклического типа, к

которым относятся водохранилища, слабопроточные водоемы, озера, пруды, называется “*адаптационной*”, так как основным свойством такого водного объекта является его способность сохранять исходное состояние или плавно переходить в другое состояние, сохраняя при этом внутренние связи. Устойчивость водных систем циклического типа достигается физико-механическими и химическими процессами переноса, разбавления, сорбции, а также миграции веществ.

Устойчивость водных объектов транзитного типа, к которым относятся реки, сильно проточные водоемы, называется “*регенерационной*”, так как важнейшим их свойством является способность многократно восстанавливать свои свойства, возвращаясь в исходное состояние после временного внешнего воздействия. Устойчивость водных экосистем транзитного типа достигается способностью адаптации к воздействиям, как в результате внутренней сопротивляемости под влиянием внешних воздействий, так и за счет способности к биохимическому разложению токсичных соединений и изменению удельных скоростей обменных процессов в экосистеме.

Как указывалось, выше, для оценки устойчивости и уязвимости водных объектов к изменению параметров и режимов функционирования применяются подходы на основе балльно-индексного метода, в основу которого были положены различные классификации А.М. Владимирова, В.В. Снакина, А.Л. Ресина, В.В. Дмитриева и др [15]. Для оценки параметров уязвимости и устойчивости водных экосистем объединены в экспертную балльно-индексную систему, которая учитывает региональные особенности водных объектов и дает возможность в пределах изменения заложенных в них параметров, провести сравнительную оценку уязвимости водных экосистем к воздействию. Если свойства водного объекта различаются по пространству и это дает основание говорить о физико-географическом, гидрологическом, гидрохимическом и гидробиологическом районировании в пределах определенной территории (акватории), то можно провести зонирование водосборной территории или акватории водоема по баллам уязвимости (устойчивости) и выделить наиболее уязвимые и устойчивые его районы.

Методика интегральной оценки устойчивости водоемов к изменению параметров естественного и антропогенного режимов детально разработана в работе Примак Е.А, в которая позволяет выполнить количественную интегральную оценка устойчивости к изменению параметров естественного и антропогенного режимов [15]. Оценки применяются для нахождения количественных значений свойств при анализе экспериментальных данных, а также на этапе построения моделей при определении численных

значений существенных параметров модели, которые численно определяются по экспериментальным данным и статистическими методами. В этом случае речь идет об оценке параметров моделей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Балльно-индексные системы оценки, с одной стороны содержат, как правило хорошую базу оценочных, квалиметрических шкал, целесообразных для многокритериальных интегральных оценок, с другой - в балльно-индексных подходах данные шкалы не используются в явной форме. В них натуральному значению характеристик соответствует определенное количество баллов, учитываемых на последующих стадиях оценочных построений.

Применим методику балльно-индексных построений на примере оценки уязвимости водоемов [15]. Уязвимые водные экосистемы могут быстро деградировать под воздействием техногенных и антропогенных факторов, теряя свои уникальные природные характеристики. Слабо уязвимые экосистемы могут долго противостоять внешним воздействиям, которые проявляются в изменениях параметров водного объекта, что делает их устойчивыми к внешним нагрузкам и воздействиям. Однако, устойчивость не всегда указывает на экологическое благополучие, хотя уязвимость и стабильность водной экосистемы можно учитывать при оценке ее качества [15].

Оценка уязвимости и/или устойчивости экосистемы к изменению ее свойств является результатом учета большого числа параметров, которые определяют физико-географические и климатические условия экосистемы, а также характер антропогенного влияния. Для проведения оценки используются специальные таблицы, в которых указаны индексы, разряды и баллы для каждого признака оценивания. Последовательное суммирование индексов, разрядов и баллов позволяет получить суммарную балльную оценку водоема. На основе этой оценки определяется класс и подкласс его уязвимости. Класс уязвимости водоема зависит от суммы индексов, разрядов и баллов. Подкласс характеризует степень уязвимости и определяется на основе сочетания различных факторов, таких как качество воды, трофность, антропогенная нагрузка и т.д.

Балльно-индексный метод является рекогносцировочным этапом, который необходим для определения параметров оценки и построения оценочной шкалы. Он помогает определить результаты оценки, но часто не может объективно оценить устойчивость водного объекта.

Для того чтобы наглядно показать ответную реакцию водоемов на воздействующие на него антропогенные изменения, были выбраны 2 периода для оценки параметров водохранилищ естественного стока и их устойчивости: 2020 г. – засушливый; и 2022 г. – водообильный. Для оценки

были выбраны три водохранилища, обеспечивающие водой г. Симферополь, — Аянское, Партизанское и Симферопольское, а также водохранилища для водоснабжения Большой Алушты – Изобильненское, Кутузовское.

В засушливый период (2020 г.) водохранилища естественного стока, обеспечивающие г. Симферополь и г. Алушта:

– по физико-географическим и морфометрическим признакам относятся к 11 разряду;

– по первой группе гидрологических признаков (уровневый и температурный режимы) относятся ко 2 разряду, кроме Кутузовского (1 разряд);

– по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена) относятся к 3 разряду, кроме Изобильненского (2 разряд);

– водохранилища естественного стока Крымского полуострова соответствуют II классу качества воды.

Семейство уязвимости – IIIA. Класс водоема обозначен римской цифрой, он отражает физико-географические особенности водоема. Подкласс водоема обозначен заглавными буквами «А» и «Б», он отражает оптимальность условий формирования водности и качества воды. Оптимальными условиями являются не экстремальные условия, для которых сумма разрядов может быть наименьшей («А»), а наиболее благоприятные для формирования водности и качества воды промежуточные условия

(«Б»). Водоемы с благоприятными условиями формирования будут считаться менее уязвимыми по сравнению с водоемами с неблагоприятными условиями. На основании суммы баллов по семейству уязвимости и роду уязвимости по качеству воды получаем, что водохранилища естественного стока относятся к III классу уязвимости, следовательно, обладают средней устойчивостью к изменению параметров естественного и антропогенного режимов.

В водообильный период (2022 г.) водохранилища естественного стока, обеспечивающие г. Симферополь и г. Алушта:

– по физико-географическим и морфометрическим признакам относятся к 11 разряду;

– по первой группе гидрологических признаков (уровневый и температурный режимы) относятся к 1 разряду, кроме Изобильненского (2 разряд);

– по второй группе гидрологических признаков (условия водообмена) относятся к 3 разряду, кроме Изобильненского (2 разряд);

– вода соответствует II классу качества воды.

Семейство уязвимости – IIIA. На основании суммы баллов по семейству уязвимости и роду уязвимости по качеству воды получаем, что водохранилища естественного стока относятся к III классу уязвимости, следовательно, обладают средней устойчивостью к изменению параметров естественного и антропогенного режимов Табл.1.

Таблица 1. Оценка устойчивости водохранилищ естественного стока на основе балльно-индексного подхода

Table 1. Assessment of the stability of natural runoff reservoirs based on the point-index approach

Этапы оценивания	Разряд водоема									
	Симферопольское вдхр.		Партизанское вдхр.		Аянское вдхр.		Изобильненское вдхр.		Кутузовское вдхр.	
	2020 г.	2022 г.	2020 г.	2022 г.	2020 г.	2022 г.	2020 г.	2022 г.	2020 г.	2022 г.
По физико-географическим и морфометрическим признакам	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11
По гидрологическому режиму (уровневый и температурный режим)	2	1	2	1	2	1	2	2	1	1
По гидрологическому режиму (условиям водообмена)	3	3	3	3	3	3	2	2	3	3
Сумма разрядов	16	15	16	15	16	15	15	15	15	15
Баллы качества воды (оценка уязвимости к загрязнению)	8	8	8	8	8	8	5	5	5	5
Класс уязвимости водоема	III	III	III	III-IV	III	III-IV	III	III	III	III

Полученные результаты показали, что балльно-индексный метод оценки устойчивости водных объектов может применяться для общей оценки их экологического состояния и его нормирования. Однако, эта методика не может являться универсальным методом оценки устойчивости систем водоснабжения. Она может давать только приблизительную оценку и не позволяет получить полную картину состояния системы водоснабжения. Для получения более точной информации о состоянии систем водоснабжения

необходимо проводить более детальные исследования и выполнить анализ системы с учетом общей оценки состояния водных объектов, в том числе экологического.

Анализ условий потери устойчивости СВ, которые связаны с состоянием водных объектов, с учетом внешних воздействий показал, что основными причинами, выводящими эти системы из состояния устойчивого равновесия, являются [5, 7, 21]:

- отсутствие заданного уровня воды в источнике водоснабжения, что не может обеспечить требуемую подачу водозаборных сооружений;

- увеличение ряда характеристик качества исходной воды в паводковый период вне «проектной зоны» очистных сооружений, что может вызывать нарушение технологического процесса ее очистки;

- существенные изменения концентрации загрязняющих веществ, в том числе выявление новых видов загрязнений, на устранение которых не приспособлены существующие схемы водоподготовки;

- нарушение работоспособного состояния основных элементов системы водоснабжения, функционально связанных с водными объектами.

На рис. 2, 3 показан годовой ход фактического наполнения водохранилищ естественного стока в 2020 вододефицитном году и в 2022 многоводном году. Из анализа представленных данных следует, что потеря устойчивости систем водоснабжения, для которых водохранилища естественного стока являются источниками происходила в вододефицитный 2020 год по причине отсутствия заданного уровня воды в источнике водоснабжения в периоды, когда фактический объем наполнения

достигал мертвого объема. Как следует из выполненных расчетов по балльно-индексному методу оценки устойчивости водных объектов для Симферопольского и Изобильненского водохранилищ классы уязвимости этих водоемов для рассмотренных периодов не отличались. Следует также отметить, что при одинаковых расчетных классах уязвимости для двух рассмотренных водохранилищ в Симферопольском фактическое наполнение в течении 4 месяцев 2020 – 2021 годов было меньше мертвого объема, а в Изобильненском величина фактического наполнения была выше мертвого объема. При этом мёртвым объёмом водохранилища является его несрабатываемая часть ёмкости, которую практически невозможно использовать для подачи в систему водоснабжения, то есть является признаком потери устойчивости. В результате установлено, что применение балльно-индексного метода оценки устойчивости водных объектов неприменим для оценки устойчивости систем водоснабжения., т.к. данный метод некорректно учитывает изменения в гидрологической обстановке, а его оценки на конечных промежутках времени не существенно отражают состояния устойчивости системы водоснабжения.

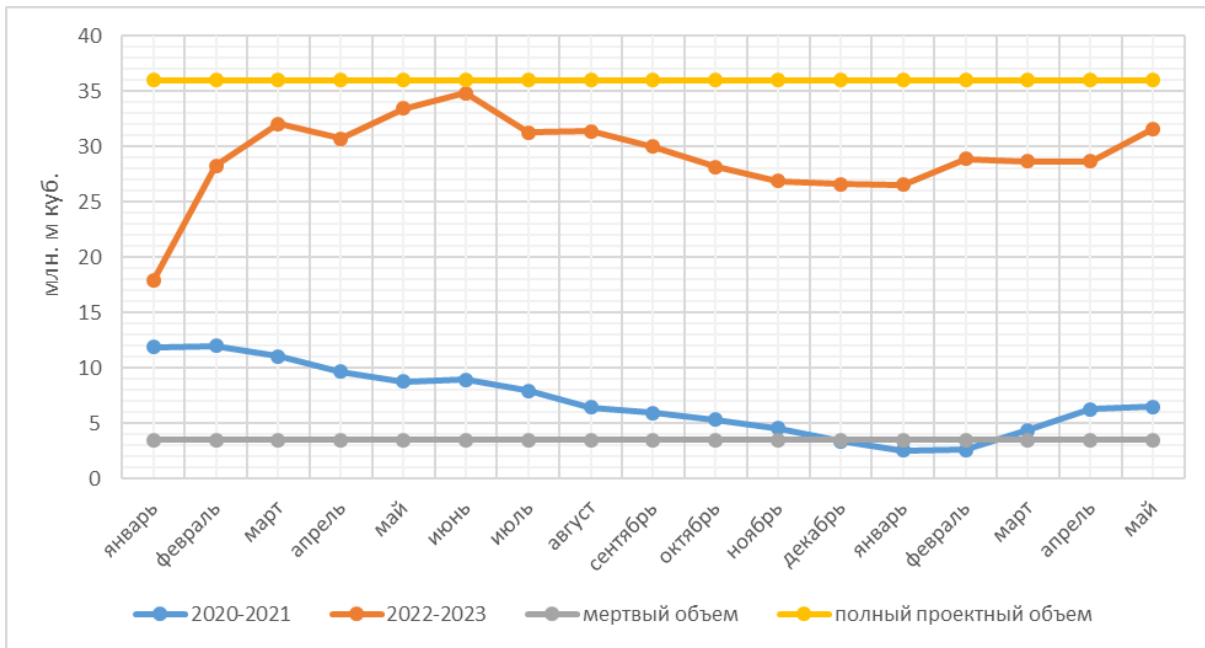


Рис. 2 Годовой ход фактического наполнения Симферопольского водохранилища
Fig. 2 The annual progress of the actual filling of the Simferopol reservoir

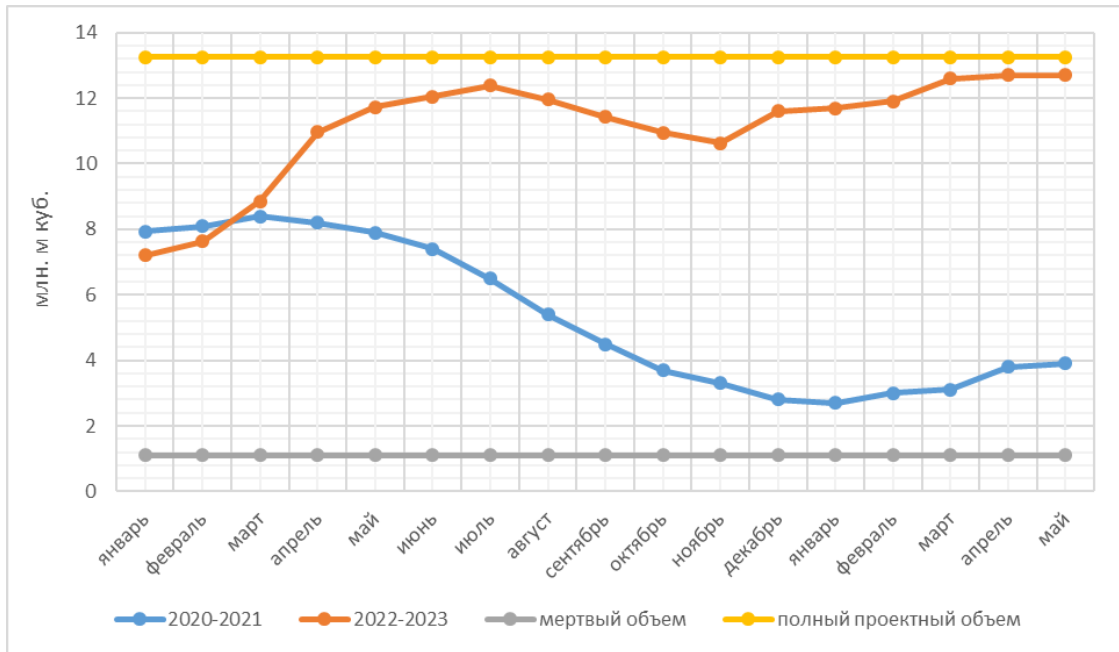


Рис. 3 Годовой ход фактического наполнения Изобильненского водохранилища
Fig. 3 The annual course of the actual filling of the Izobilnensky reservoir



Рис. 4. Структурная схема оценки устойчивости систем водоснабжения
Fig. 4. Structural diagram of the assessment of the stability of water supply systems

Анализ условий потери устойчивости систем водоснабжения с источниками циклического типа позволяет классифицировать их на три уровня:

1 уровень отсутствие заданного уровня воды в источнике водоснабжения;

2 уровень существенные изменения показателей воды источника водоснабжения за счет увеличения концентрации загрязняющих веществ, в том числе выявление новых видов загрязнений, на устранение которых не приспособлены существующие схемы водоподготовки;

3 уровень нарушение работоспособного состояния элементов системы водоснабжения, функционально связанных с водными объектами в случае невозможности восстановления либо их устранение требует значительных периодов времени, которые превышают установленные нормативными документами по надежности систем водоснабжения

В результате устойчивости СВ с источниками из водохранилищ естественного стока можно представить на структурной схеме, показанной на рис. 4.

Устойчивость работы системы водоснабжения может обеспечиваться за счет:

- выполнения инженерно-технических норм во время строительства;
- проведения мероприятий по повышению физической устойчивости (насосных станций, трубопроводов, очистных сооружений и т.д.);
- использования нескольких независимых источников питьевой воды;
- наличия резервных источников питьевой воды на случай чрезвычайной ситуации;
- нейросетевое моделирование процессов и применение автоматизации системы водоснабжения;
- эффективной и надёжной работы станций водоподготовки;
- повышения барьерной роли существующих и проектируемых станций водоподготовки систем водоснабжения, за счет создания адаптивных многопроцессных схем.
- организации подготовки и сопровождения паводкоопасного периода на территории водосборного бассейна;
- комплекса мер обеспечения антитеррористической защищенности водных объектов и систем водоснабжения.

Классификация условий потери устойчивости систем водоснабжения на три уровня позволяет для каждого из них определить условия, действующие внешние и внутренние факторы, область допустимых их изменений относительно которых система будет считаться устойчивой, что позволит обосновывать методы оценки.

ВЫВОДЫ

Системы водоснабжения могут находиться в условиях чрезвычайных ситуаций и негативного действия природных и техногенных явлений, что требует выбора методов оценки их устойчивости, от которой зависит бесперебойная подача воды потребителям при обеспечении количественных показателей давления и расхода на конструкциях подачи и распределения воды, а также качественных показателей в соответствии с требованиями действующих нормативных документов.

Для сложных технических систем их устойчивость обеспечивается двумя взаимосвязанными свойствами: возможностью сопротивляться действиям внешней среды и работать в нормальном режиме с заданными допустимыми отклонениями либо способностью систем возвращаться к исходному состоянию после прекращения воздействия, которое нарушило это состояние.

Для оценки устойчивости сложных технических или природных систем, которыми являются системы водоснабжения необходимо четко определить условия, действующих на нее внешних и внутренних факторов, постоянство каких ее свойств и диапазона параметров, существенно и в какой мере, а также установить внешние факторы, область допустимых их изменений относительно которых система будет считаться неизменной то есть устойчивой.

При оценке устойчивости водных объектов источников систем водоснабжения необходимо учитывать режимы их функционирования - **адаптационной или регенерационной**, так как они обуславливаются разными процессами и природными механизмами и требуют различных методов оценки.

Проведена оценка устойчивости систем водоснабжения двух городов Республики Крым с водохранилищами естественного на основе экспертной балльно-индексной системы, которая учитывает региональные особенности водных объектов и дает возможность в пределах изменения заложенных в них параметров, провести сравнительную оценку уязвимости водных экосистем к внешним воздействиям.

Полученные результаты показали, что экспертная балльно-индексная система не может являться универсальным методом оценки устойчивости систем водоснабжения, так как представляет только приблизительную оценку и не позволяет получить полную картину состояния устойчивости системы водоснабжения.

Выполнен анализ условий потери устойчивости систем водоснабжения, на основании которого представлены параметры трех уровней потери их устойчивости.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Данилов-Данильян В.И., Лосев К.С. Потребление воды: экологический, экономический, социальный и политический аспекты // М.: Наука, 2006. - 221 с.
2. Postel S. The last oasis. Facing water scarcity. – London: Earthscan Publications Ltd., Worldwatch Institute, 1992. – 226 p.
3. Николенко И.В., Копачевский А.М. Основные направления разработки комплекса мер по решению проблем дефицита воды в Крыму// Строительство и техногенная безопасность. – 2021, №21(73). – С. 147 – 160.
4. Milly C. and etc. Stationarity Is Dead: Whither Water Management?/ С. D. Milly, J. Betancourt, M.Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier.// Science 01 Feb 2008: Vol. 319, Issue 5863, pp. 573-574 DOI: 10.1126/science.1151915.
5. В.И. Данилов-Данильян. Водные ресурсы мира и перспективы водохозяйственного комплекса России. — М.: ООО «Типография ЛЕВКО», 2009. — 88 с.
6. Водная стратегия Российской Федерации на период до 2020 года. Распоряжение Правительства РФ от 27 августа 2009 г. N 1235-р. Электронный ресурс: режим доступа <http://government.ru/docs/10049/>(дата обращения 10.03.2022 г.)
7. Постановление Правительства РФ от 19.04.2012 N 350 (ред. от 31.05.2017) "О федеральной целевой программе "Развитие водохозяйственного комплекса Российской Федерации в 2012-2020 годах". Электронный ресурс: режим доступа: <http://government.ru/docs/37156/>(дата обращения 10.03.2022 г.)
8. И.В. Николенко, А.М. Копачевский, Э.А. Каримов. Анализ наполнения водохранилищ естественного стока для обоснования путей решения проблем обеспечения водной безопасности Республики Крым и города Севастополя// Водные ресурсы. - 2022, том 49, № 4. - С. 1–16.
9. Василенко С.Л. Устойчивость систем водоснабжения// Интегрированные технологии промышленности. – 2006, №3. – С. 85 – 90.
10. Гальперин Е.М. Определение сниженных минимально-допустимых значений параметров функционирования системы водоснабжения // Вода и экология: проблемы и решения. – 2003. – № 4. – С. 11–16.
11. Бивалькевич А.И., Похил Ю.Н., Никитин А.М. Принципы устойчивого и надежного обеспечения работы систем водоснабжения и водоотведения // Водоснабжение и санитарная техника. – 2004. – № 3. – С. 4–6.
12. Принципы обеспечения надежности водопроводной сети в условиях сокращения водопотребления // Водоснабжение и санитарная техника. – 2003. – № 5, ч. 2. – С. 27–31.
13. Арманд, А.Д. Механизмы устойчивости геосистем [Текст]/ А.Д. Арманд// Факторы и механизмы устойчивости геосистем: Сб. науч. работ. -М., 1989. - С. 33 - 46.
14. Дмитриев, В.В. Диагностика и моделирование водных экосистем [Текст] / В.В. Дмитриев. - СПб.: Изд. СПбГУ, 1995. - 215 с.
15. Примак Е. А. Интегральная оценка устойчивости и экологического благополучия водных объектов [Текст]: дис. канд. геогр. наук. – СПб.: 2009. – 188 с.
16. Пузаченко, Ю.Г. Проблемы устойчивости и нормирования [Текст] / Ю.Г. Пузаченко // Структурно-функциональная организация и устойчивость биологических систем: Сб. науч. ст. - Днепропетровск, 1990. - С.122 - 147.
17. Светлосанов В.А. Устойчивость природных систем к природным и антропогенным воздействиям [Текст] / В.А. Светлосанов. – М.: 11-й формат, 2009 - 100 с.
18. Снакин, В.В. Оценка состояния и устойчивости экосистем [Текст] / В.В. Снакин, Р.О. Бутовский, В.Е. Мельченко и др.-М.: ВНИИприрода, 1992. - 127 с.
19. Фрумин Г.Т. Оценка состояния водных объектов и экологическое нормирование [Текст] / Г.Т. Фрумин. - СПб.: Ин-т озераведения РАН, 1998. - 95 с.
20. Дмитриев В.В., Фрумин Г.Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. Учебное пособие. Наука., – СПб., 2004. – 294 с.
21. Николенко И.В. Обеспечение надежного водоснабжения Республики Крым путем внедрения адаптивных многопроцессных схем водоподготовки/ И.В. Николенко, А.Н. Сафонов, М.М. Герасимов, А.А. Беляк, А.А. Свердиков// Строительство и техногенная безопасность. – 2023, №29 (81). – С. 115 – 121.

REFERENCES

1. Danilov-Danilyan V.I., Losev K.S. Water consumption: ecological, economic, social and political aspects// Moscow: Nauka, 2006. - 221 p.
2. Postel S. The last oasis. Facing water scarcity. – London: Earthscan Publications Ltd., Worldwatch Institute, 1992. – 226 p.
3. Nikolenko I.V., Kopachevsky A.M. The main directions of the development of a set of measures to solve the problems of water scarcity in the Crimea// Construction and technogenic safety. – 2021, №21(73). – pp. 147 – 160.
4. Milly C. and etc. Stationarity Is Dead: Whither Water Management?/ С. D. Milly, J. Betancourt, M.Falkenmark, R. M. Hirsch, Z. W. Kundzewicz, D. P. Lettenmaier.// Science 01 Feb 2008: Vol. 319, Issue 5863, pp. 573-574 DOI: 10.1126/science.1151915.
5. V.I. Danilov-Danilyan. Water resources of the world and prospects of the water management complex of Russia. — М.: ООО "Tipografiya LEVKO", 2009. — 88 p.
6. Water strategy of the Russian Federation for the period up to 2020. Order of the Government of the Russian Federation of August 27, 2009 N 1235-R.

Electronic resource: access mode
<http://government.ru/docs/10049> / (accessed
 10.03.2022)

7. Decree of the Government of the Russian Federation of 19.04.2012 N 350 (ed. of 31.05.2017) "On the federal target program "Development of the water management complex of the Russian Federation in 2012-2020". Electronic resource: access mode: <http://government.ru/docs/37156> /(accessed 10.03.2022)

8. I.V. Nikolenko, A.M. Kopachevsky, E.A. Karimov. Analysis of the filling of natural runoff reservoirs to substantiate ways to solve the problems of ensuring water security of the Republic of Crimea and the city of Sevastopol// Water resources. - 2022, volume 49, No. 4. - pp. 1-16.

9. Vasilenko S.L. Stability of water supply systems// Integrated industrial technologies. - 2006, No. 3. - pp. 85-90.

10. Galperin E.M. Determination of the reduced minimum permissible values of the parameters of the functioning of the water supply system // Water and ecology: problems and solutions. - 2003. – No. 4. – pp. 11-16.

11. Bivalkevich A.I., Pokhil Yu.N., Nikitin A.M. Principles of sustainable and reliable operation of water supply and sanitation systems // Water supply and sanitary equipment. - 2004. – No. 3. – Pp. 4-6.

12. Principles of ensuring the reliability of the water supply network in conditions of reduced water consumption // Water supply and sanitary equipment. - 2003. – No. 5, part 2. – pp. 27-31.

13. Armand, A.D. Mechanisms of stability of geosystems [Text]/ A.D. Armand// Factors and

mechanisms of stability of geosystems: Collection of scientific works. -M., 1989. - C. 33 - 46.

14. Dmitriev, V.V. Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems [Text] / V.V. Dmitriev. - St. Petersburg: Publishing House of St. Petersburg State University, 1995. - 215 p.

15. Primak E. A. Integral assessment of sustainability and ecological well-being of water bodies [Text]: dis. Candidate of Geographical Sciences. – St. Petersburg: 2009. – 188 p.

16. Puzachenko, Yu.G. Problems of stability and rationing [Text] / Yu.G. Puzachenko // Structural and functional organization and stability of biological systems: Collection of scientific articles - Dnepropetrovsk, 1990. - C.122 - 147.

17. Svetlosanov V.A. Stability of natural systems to natural and anthropogenic influences [Text] / V.A. Svetlosanov. – M.: 11th format, 2009 - 100 p.

18. Snakin, V.V. Assessment of the state and stability of ecosystems [Text] / V.V. Snakin, P.O. Butovsky, V.E. Melchenko et al.-Moscow: VNIIPriroda, 1992. - 127 p.

19. Frumin G.T. Assessment of the state of water bodies and environmental regulation [Text] / G.T. Frumin. - St. Petersburg: Institute of Lake Studies of the Russian Academy of Sciences, 1998. - 95 p

20. Dmitriev V.V., Frumin G.T. Ecological rationing and sustainability of natural systems. Study guide. Nauka., – St. Petersburg, 2004, - 294 p.

21. Nikolenko I.V. Ensuring reliable water supply of the Republic of Crimea by implementing adaptive multi-process water treatment schemes/ I.V. Nikolenko, A.N. Safonov, M.M. Gerasimov, A.A. Belyak, A.A. Sverdlkov// Construction and technogenic safety. – 2023, №29 (81). – P. 115 – 121.

SELECTION OF A METHOD FOR ASSESSING THE STABILITY OF WATER SUPPLY SYSTEMS WITH RESERVOIRS OF NATURAL RUNOFF OF THE CRIMEAN PENINSULA

Nikolenko I.V.¹, Melnikova N.S.², Karimov E.A.³

^{1,2} V.I. Vernadsky Crimean Federal University, Institute "Academy of Construction and Architecture", 295493, Republic of Crimea, Simferopol, Kievskaya Street, 181.

¹ e-mail: nikoshi@mail.ru

³ Simferopol branch of GBU RK "Krymmeliiovodkhoz"

³ e-mail: karimov_ervin@mail.ru

Annotation. Approaches to assessing the stability of water supply systems as conditions for the absence of interruptions in the supply of water of the required quality to consumers with ensuring the operational level of quantitative parameters for pressure and supply are presented. A comparative analysis of the reliability and stability properties of complex technical systems is performed. The article evaluates the sustainability of water supply systems in two cities of the Republic of Crimea with natural reservoirs on the basis of an expert point-index system for two periods: arid (2020) and watery (2022). The stability classes of reservoirs providing water to these cities have been determined. The main reasons for the loss of stability of water supply systems are analyzed. The factors of ensuring the stability of water supply systems, which are an important aspect of ensuring the safe, reliable and efficient functioning of these systems, are presented.

The subject of research. Physico-geographical, morphometric and hydrological features of reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula as factors affecting the stability of the water supply system.

Materials and methods/ The analysis of methods for determining stability, collection and processing of basic hydrological data of reservoirs of natural runoff of the Crimean Peninsula was carried out. The analysis of conditions of loss of stability of water supply systems is carried out.

Results. The conditions for the loss of stability of water supply systems, which are associated with the state of water bodies, taking into account external influences, are determined, as well as factors for ensuring the stability of water supply systems are established.

Conclusions. Ensuring the sustainability of water supply systems is a complex and multifactorial process that requires an integrated approach. The results of the study show that the point-index methodology can be used for a general assessment of the ecological state of water bodies, but it is not a universal tool for analyzing water supply systems. This technique gives only approximate data and does not give a complete picture of the state of the system. To obtain more accurate results, it is necessary to conduct a detailed analysis of the water supply system, taking into account the overall assessment of the condition of water bodies and take into account all factors affecting the stability of the system, as well as to conduct regular monitoring, quality control of water and water supply sources in order to identify and eliminate possible problems in a timely manner. Only when all factors are taken into account and regular monitoring and monitoring activities are carried out, it is possible to guarantee the safety and reliability of water supply systems for the population and the environment.

Key words: sustainability, water supply system, measures to increase sustainability, point-index method, sustainability assessment, sustainability class.