

В.М. НИКИТИН*., **, Н.В. АБАСОВ*, М.В. БОЛГОВ*, Е.Н. ОСИПЧУК***

*Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 130, Россия, nikitin1310@mail.ru, nva@isem.irk.ru, eugene.os@mail.ru

**Иркутский научный центр СО РАН,
664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 134, Россия, nikitin1310@mail.ru

***Институт водных проблем РАН,
119333, Москва, ул. Губкина, 3, Россия, bolgovmv@mail.ru

УСТОЙЧИВОСТЬ ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ БАСЕЙНА РЕКИ АНГАРЫ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ ВОДНОСТИ

Рассмотрены проблемы функционирования водохозяйственной системы бассейна реки Ангара при отклонениях от нормальных условий водности. На основе анализа фактических режимов регулирования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада за последние 30 лет показано, что в годы высокой и, особенно, низкой водности удовлетворение потребности водопользователей в водных ресурсах с нормативной надежностью и выполнение действующего законодательства в полном объеме не обеспечиваются. Данное утверждение подтверждается результатами анализа работы водохозяйственной системы бассейна р. Ангара в наиболее известные маловодные периоды. Отмечено, что главной причиной сложившейся ситуации, наряду с климатическими изменениями в бассейнах оз. Байкал и р. Ангара, является действующая нормативно-правовая база и основанная на ней система управления водными ресурсами. Также рассмотрены другие причины снижения общей надежности и устойчивости работы водохозяйственной системы. Предложен универсальный индикатор устойчивости в виде нормативного диапазона обеспеченности водными ресурсами для каждого водопользователя с учетом выполнения различных условий и ограничений. Выполнено моделирование возможных и допустимых режимов регулирования водохранилищ Ангарского каскада для различных вариантов на основе статистических данных притока за 115-летний период наблюдений. Для каждого из рассмотренных вариантов получены оценки обеспеченности по выполнению необходимых требований и ограничений. В связи с тем, что за последние два десятилетия произошло значительное изменение климатических и гидрологических характеристик в бассейнах оз. Байкал и р. Ангара, дополнительно разработан сценарий длительной пониженной водности. В результате исследований определен наиболее эффективный (устойчивый) вариант регулирования с точки зрения повышения обеспеченности водными ресурсами водопользователей и водопотребителей бассейна Ангара и выполнения основных современных требований и ограничений. Для повышения устойчивости функционирования водохозяйственной системы бассейна р. Ангара предлагается внести изменения и дополнения в действующие нормативно-правовые документы.

Ключевые слова: водопользователи, режимы регулирования, устойчивость функционирования, обеспеченность водными ресурсами, маловодный период, правила использования водохранилищ.

V.M. NIKITIN*., **, N.V. ABASOV*, M.V. BOLGOV*, E.N. OSIPCHUK***

*Melentiev Energy Systems Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 130, Russia, nikitin1310@mail.ru, nva@isem.irk.ru, eugene.os@mail.ru

**Irkutsk Scientific Center, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences,
664033, Irkutsk, ul. Lermontova, 134, Russia, nikitin1310@mail.ru

***Water Problems Institute, Russian Academy of Sciences,
119333, Moscow, ul. Gubkina, 3, Russia, bolgovmv@mail.ru

STABILITY OF THE WATER MANAGEMENT SYSTEM OF THE ANGARA RIVER BASIN IN DIFFERENT WATER DISCHARGE CONDITIONS

The problems of the functioning of water management system of the Angara river basin in the case of deviations from normal water-discharge conditions are considered. Based on the analysis of actual water resource management regimes of Angara cascade reservoirs over the last 30 years, it is shown that in years of high and especially low water availability the needs of water users for water resources with regulatory reliability and the enforcement of current legislation are not met in full measure. This statement is confirmed by the analysis of the water management system of the Angara river basin in the most well-known

low-water periods. It is noted that the main reason for this situation, along with climate changes in the basins of Lake Baikal and Angara river, is the current legal framework and the water management system based on it. Other reasons for reducing the overall reliability and stability of the water management system are also considered. A universal indicator of sustainability is proposed in the form of a normative range of water resources availability for each water user, taking into account the fulfillment of various conditions and restrictions. A modeling of possible and acceptable modes of regulation of the Angara cascade reservoirs for various variants based on statistical data of inflow for a 115-year observation period is performed. For each of the variants considered, estimates were obtained of the water availability as regards the fulfillment of the necessary requirements and restrictions. Due to the fact that over the last two decades there has occurred a significant change in climate and hydrological characteristics in the basins of Lake Baikal and the Angara river, a scenario of long-term reduced water discharge was additionally developed. As a result of the research, the most effective (sustainable) version of regulation has been determined in terms of increasing the availability of water resources for water users and consumers within the Angara basin and meeting the main modern requirements and restrictions. To improve the stability of the water management system of the Angara river basin, it is proposed to make changes and additions to existing legal documents.

Keywords: water users, regulation regimes, stability of functioning, availability of water resources, low-water period, reservoir release rules.

ВВЕДЕНИЕ

Основные задачи использования водных ресурсов бассейнов рек и расположенных на них гидрозвулов и водохранилищ — это удовлетворение нужд водопотребителей и водопользователей в водных ресурсах; обеспечение безопасного функционирования основных гидротехнических сооружений водохранилищ; регулирование речного стока путем управления режимами наполнения и сработки водохранилищ с обеспечением безопасности населения и хозяйственных объектов в верхних и нижних бьефах водохранилищ [1–4].

При многоцелевом и комплексном использовании водных ресурсов водохранилищ удовлетворение в полном объеме запросов всех водопользователей и отраслей хозяйства во все годы (различные по водности) практически невозможно. Поэтому режимы использования водных ресурсов представляют собой, как правило, компромиссные решения, при которых неизбежны ограничения в тех или иных размерах, в те или иные годы и периоды внутри года, интересов всех или части водопользователей для достижения максимально эффективного использования водных ресурсов водохранилищ в целом.

Под устойчивостью функционирования водохозяйственной системы (ВХС) понимается такое состояние системы, при котором удовлетворяются потребности всех водопользователей и водопотребителей с заданной нормативной надежностью для всех регламентированных гидрологических, экологических, экономических, социальных условий и ограничений. Ниже рассматриваются состояние устойчивости ВХС бассейна р. Ангары и возможности ее повышения.

ОБЪЕКТ И МЕТОДЫ

Бассейн р. Ангары. Река Ангара — самый крупный правый приток Енисея, единственная река, вытекающая из оз. Байкал. В бассейне Ангары, включая оз. Байкал, частично расположены три субъекта Российской Федерации: Иркутская область, Красноярский край и Республика Бурятия. Общая площадь бассейна составляет 466,9 тыс. км². Более 60 % его территории находится в границах одного субъекта Российской Федерации — Иркутской области. На территорию Красноярского края приходится 27,6 %, на Республику Бурятия — 11,3 % площади бассейна р. Ангары, включая оз. Байкал [1]. Всего на территории бассейна расположены более 15 тыс. населенных пунктов, из них 18 городов и 40 населенных пунктов городского типа. В них проживают 2424 тыс. чел. Бассейн Ангары входит в состав Ангаро-Байкальского бассейнового округа [2]. В соответствии с нормативными документами, бассейн включает 14 водохозяйственных участков. Для удобства исследований, с учетом разной значимости участков по их влиянию на территорию бассейна, на их основе выделены пять макроучастков (см. рисунок). В их границах находятся гидроузлы Ангарского каскада ГЭС вместе с их водохранилищами. Исследуемая водохозяйственная система (ВХС), включающая оз. Байкал (Иркутское водохранилище), гидроузел, нижний бьеф Иркутской ГЭС, нижележащие ГЭС и водохранилища (Братское, Усть-Илимское, Богучанское), а также нижний бьеф Богучанской ГЭС — Нижнюю Ангару, представляет собой единую взаимосвязанную природно-техническую и социально-экономическую систему.

Водохозяйственная система бассейна р. Ангары в маловодные периоды. Для водохранилищ Ангарского каскада характерна высокая изменчивость ежегодных притоков. Маловодные периоды разной глубины и продолжительности обычно сменяются на многоводные и наоборот. Как правило, маловодные периоды на каскаде совпадают с аналогичными на оз. Байкал, но последние не всегда со-

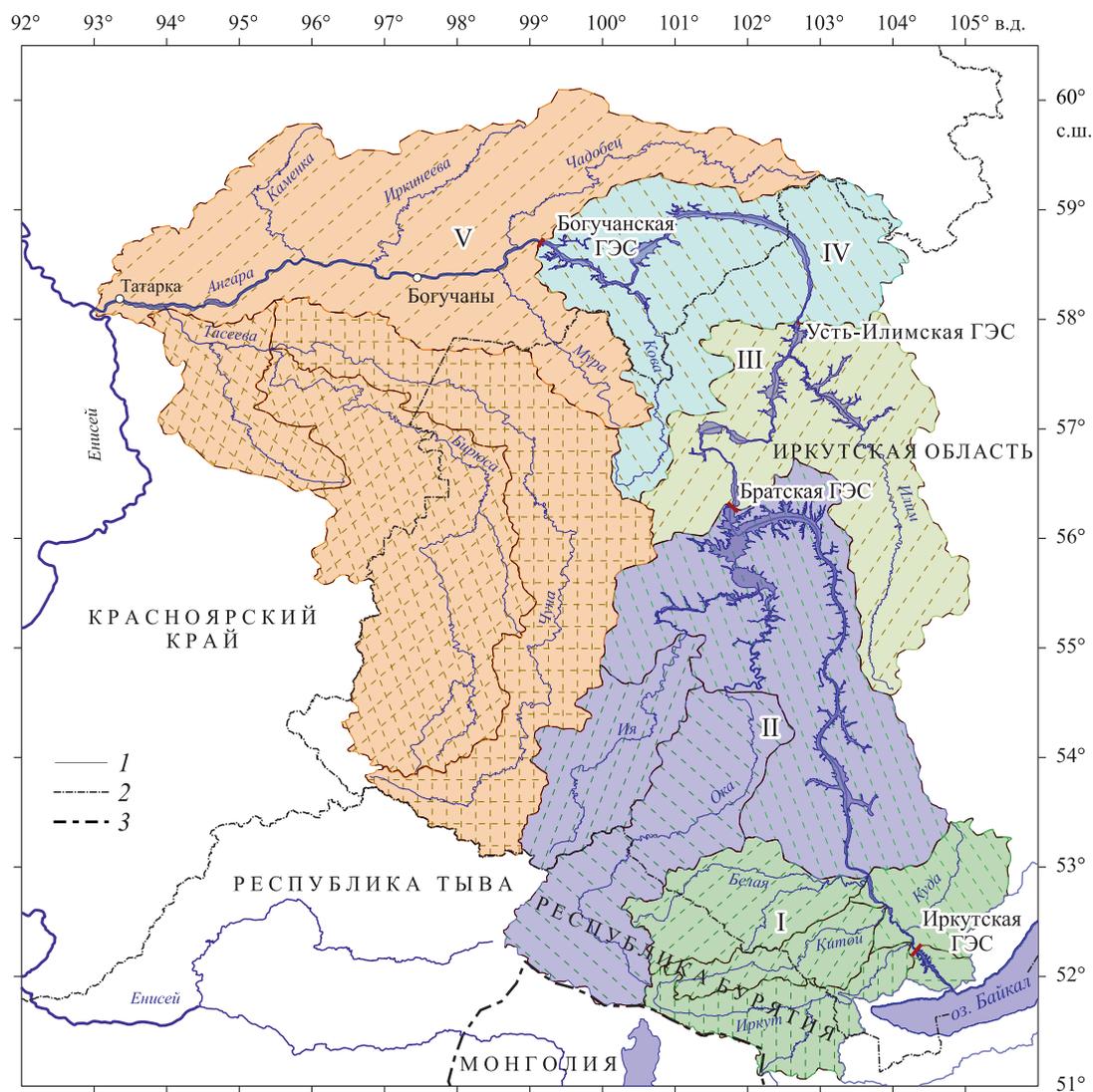


Схема бассейна реки Ангары.

Макроучастки: I — от истока р. Ангара до начала Братского водохранилища, II — Братское водохранилище, III — Усть-Илимское водохранилище, IV — Богучанское водохранилище, V — Нижняя Ангара. Границы: 1 — Иркутской области, 2 — Красноярского края, 3 — Монголии.

впадают с водностью на Братском и других нижележащих водохранилищах (боковые притоки). При совпадении маловодных периодов на оз. Байкал и Братском водохранилище, на Ангарском каскаде и в бассейне Ангары в целом устанавливается экстремальное маловодье. Наиболее значимы для Ангарского каскада ГЭС полезный приток в оз. Байкал (56 % общего притока) и боковой приток в Братское водохранилище (30 %). Боковые притоки в Усть-Илимское и Богучанское водохранилища относительно небольшие и имеют значимые составляющие только в период весеннего половодья.

Несмотря на уникальные регулирующие возможности крупнейшего в России и одного из крупнейших в мире Ангарского каскада ГЭС (проектный полезный объем водохранилищ каскада составляет около 100 км³ и соответствует величине среднегогодового годового стока всего бассейна Ангары), периодически возникают проблемы, связанные с выполнением требований различных водопользователей.

Анализ фактических режимов регулирования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада в 1988–2018 гг. показывает, что требования действующих Правил использования водных ресурсов (ПИВР), принятых для Ангарского каскада еще в далеком 1988 г. [3], а также представленных в более поздней редакции проекта ПИВР 2013 г. и ПИВР Богучанского водохранилища 2015 г. [5, 6], в пол-

ном объеме не соблюдаются. Законодательство в целом выполняется только в периоды (годы) нормальной и близкой к ней водности. В годы высокой и, особенно, низкой водности удовлетворение потребности водопользователей в водных ресурсах с нормативной надежностью не обеспечивается. С наступлением критической гидрологической ситуации (экстремальное маловодье) для решения проблемы поддержания уровня оз. Байкал были выпущены специальные временные Постановления Правительства: РФ № 97 от 04.02.2015, № 626 от 01.07.2016 и № 1667 от 27.12.2017, приостанавливающие действие Постановления Правительства РФ № 234 от 26.03.2001 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной или иной деятельности» [7–10]. Последнее Постановление (№ 1667) действует до 1 января 2021 г. и предусматривает возможность расширения диапазона регулирования уровня озера Байкал с 1 до 2,3 м в зависимости от складывающихся гидрологических условий (при этом метровый диапазон в периоды средней водности сохраняется).

С начала эксплуатации Ангарского каскада ГЭС и до последнего времени наиболее сильное маловодье было зафиксировано в период 1976–1982 гг. Тогда в течение 6 лет низкие притоки воды наблюдались во всех районах юга Сибири и в бассейне Амура. Особенно низкая водность отмечалась на оз. Байкал. Это привело к значительным социально-экономическим ущербам в регионе [11, 12]. Маловодный период 2014–2017 гг. оказался существенно масштабнее экстремального маловодья 40-летней давности (табл. 1).

В 2014–2017 гг. приток воды в Братское, Усть-Илимское и Богучанское водохранилища составил в среднем 65–70 % от нормы, в Иркутское водохранилище (оз. Байкал) — 61–65 % (в 2015 и 2017 гг. приток воды в озеро был рекордно низким за 120 лет наблюдений и имел обеспеченность 99 %).

Несмотря на установленные с октября 2014 г. по ноябрь 2018 г. минимально допустимые расходы воды через Иркутскую ГЭС в объеме 1300(1250) м³/с по условиям обеспечения нормальной работы водозаборов в нижнем бьефе, поддерживаемые рекордно длительный период, уровень оз. Байкал не удалось удерживать на установленной законодательством минимально допустимой отметке 456 м ТО (Тихоокеанской системы высот) [13–15].

Сложная ситуация в этот период складывалась и на других ГЭС и водохранилищах Ангарского каскада, где расходы и уровни были также близки к минимально допустимым значениям. В последние годы, особенно в 2017 г., наполнение Братского водохранилища в летний период не превышало 2–3 м при проектной призме регулирования 10 м. Крупнейшее в России и одно из двух крупнейших в мире водохранилище, выполняющее функции главного компенсатора энергоотдачи для всех гидроэлектростанций энергосистемы Сибири, обеспечивающее наполнение нижележащих водохранилищ (Усть-Илимского и Богучанского) и навигационные расходы на нижней Ангаре и Енисее, в 2014–2018 гг. практически полностью сработало свои многолетние гидроресурсы. С учетом того, что Иркутское водохранилище (оз. Байкал) с 2001 г. фактически имеет сезонное регулирование, многолетние запасы водных ресурсов в бассейне Ангары в этот период отсутствовали.

В итоге, в бассейне Ангары существенно снизилась общая надежность и устойчивость работы энергетической и водохозяйственной систем, была затруднена нормальная работа водопользователей и водопотребителей. В нижнем бьефе Иркутской ГЭС в связи с длительным периодом экстремально низких уровней воды ухудшились санитарно-гигиенические условия (качество воды). Аналогичные проблемы наблюдались и на Братском водохранилище, где резко обострилась ситуация с водоснабжением в населенных пунктах, находящихся в береговой зоне.

В результате маловодья появились проблемы практически у всех участников водохозяйственного комплекса: промышленного и коммунально-бытового водоснабжения, водного транспорта, электроэнергетики и др.

Главная причина сложившейся ситуации — это природно-обусловленный климатический фактор, определивший условия маловодья. За последний период, начиная с 1996 г. и, особенно, с 2014 г., функционирование водохозяйственной системы бассейна р. Ангары стало выходить за рамки нормативного.

Таблица 1

Объемы притока в водохранилища Ангарского каскада ГЭС по маловодным периодам, км³/год

Периоды	Объемы притока, км ³ /год			
	Иркутское	Братское	Усть-Илимское	Богучанское (каскад в целом)
1976–1982 гг.	45,6	74,5	81,6	86,3*
1996–2013 гг.	54,5	86,8	93,7	100,3*
2014–2017 гг.	39,0	64,6	70,4	74,1
За весь период наблюдений	59,5	91,1	99,3	105,3

*Расчетные значения.

Климатические изменения в бассейнах оз. Байкал и р. Ангары, в результате которых полезный приток в озеро за последние 20 лет снизился в среднем на 15 % относительно нормы (среднегодовых значений), требуют применения новых подходов и методов к управлению режимами ГЭС каскада по сравнению с общепринятыми, основанными на обработке представительной статистики за прошедший период (более 100 лет) [16].

Однако один из наиболее значимых факторов представляет собой также действующая нормативно-правовая база и основанная на ней система управления водными ресурсами. Это связано с несколькими причинами.

В настоящее время существенно ограничены регулирующие возможности главных водохранилищ Ангарского каскада ГЭС — Иркутского и Братского. В 2001 г. был почти в 2 раза сокращен, относительно проектного, допустимый диапазон регулирования оз. Байкал. Еще раньше, в период строительства и наполнения Братского водохранилища, с нарушением технических условий ряд водозаборов и причалов был построен на минимально допустимых отметках, на 3 м превышающих проектные (391,73 м Балтийской системы высот — БС) [3]. Хотя формально в действующих ПИВР осталась проектная отметка, фактическая призма регулирования уменьшилась на 30 %. В результате полезный объем двух главных водохранилищ многолетнего регулирования сократился приблизительно на 30 км³. Именно этот объем при проектировании ГЭС и водохранилищ Ангарского каскада предусматривался для регулирования и использования водных ресурсов в периоды экстремальной водности.

В маловодный период 2014–2017 гг. Иркутская ГЭС работала в условиях необходимости поддержания уровня озера выше отметки 456 м ТО (в соответствии с Постановлением № 234 [7]) за счет длительного сохранения пониженных расходов через Иркутскую ГЭС. Неизбежным следствием этого стали нарушение транспортных требований в летний период и энергетических — в зимний (обеспечение гарантированной среднемесячной зимней мощности). Прошедший период наглядно показал невозможность выполнения в маловодные годы Постановления № 234, а, следовательно, действующего на конец 2014 г. законодательства по регулированию водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (с 2015 г. до конца 2020 г. действуют временные Постановления № 97, 626 и 1667, разрешающие снижение уровня оз. Байкал ниже 456 м и повышение уровня выше 457 м ТО).

Рекордно длительный период маловодья в 2018–2019 гг. закончился. Однако он может смениться как на многоводный, так и на маловодный, как это неоднократно бывало в прошлом (в 2018 г. в бассейне Ангары отмечалась уже средняя водность, а в 2019 г. — повышенная). Выполненные нами ранее исследования показывают, что Постановление Правительства № 234 от 26.03.2001 г. по регулированию уровня оз. Байкал может быть выполнено только в шести годах из десяти без нарушения требований водопользователей, установленных ограничений по отметкам уровня или затоплений территорий нижнего бьефа Иркутской ГЭС [15].

Проблема также усугубляется тем, что действующие ПИВР-1988 [3] разрабатывались более 30 лет назад для совершенно другой экономической системы и других социально-экономических условий. Разработка проекта новых ПИВР водохранилищ Ангарского каскада, выполненная в 2013 г. [5] с учетом обязательного соблюдения Постановления Правительства № 234, не увенчалась успехом из-за невозможности решения проблемы устойчивого функционирования водохозяйственной системы бассейна р. Ангары и отрицательных социально-экономических последствий (высокие риски затоплений территорий г. Иркутска в многоводные годы и нарушение работы водозаборов в маловодные).

Что касается выработки электроэнергии и выполнения требований энергетике, то фактические показатели среднемесячной зимней мощности Ангаро-Енисейского каскада ГЭС в период 1988–2018 гг. значительно отличались от указанных в ПИВР (9800 МВт с обеспеченностью 95 % без учета мощности Богучанской ГЭС). За весь рассматриваемый период фактическая мощность соответствовала или была выше гарантированной среднемесячной зимней мощности Ангаро-Енисейского каскада ГЭС 95%-й обеспеченности (9800 МВт) только в 13 годах из 30, или в 43 % лет. Фактической 95%-й обеспеченности соответствовала среднемесячная зимняя мощность Ангаро-Енисейского каскада 7800 МВт. Главная причина такого несоответствия — низкий уровень потребности в электроэнергии, особенно в период 1991–2005 гг. Потребление электроэнергии и мощности в этот период оказалось значительно ниже ранее планируемой энергосистемой. И в настоящее время, с учетом ввода в эксплуатацию в 2015 г. Богучанской ГЭС, при задержке запуска в эксплуатацию крупных потребителей электроэнергии (Тайшетский и Богучанский алюминиевые заводы), значительный избыток мощности в энергосистеме Сибири сохраняется. В связи с этим невыполнение требований энергетике в 2014–2017 гг. не имело серьезных экономических последствий. Однако с ожидаемым появлением уже в ближайшие годы крупных потребителей и ростом потребности в электроэнергии ситуация изменится.

Индикаторы устойчивости. Индикаторы (показатели) устойчивости состояния водохозяйственной системы индивидуальны для каждого водопотребителя и водопользователя. В связи с этим в качестве универсального индикатора устойчивости для всех участников ВХС может быть принято выполнение установленного нормативного диапазона обеспеченности водными ресурсами водопользователей или заданных ограничений [4].

В соответствии с Водным кодексом Российской Федерации [17], правила использования водных ресурсов водохранилищ представляют собой основной документ, регламентирующий принципы и методы управления стоком с максимально возможным учетом интересов водопользователей и выполнения их требований [2]. В настоящее время для бассейна Ангары действующими являются «Основные правила использования водных ресурсов Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского, Усть-Илимского)» 1988 г. (далее ПИВР-1988) [3] и «Правила использования водных ресурсов Богучанского водохранилища» 2015 г. [6].

Водохозяйственные требования. Требования различных водопользователей и водопотребителей к режимам регулирования водных ресурсов имеют свои особенности и показатели, нередко противоречивые: удовлетворение требований одних водопользователей в один и тот же период времени может противоречить запросам других.

Требования водоснабжения к режиму использования водных ресурсов водохранилищ заключаются в обеспечении в течение всего внутригодового периода регламентированных уровней воды в верхних и нижних бьефах водохранилищ ГЭС для бесперебойной работы водозаборных сооружений, а также в поддержании нормативного санитарного качества воды.

Основное требование гидроэнергетики представляет собой обеспечение гарантированной по сезонам мощности и выработки электроэнергии отдельных ГЭС и каскада в целом.

Требования водного транспорта — обеспечение в период навигации нормируемых уровней и глубин по всей трассе судового хода как в водохранилищах, так и на незарегулированных участках реки, путем поддержания соответствующих расходов воды.

Основное требование рыбного хозяйства — соблюдение допустимой амплитуды суточных, недельных и сезонных колебаний уровня воды в нижних и верхних бьефах гидроузлов в нерестовые периоды.

При многоцелевом использовании всех водохранилищ Ангарского каскада удовлетворение в полном объеме требований водопользователей во все годы и внутригодовые периоды при разных гидрологических условиях практически невозможно, особенно при ограниченности водных ресурсов и недостаточности полезных объемов водохранилищ в маловодные годы. Поэтому режимы использования водных ресурсов предполагают невыполнение требований или их выполнение с различной степенью надежности (обеспеченности) для отдельных участников ВХС.

В действующих Методических указаниях по разработке ПИВР основной показатель надежности обеспечения объемов водопотребления — это расчетная обеспеченность водоотдачи. Под этим термином понимается вероятность обеспечения потребителя водой (либо продукцией, производимой за счет использования воды) по соответствующей норме, выраженная долей бесперебойных лет, месяцев, декад, дней или часов бесперебойной водоотдачи от длительности всего расчетного периода функционирования водохранилища [4].

Для основных водопотребителей и водопользователей в Методических указаниях приняты следующие нормативы обеспеченности водопотребления по числу бесперебойных лет: санитарные попуски — 97–99 %; водоснабжение (питьевое, хозяйственно-бытовое, промышленное) — 95–99 %; гидроэнергетика — 85–95 %; судоходство при поддержании уровней и глубин посредством попусков из водохранилищ — 85–90 %; орошение и сельскохозяйственное обводнение — 75–90 %; рыбное хозяйство — 75–90 %. Приведенные выше нормативы обеспеченности использовались при моделировании режимов регулирования водных ресурсов водохранилищ бассейна р. Ангары.

Экологические требования. Наряду с водохозяйственными и социально-экономическими, существуют также экологические требования. Хотя данные требования, касающиеся, прежде всего, оз. Байкал, представляют собой предмет обширных дискуссий с середины 1990-х гг., специальных исследований по влиянию уровня режима на экосистему оз. Байкал с количественными оценками и результатами фактического мониторинга до сих пор не проводилось. Такие требования отсутствуют и в нормативных документах. Представленные в литературе требования основаны на эмпирических и логических построениях, данных факторного, регрессионного анализа. При этом в основе анализа и основанных на нем требований лежат среднесрочные показатели, принятые как закономерность для любых условий водности [18]. Из-за отсутствия научного обоснования экологических требований и их подтверждения на практике они не могут быть применены в исследованиях устойчивости [19].

Моделирование уровневых режимов водохранилищ. С использованием разработанной в Институте систем энергетики СО РАН системы моделей управления режимами ГЭС Ангарского каскада [20], включая стохастические методы [21–24], были проведены расчеты по исследованию возможных и допустимых режимов регулирования водохранилищ для различных вариантов на основе статистических данных по ряду притока за 115-летний период наблюдений (1903–2017 гг.). Для каждого из рассмотренных вариантов были получены оценки обеспеченности по выполнению необходимых требований и ограничений.

Принимая во внимание особенности Ангарского каскада ГЭС (значение оз. Байкал как уникального природного объекта, очень незначительная доля безвозвратного водопотребления, роль гидроэнергетики и водного транспорта как ключевых водопользователей по требованиям к водным ресурсам и другие факторы), были рассмотрены следующие варианты.

1. «Естественный» вариант — максимально близкий к естественному режиму оз. Байкал и истока р. Ангары. Фактически такой вариант можно условно назвать «экологическим», так как это условие лежит в основе всех экологических требований. Данный вариант предусматривает естественный водный режим (расход) р. Ангары в створе Иркутской ГЭС, максимально приближенный к режиму сработки и наполнения оз. Байкал, существовавшему до строительства Иркутской ГЭС. Расходы, поступающие в нижний бьеф, определяются естественной пропускной способностью истока р. Ангары. Также учитываются проектные ограничения гидроузла по минимальному уровню воды у плотины и напору.

2. «Базовый» вариант — режимы регулирования Ангарского каскада водохранилищ по действующим ПИВР-1988 с ограниченным каскадным регулированием. При этом Иркутская ГЭС не участвует в компенсированном регулировании и работает только в соответствии с диспетчерским графиком Иркутского гидроузла, независимо от режима работы других гидроузлов Ангарского и Енисейского каскадов.

3. «Энергетический» вариант — максимальное обеспечение требований гидроэнергетики при обязательном выполнении минимально допустимых нормативных требований других водопользователей и водопотребителей.

4. «Транспортный» вариант — максимальное обеспечение требований водного транспорта при обязательном выполнении минимально допустимых нормативных требований других водопользователей и водопотребителей.

5. «Устойчивый» вариант — максимальное обеспечение требований всех водопользователей и водопотребителей при использовании водных ресурсов водохранилищ для различных условий водности с учетом современных водохозяйственных и социально-экономических ограничений.

В «устойчивом» варианте допускаются проектные уровни регулирования оз. Байкал: 455,54–457,50(457,85) м ТО в зависимости от складывающихся гидрологических условий в соответствии с действующим временным Постановлением Правительства № 1667, что является важным условием повышения устойчивости ВХС Ангары в годы экстремальной водности. При этом в годы нормальной и близкой к ним водности регулирование уровневых режимов оз. Байкал может быть ограничено метровым диапазоном (в соответствии с Постановлением № 234). Для Братского водохранилища возможна его сработка в экстремально маловодные годы до отметки 393,62 м БС (в настоящее время не допускается снижение уровня ниже отметки 394,73 м БС), позволяющей гарантировать выполнение минимально допустимых требований водного транспорта в навигационный период. В рамках «устойчивого» варианта предусматривается также возможность летней навигационной сработки Усть-Илимского и Богучанского водохранилищ до проектных отметок уровней мертвого объема (УМО) при одновременном накоплении запасов воды в Братском водохранилище. Дополнительно в экстремально маловодные периоды, в случае отсутствия запасов водных ресурсов в Братском водохранилище, имеется возможность навигационной сработки Усть-Илимского и Богучанского водохранилищ ниже проектных отметок УМО на 1,5 и 1–2 м соответственно (с учетом обязательного выполнения требований водозаборов, расположенных в акваториях водохранилищ и нижних бьефов). Также данный вариант позволяет не допустить значительных затоплений в нижнем бьефе Иркутской ГЭС за счет введения ограничений на максимально допустимые расходы.

В связи с тем, что за последние два десятилетия произошло значительное изменение климатических и гидрологических характеристик в бассейне Ангары (прежде всего, полезного притока в оз. Байкал) относительно средних многолетних значений за весь период наблюдений, дополнительно был разработан сценарий длительной пониженной водности в бассейнах оз. Байкал и р. Ангары с использованием специальных методик генерации временных рядов.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты расчетов обеспеченности выполнения требований водопользователей для различных вариантов режимов регулирования представлены в табл. 2.

Из рассмотренных вариантов наименее эффективен для ВХС бассейна р. Ангары «естественный». Его главные достоинства, наряду с естественным режимом, представляют относительно невысокие сбросные расходы и отсутствие превышения нормального подпорного уровня (НПУ) в многоводные периоды. Остальные требования и ограничения в нижнем бьефе Иркутской ГЭС, включая минимальные нормативные обеспеченности водными ресурсами всех водопользователей и водопотребителей, в большинстве лет не выполняются.

«Базовый» вариант позволяет обеспечить удовлетворение требований водопользователей и водопотребителей в пределах нормативных значений, за исключением выполнения требования незатопления г. Иркутска. Недостаток данного варианта — это также риск снижения минимального уровня Братского водохранилища ниже требований водозаборов (392,73 м БС), допустимого по ПИВР-1988 г., и водного транспорта на Братском водохранилище.

«Энергетический» вариант позволяет получить максимальную гарантированную среднюю зимнюю мощность Ангаро-Енисейского каскада ГЭС за счет ужесточения требований к уровенному режиму Братского водохранилища в летний период для регулирования выдачи необходимых объемов воды на навигацию. При этом обеспеченность навигационных расходов в Нижней Ангаре, как и в нижнем

Таблица 2

Расчетные обеспеченности основных требований водопользователей и параметры режимов по вариантам регулирования ГЭС Ангарского каскада

Показатель, единицы измерения	Вариант режима регулирования					
	естественный	базовый	энергетический	транспортный	устойчивый	
Иркутское водохранилище (оз. Байкал)						
		Обеспеченность, %				
Соблюдение уровня НПУ (457 м ТО)	≤457 м	99	76	76	76	63
Соблюдение уровня 456 м ТО	≥456 м	0	91	91	85	87
Соблюдение уровня УМО	≥455,54 м	7	100	100	100	100
Выполнение навигационных требований в нижнем бьефе ИрГЭС	≥1500 м ³ /с	8	85	85	95	90
Выполнение требований водозаборов	≥1300/1250 м ³ /с	74	99	100	100	100
Незатопление г. Иркутска	≤3500 (3200) м ³ /с	84	62	62	63	94
Братское водохранилище						
Допустимый минимальный уровень Братского водохранилища, м БС	391,73–394,73 м	391,73	391,73	391,73	394,73	393,62
Выполнение навигационных требований на Братском водохр.	≥394,73 м	94	93	90	100	98
Выполнение требований водозаборов в акватории Братского водохр.	≥392,73 м	97	99	97	100	100
Усть-Илимское водохранилище						
Выполнение транспортных требований на Усть-Илимском водохр.	≥295,5 м	90	96	92	97	97*
Богучанское водохранилище						
Выполнение требований навигации в Нижней Ангаре	≥3050 м ³ /с	90	89	85	95	95*
Ангаро-Енисейский каскад						
Гарантированная (обеспеченностью 95 %) средняя зимняя мощность, МВт		11 300	11 400	11 600	10 500	11 400*
Гарантированная (обеспеченностью 95 %) годовая выработка электроэнергии, млн кВт·ч		98 900	99 300	100 300	98 100	98 440*

*Летняя навигационная сработка Усть-Илимского и Богучанского водохранилищ до проектных УМО.

бьефе Иркутской ГЭС, снижается до минимальных нормативно допустимых значений (с 89 до 85 %), выполнение требований водного транспорта на Братском водохранилище снижается с 93 до 90 %. За счет этого происходит перераспределение водных ресурсов с летнего периода на зимний с соответствующим увеличением зимней мощности/выработки электроэнергии. Следствие этого — повышенная зимняя сработка Братского водохранилища при увеличении количества нарушений по требованиям водозаборов в его акватории в летний период. В «энергетическом» варианте, как и в «базовом», предусматривается возможность сработки Братского водохранилища в маловодные периоды до проектной отметки УМО (391,73 м БС) с невыполнением требований водозаборов. Также в данном варианте не выполняется требование незатопления г. Иркутска.

В «транспортном» варианте глубина сработки Братского водохранилища ограничена отметкой 394,73 м БС, а величина гарантированной средней зимней мощности каскада снижается примерно на 10 %. За счет этого возможно повысить обеспеченность требований водного транспорта до 95 % в Нижней Ангаре и до 100 % на Братском водохранилище. В данном варианте также не выполняется требование незатопления г. Иркутска.

Наиболее эффективным, с точки зрения повышения обеспеченности водными ресурсами всех водопользователей и водопотребителей бассейна Ангары и выполнения основных требований и ограничений, является «устойчивый» вариант. В нем, как и в остальных, допускаются проектные уровни регулирования оз. Байкал: 455,54–457,50(457,85) м ТО в зависимости от складывающихся гидрологических условий в соответствии с действующим временным Постановлением Правительства № 1667, что представляет собой важное условие повышения устойчивости ВХС Ангары в годы экстремальной водности. При этом в годы нормальной и близкой к ним водности регулирование уровневых режимов оз. Байкал может быть ограничено метровым диапазоном. Также данный вариант, за счет ограничения на максимальные расходы через Иркутскую ГЭС, позволяет не допустить значительных затоплений в ее нижнем бьефе. При этом в отдельные многоводные годы потребуется дополнительная форсировка уровня оз. Байкал в среднем в пределах 6–12 см относительно «базового» варианта.

Моделирование режимов регулирования, выполненное по сценарию пониженной водности, показало, что в таких условиях неизбежно снижение обеспеченности основных требований водопользователей Ангарского каскада, прежде всего, навигационных требований в нижнем бьефе Иркутской ГЭС и Нижней Ангаре, а также гарантированной средней зимней мощности Ангаро-Енисейского каскада до уровней ниже минимально допустимых нормативных значений.

С учетом отмеченных выше мероприятий при незначительных изменениях действующего законодательства, отсутствии финансово затратных мероприятий и изменений проектных решений в «устойчивом» варианте расчетная обеспеченность водными ресурсами всех водопользователей соответствует или превышает нормативную. Как следствие, в целом повышается устойчивость функционирования всей водохозяйственной системы бассейна р. Ангары. При этом обеспеченность требований водопользователей, по сравнению с современными показателями (62–100 %), может быть повышена до 94–100 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование показало, что для повышения устойчивости функционирования водохозяйственной системы бассейна р. Ангары в современных условиях необходимо внести следующие изменения и дополнения в действующие нормативно-правовые документы:

– в соответствии с временным Постановлением Правительства № 1667 диапазон регулирования уровня оз. Байкал необходимо установить на уровне 455,54–457,85 м ТО (продлив действие Постановления после 2020 г.), данный диапазон может быть скорректирован после выполнения специального исследования по определению научно обоснованного допустимого диапазона регулирования уровня оз. Байкал с учетом современных экологических и социально-экономических факторов;

– с учетом современных условий и ограничений, включая нормативную обеспеченность выполнения навигационных требований по Братскому водохранилищу и минимальную отметку по условиям нормальной работы водозаборов, допустимая призма регулирования Братского водохранилища должна быть установлена в диапазоне 393,62–401,73 м БС; внутри данного диапазона необходимо выделить отдельно сезонную и многолетнюю призмы, при этом использование последней должно допускаться только при наступлении маловодных периодов;

– целесообразно использование летней навигационной сработки Богучанского и Усть-Илимского водохранилищ до проектных отметок УМО; в экстремально маловодные периоды возможна навига-

ционная сработка данных водохранилищ ниже отметки УМО без нарушения требований нормальной работы водозаборов;

– необходимо дополнительно обосновать величину гарантированной средней зимней мощности Ангаро-Енисейского каскада с учетом современных условий.

Таким образом, возможности водохранилищ Ангарского каскада ГЭС имеют существенные резервы для повышения обеспеченности водопользователей водными ресурсами, а следовательно, и общей устойчивости функционирования водохозяйственной системы бассейна р. Ангары при различных условиях водности с учетом имеющихся ограничений.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (075–15–2020–787, Крупный научный проект «Фундаментальные основы, методы и технологии цифрового мониторинга и прогнозирования экологической обстановки Байкальской природной территории»).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Схема** комплексного использования и охраны водных объектов бассейна реки Ангары, включая озеро Байкал. Утверждена приказом Енисейского БВУ от 20 ноября 2014 г. № 183 [Электронный ресурс]. — <http://skiovo.enbvuu.ru> (дата обращения 18.03.2020 г.).
2. **Водный** кодекс Российской Федерации от 03.06.2006 № 74-ФЗ [Электронный ресурс]. — <http://www.consultant.ru> (дата обращения 18.03.2020 г.).
3. **Основные** правила использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского, Братского и Усть-Илимского). — М.: Мин-во мелиорации и водн. хоз-ва РСФСР, 1988. — 64 с.
4. **Методические** указания по разработке правил использования водохранилищ, утвержденные приказом Мин-природы РФ от 26.01.2011 № 17 [Электронный ресурс]. — <http://www.consultant.ru> (дата обращения 18.03.2020 г.).
5. **Проект** правил использования водных ресурсов водохранилищ Ангарского каскада ГЭС (Иркутского водохранилища и озера Байкал, Братского и Усть-Илимского водохранилищ). — М.: Изд-во Моск. ун-та природообустройства, 2013. — 174 с.
6. **Правила** использования водных ресурсов Богучанского водохранилища. Утверждены приказом Федерального агентства водных ресурсов от 20 ноября 2015 г. № 244 [Электронный ресурс]. — <http://www.consultant.ru> (дата обращения 18.03.2020 г.).
7. **Постановление** Правительства РФ от 26.03.2001 г. № 234 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал при осуществлении хозяйственной и иной деятельности» [Электронный ресурс]. — <http://gov.garant.ru/document?id=2057975> (дата обращения 18.03.2020 г.).
8. **Постановление** Правительства РФ от 04.02.2015 г. № 97 «О предельных значениях уровня воды в озере Байкал в осенне-зимний период 2014/2015 года» [Электронный ресурс]. — <http://government.ru/docs/16813/> (дата обращения 18.03.2020 г.).
9. **Постановление** Правительства РФ от 01.07.2016 г. № 626 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2016–2017 годах» [Электронный ресурс]. — <http://government.ru/docs/23720/> (дата обращения 18.03.2020 г.).
10. **Постановление** Правительства РФ от 27.12.2017 г. № 1667 «О максимальных и минимальных значениях уровня воды в озере Байкал в 2018–2020 годах» [Электронный ресурс]. — <http://government.ru/docs/30850/> (дата обращения 18.03.2020 г.).
11. **Савельев В.А.** Современные проблемы и будущее гидроэнергетики Сибири. — Новосибирск: Наука, 2000. — 200 с.
12. **Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н.** Озеро Байкал: риски маловодных и многоводных периодов // География и природ. ресурсы. — 2016. — № 5. — С. 29–38.
13. **Бычков И.В., Никитин В.М.** Регулирование уровня озера Байкал: проблемы и возможные решения // География и природ. ресурсы. — 2015. — № 3. — С. 5–16.
14. **Никитин В.М., Савельев В.А., Бережных Т.В., Абасов Н.В.** Гидроэнергетические проблемы озера Байкал: прошлое и настоящее // Регион: экономика и социология. — 2015. — № 3 (87). — С. 273–295.
15. **Abasov N.V., Bolgov M.V., Nikitin V.M., Osipchuk E.N.** Level regime regulation in Lake Baikal // Water Resources. — 2017. — Vol. 44, Iss. 3. — P. 537–546.
16. **Никитин В.М., Абасов Н.В., Бережных Т.В., Осипчук Е.Н.** Ангаро-Енисейский каскад ГЭС в условиях изменяющегося климата // Энергетическая политика. — 2017. — Вып. 4. — С. 62–71.
17. **Водный** кодекс Российской Федерации, Федеральный закон от 03.06.2006 № 74-ФЗ [Электронный ресурс]. — <http://www.consultant.ru> (дата обращения 18.03.2020 г.).
18. **Гидроэнергетика** и состояние экосистемы озера Байкал // Отв. ред. А.К. Тулохонов. — Новосибирск: Изд-во СО РАН, 1999. — 280 с.

19. **Никитин В.М., Абасов Н.В., Бычков И.В., Осипчук Е.Н.** Уровненный режим озера Байкал: проблемы и противоречия // География и природ. ресурсы. — 2019. — № 4. — С. 74–83.
20. **Abasov N.V., Nikitin V.M., Osipchuk E.N.** A system of models to study long-term operation of hydropower plants in the angara cascade // Energy Systems Research. — 2019. — Vol. 2, N 2 (6). — P. 5–18.
21. **Pereira M., Campodonico N., Kelman R.** Long-term hydro scheduling based on stochastic models // Proceeding of International Conference on Electrical Power Systems Operation and Management (EPSOM'98). — Zurich: Swiss Federal Institute of Technology. — 1998. — P. 1–22.
22. **Gjelsvik A., Мо В., Haugstad A.** Long- and medium-term operations planning and stochastic modelling in hydro-dominated power systems based on stochastic Dual dynamic programming // Energy Systems. — Berlin: Springer-Verlag, 2010. — P. 33–55.
23. **Nunes T.H.C., Galvao C.O., Rego J.C.** Rule curve for seasonal increasing of water concessions in reservoirs with low regularized discharges // RBRH, Porto Alegre. — 2016. — Vol. 21, N 3. — P. 493–501.
24. **Cheong T.S., Ko I., Labadie J.W.** Development of multi-objective reservoir operation rules for integrated water resources management // Journ. of Hydroinformatics. — 2009. — N 12 (2). — P. 185–200.

Поступила в редакцию 19.03.2020

После доработки 21.09.2020

Принята к публикации 25.12.2020