

УДК 621.311.214(282.256.138)
DOI: 10.36979/1694-500X-2026-26-4-59-65

ОЦЕНКА НЕВЯЗКИ ВОДНОГО БАЛАНСА НОВОСИБИРСКОЙ ГЭС И АНАЛИЗ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРИТОКА К ГИДРОУЗЛУ

М.Г. Тягунов, Д.С. Сычев, А.А. Сысоев

Аннотация. Исследуются влияния различных статей водного баланса на определение сезонной невязки гидроэлектростанции для повышения качества планирования водно-энергетических режимов. Рассматривается проблема невязки водного баланса Новосибирской ГЭС, расположенной на реке Оби. На основе отчетных форм ГЭС-017, кривых связи уровня и объема водохранилища, а также методик определения притока, используемых ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», выполнена оценка величины невязки и анализ возможных источников её возникновения. Показано, что при регулировании от нормального подпорного уровня до нормального подпорного уровня водохранилища следующего года невязка водного баланса Новосибирской ГЭС по результатам расчётов не превышает 0–2 % суммарного притока и практически не изменяется до и после модернизации гидроагрегатов. Отдельно рассмотрено соответствие фактических расходов нижнего бьефа данным кривой связи уровня и расхода, а также влияние обновления гидроагрегатов на расходно-энергетические характеристики станции.

Ключевые слова: Новосибирская ГЭС; водный баланс; невязка водного баланса; приток к гидроузлу; боковой приток; нижний бьеф; кривые связи уровня и расхода; неопределённость гидрологических данных.

НОВОСИБИРСК ГЭСИНИН СУУ БАЛАНСЫНЫН АЙЫРМАСЫН БААЛОО ЖАНА ГИДРОТҮЙҮНГӨ КЕЛГЕН СУУНУН АНЫКТАЛБАГАНДЫГЫН ТАЛДОО

М.Г. Тягунов, Д.С. Сычев, А.А. Сысоев

Аннотация. Макалада суу-энергетикалык режимдерди пландаштыруунун сапатын жогорулатуу үчүн ГЭСтин сезондук суу балансынын айырмасына суу балансынын ар кандай беренелеринин тийгизген таасири изилденди. Обь дарыясында жайгашкан Новосибирск ГЭСинин суу балансынын айырмасынын көйгөйү каралды. ГЭС-017 отчеттук формаларынын, суу сактагычтын деңгээли менен көлөмүнүн байланыш ийри сызыктарынын, ошондой эле «Батыш-Сибирь УГМС» ФМБИ тарабынан колдонулган суунун келишин аныктоо методикаларынын негизинде айырманын чоңдугуна баа берилди жана анын пайда болуу булактары талданды. Эсептөөлөрдүн натыйжасы көрсөткөндөй, суу сактагычты кадимки кармоо деңгээлинен (НПУ) кийинки жылдын кадимки кармоо деңгээлине чейин жөнгө салууда Новосибирск ГЭСинин суу балансынын айырмасы жалпы келген суунун 0–2 %ынан ашпайт жана гидроагрегаттарды модернизациялоого чейин жана андан кийин иш жүзүндө өзгөрбөйт. Төмөнкү бьефтин фактылык чыгымдарынын деңгээл жана чыгым байланыш ийри сызыгынын маалыматтарына шайкештиги, ошондой эле гидроагрегаттарды жаңылоонун станциянын чыгым-энергетикалык мүнөздөмөлөрүнө тийгизген таасири өзүнчө каралды.

Түйүндүү сөздөр: Новосибирск ГЭСи; суу балансы; суу балансынын айырмасы; гидротүйүнгө келген суу; капталдан келген суу; төмөнкү бьеф; деңгээл жана чыгым байланыш ийри сызыктары; гидрологиялык маалыматтардын аныкталбагандыгы.

ASSESSMENT OF WATER BALANCE DISCREPANCY AT THE NOVOSIBIRSK HPP AND ANALYSIS OF INFLOW UNCERTAINTY AT THE HYDRO COMPLEX

М.Г. Tyagunov, D.S. Sychev, A.A. Sysyoev

Abstract. This article investigates the influence of various components of the water balance on determining the seasonal water balance discrepancy of a hydroelectric power plant in order to improve the quality of planning water-

energy regimes. The paper examines the issue of water balance discrepancy at the Novosibirsk HPP, located on the Ob River. Based on HPP reporting forms (HPP-017), reservoir stage-storage curves, and the inflow determination methods used by the Federal State Budgetary Institution "West Siberian Administration for Hydrometeorology and Environmental Monitoring", an assessment of the discrepancy magnitude and an analysis of its possible sources were carried out. It is shown that during regulation from the normal pool level to the normal pool level of the following year, the water balance discrepancy of the Novosibirsk HPP, according to calculation results, does not exceed 0–2 % of the total inflow and remains virtually unchanged before and after the modernization of the hydroelectric units. The correspondence of the actual downstream discharges to the stage-discharge relationship curve is considered separately, as well as the impact of the hydroelectric units' upgrade on the station's discharge and energy performance characteristics.

Keywords: Novosibirsk HPP; water balance; water balance discrepancy; inflow to the hydro complex; lateral inflow; tailwater; stage-discharge curves; hydrological data uncertainty.

Обеспечение баланса воды в створах гидроэлектростанций является ключевым условием надёжного планирования водно-энергетических режимов [1] как отдельных гидроузлов, так и целых каскадов. Для Новосибирской ГЭС, расположенной на реке Оби, проблема точного учёта составляющих водного баланса усложняется масштабом водосбора и особенностями русловых и пойменных процессов на участке Барнаул – Новосибирский гидроузел.

Новосибирская ГЭС расположена на реке Обь в Советском районе г. Новосибирска и является единственной ГЭС на данной реке [2]. По площади водосбора (около 2,99 млн км²) Обь относится к крупнейшим рекам мира [3, 4], что определяет значительную неоднородность гидрологических условий по площади бассейна.

Расчет притока к створу ГЭС определяется по сумме расхода, выпадающих в водохранилище рек, альтернативным является метод водного баланса, но распространения он не получил [5]. Изученный приток вычисляется суммированием расхода в замыкающих гидрометрических створах рек. Для расчета притока, неосвоенной гидрометрическими наблюдениями территории водосбора, используется метод гидрологической аналогии.

Уравнение невязки водного баланса (1) [6].

$$\Delta Q = Q_{\text{бок.ij}} - Q_{\text{НБij}} + \frac{V_{\text{кij}} - V_{\text{нij}}}{\Delta t} + \Delta Q_{\text{ос.ij}} - \Delta Q_{\text{исп.ij}} - \Delta Q_{\text{л.ij}} - \Delta Q_{\text{номп.ij}} \left[\frac{\text{м}^3}{\text{с}} \right], \quad (1)$$

где $Q_{\text{НБij}}$ – сброс в НБ, $Q_{\text{I>.ij}}$ – боковой приток, $V_{\text{.ij}}$ и $V_{\text{=ij}}$ – объем воды в водохранилище на конец и на начало расчетного интервала, определенный по кривой связи верхнего бьефа на основе средней отметки по водохранилищу, Δt – продолжительность интервала, $\Delta Q_{\text{ос.ij}}$ – величина осадков, $\Delta Q_{\text{исп.ij}}$ – потери на испарение, $\Delta Q_{\text{л.ij}}$ – потери на оседание льда, $\Delta Q_{\text{номп.ij}}$ – потери на водопотребление. Осадки, испарение и потери на льдообразование являются дополнительными статьями водного баланса.

Перечень составляющих водного баланса приведен в таблице 1.

Расход воды через агрегаты ГЭС ($Q_{\text{ГЭС}}(t)$) определяется по расходным или эксплуатационным характеристикам гидроагрегатов (ГА) при известных значениях мощности и напора в соответствующем интервале времени.

Общий расход воды в нижний бьеф определяется как сумма расходов через турбины, водосливную плотину, фильтрацию, шлюзование. С другой стороны, расход воды в нижний бьеф ($Q_{\text{НБ}}(t)$) можно определить по измеренным значениям уровня воды в нижнем бьефе (НБ) с пересчетом в расход по имеющимся характеристикам связи расхода и уровня НБ [7].

Расход воды из водохранилища ($Q_2(t)$) определяется расчетным путем на основании измеренных значений уровня верхнего бьефа (ВБ), пересчитанных в объем сработки за данный интервал по объемной характеристике ВБ, связывающей уровень с объемом водохранилища, и далее – в расход водохранилища.

Таблица 1 – Перечень составляющих водного баланса

№ п/п	Наименование параметра	Обозначение	Предполагаемый источник информации
1	Расход притока к створу ГЭС	$Q_{I>.}(t)$	УГМС ¹
2	Расход испарения	$Q_{\text{исп.}}(t)$	УГМС
3	Расход выпадающих осадков	$Q_{\text{ос.}}(t)$	УГМС
4	Расход отбора воды из водохранилища	$Q_{\text{отб.}}(t)$	БВУ ²
5	Расход возврата воды в водохранилище	$Q_{\text{взв.}}(t)$	БВУ
6	Потери воды на льдообразование	$\Delta Q_{\text{л.}}(t)$	По данным ЕМДС
7	Расход воды из водохранилища	$Q_2(t)$	По результатам фактических замеров уровней, производимых ГЭС или УГМС
8	Расход воды в нижний бьеф	$Q_{\text{б.}}(t)$	ГЭС

Для анализа использованы:

- эксплуатационные формы ГЭС-017 по Новосибирской ГЭС (уровни и расходы верхнего и нижнего бьефов, режимы работы агрегатов);
- кривые связи объёма и уровня верхнего бьефа, расхода и уровня нижнего бьефа;
- методика подсчёта среднесуточного притока в водохранилище Новосибирской ГЭС (ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС», 1973 г.);
- данные о графике модернизации гидроагрегатов Новосибирской ГЭС и результаты расчётов невязки по периодам регулирования.

Периоды анализа невязки выбраны таким образом, чтобы охватывать годовые циклы регулирования от НПУ до НПУ следующего года и включать этапы до и после замены агрегатов.

Определение притока и роль методики УГМС. ФГБУ «Западно-Сибирское УГМС» использует методику 1973 г. [8], основанную на суммировании стока по основному гидрометрическому створу в г. Барнауле и боковых притоках на участке «Барнаул – Новосибирский гидроузел». Для бокового притока применяется разбиение на шесть частных водосборов с использованием переходных коэффициентов для перехода от стока в замыкающих створах к стоку с площади соответствующего водосбора.

Существенное ограничение методики – отсутствие явного учёта влияния поймы Оби: растекание половодья по пойменным участкам и последующий слив осветлённых вод в русло изменяют форму гидрографа притока, но в расчётах фактически не моделируются.

Дополнительный источник неопределённости связан с тем, что на ряде притоков (Мильтюш, Орда, Шарап, Ирмень) систематические гидрометрические наблюдения не ведутся; сток с их водосборов учитывается по постоянным коэффициентам перехода [9]. Для уточнения этих коэффициентов потребовались бы дорогостоящие экспедиционные измерения, предварительная оценка стоимости которых составляет порядка 3 млн руб. в год только на полевые работы.

Используемые характеристики бьефов и данные формы ГЭС-017. Для определения расхода воды через гидроузел и изменения объёма водохранилища использованы:

- формуляры ГЭС-017 (суточные/часовые значения уровней и расходов);

¹ УГМС – управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды Росгидромета.

² БВУ – бассейновое водное управление Федерального агентства водных ресурсов.

- объёмная характеристика верхнего бьефа;
- кривая связи нижнего бьефа.

Сопоставление расхода в нижний бьеф [10] по данным формы 017 и по кривой связи нижнего бьефа (НБ) показало, что для Новосибирской ГЭС расхождения незначительны, что позволяет исключить кривую связи нижнего бьефа из числа основных источников невязки. Графически показано на рисунке 1.

Графическое сопоставление (см. рисунок 1) показало, что разброс точек вокруг кривой невелик, а расхождения не носят систематического характера.

Сделан вывод, что **характеристика НБ Новосибирской ГЭС не является значимым источником невязки**, в отличие от ситуации на Воткинской ГЭС, где расхождения оказались более выраженными [11].

Невязка по годовым периодам регулирования. В статье приведены расчёты невязки для ряда гидрологических лет, охватывающих периоды как до начала комплексной реконструкции, так и после её завершения. Для Новосибирской ГЭС анализировались, в частности, периоды 2001–2002, 2002–2003, 2003–2004, 2009–2010, 2010–2011, 2013–2014, 2016–2017, 2017–2018, 2018–2019, 2019–2020, 2020–2021 и 2021–2022 гг.

По каждому периоду рассчитывались:

- суммарный приток в верхний бьеф за год регулирования (по данным притока);
- суммарный сток в нижний бьеф;
- невязка $\Delta V_{нев}$ и её относительная величина ε .

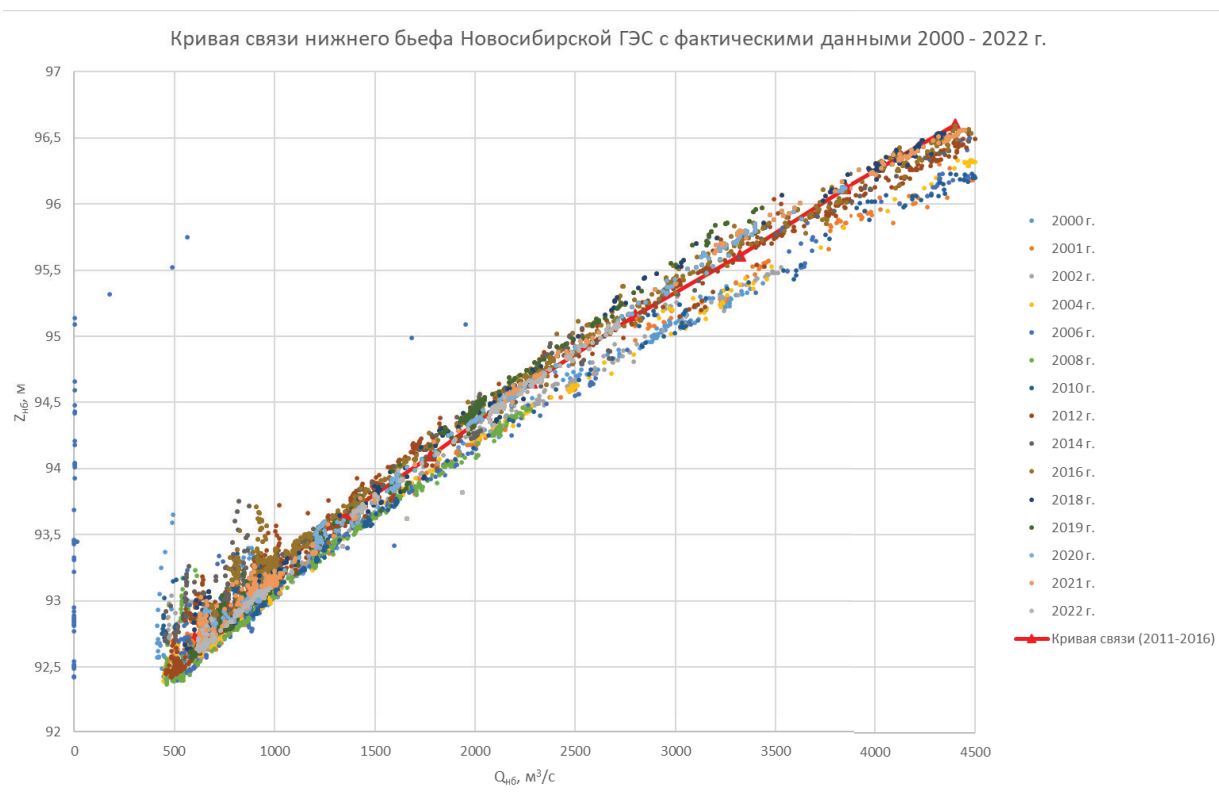


Рисунок 1 – Кривая связи нижнего бьефа за период с 2000 по 2022 год с нанесёнными среднесуточными значениями расхода ГЭС и отметки нижнего бьефа

Полученные значения невязки для Новосибирской ГЭС находятся в диапазоне от 0 до порядка 2 % суммарного притока. При этом, как до начала модернизации (2000-е гг.), так и после её завершения (после 2019 г.) порядок величин остаётся сопоставимым. Для некоторых периодов невязка практически отсутствует (доли десятых долей процента). Важно отметить, что при таком подходе нивелируются краткосрочные ошибки, поскольку анализ ведётся на годовом интервале от НПУ до НПУ, когда начальный и конечный объём водохранилища совпадают.

Влияние модернизации гидроагрегатов на расход и невязку. Модернизация гидроагрегатов Новосибирской ГЭС выполнялась поэтапно; (например, завершение модернизации ГА1 – 2012 г., ГА6 – 2014 г. и др.). Для оценки влияния модернизации на расходные характеристики и возможную невязку была разработана автоматизированная процедура поиска **сравнимых режимов** «до» и «после» модернизации:

- одинаковый напор на ГЭС;
- одинаковая суммарная мощность;
- наличие модернизированного агрегата в составе работающих;
- отсутствие холостых сбросов.

Далее сравнивались соответствующие значения расхода через агрегаты/через ГЭС.

Изменение расхода после модернизации. Анализ данных за период 2011–2015 гг. показал, что после замены агрегатов при сопоставимых режимах работы **расход через ГЭС, как правило, уменьшается**, что отражает повышение энергетической эффективности (увеличение КПД). По оценке, приведённой в отчёте, средняя разница расходов «до» и «после» для сопоставимых режимов достигает величины порядка 8 %.

При этом важно, что:

- снижение расхода при той же мощности не приводит к росту интегральной невязки водного баланса, поскольку расчёт невязки ведётся по суммарному притоку и стоку, а не по расходно-энергетическим характеристикам отдельно взятого агрегата;
- годовые оценки невязки (0–2 %) не показывают тренда, связанного с началом и завершением реконструкции (2012–2019 гг.).

Таким образом, можно заключить, что модернизация гидроагрегатов Новосибирской ГЭС не является определяющим фактором невязки; её влияние проявляется прежде всего в перераспределении доли стока между турбиной и возможными холостыми сбросами при оптимизации режимов работы, но не в систематическом нарушении баланса.

С учётом представленных результатов можно выделить несколько ключевых блоков, влияющих на величину невязки.

1. Определение притока к створу ГЭС:

- Методика 1973 г. не учитывает детально влияние поймы реки Оби на формирование притока;
- часть водосборов описана по постоянным коэффициентам без регулярных измерений расхода;
- для корректировки требуется дорогостоящая полевая программа.

2. Использование объёмной характеристики водохранилища:

- при расчёте изменения объёма по уровню ВБ возможны ошибки из-за деформации береговой линии и изменения морфометрии водохранилища [12];
- для Новосибирской ГЭС эти эффекты, по сравнению с крупными водохранилищами Волжско-Камского каскада, выражены слабее, но при длительной эксплуатации также могут требовать уточнения характеристик $W = f(H)$.

3. Расходные характеристики агрегатов и кривая нижнего бьефа:

- для Новосибирской ГЭС проверка показала хорошее совпадение расхода по форме 017 и по кривой связи НБ, что позволяет исключить этот фактор как доминирующий источник невязки;

- модернизация оборудования изменила локальные расходно-энергетические характеристики, но не привела к заметному изменению годовой невязки.

С точки зрения практики планирования режимов Новосибирской ГЭС и водохозяйственной системы в целом, результаты можно трактовать двояко:

- с одной стороны, **текущая невязка по факту невелика**, что говорит о приемлемом качестве действующей системы учёта;
- с другой – наличие методологических ограничений по притоку (особенно боковому) означает, что такая «хорошая невязка» может частично быть результатом компенсации ошибок разных слагаемых, а не истинной высокой точности всех элементов водного баланса.

Выводы. Проведенный анализ позволяет сделать некоторые выводы и дать рекомендации:

1. Наличие невязки водного баланса ГЭС имеет устойчивый многолетний характер.
2. Причина появления и величина невязки баланса окончательно не определены.
3. Определение величины притока к водохранилищам ГЭС в значительной степени зависит от плотности гидрометрической сети и от методики определения бокового притока, на необходимость обновления которых указывают сотрудники различных ведомств, в том числе региональных управлений гидрометеорологической службы.

4. Анализ вида характеристик связи верхнего и нижнего бьефов ГЭС показывает их изменение по сравнению с проектными, что влияет как на величину расхода водохранилища, так и на величину расходов бокового притока и сброса в нижний бьеф.

5. Для устранения причин возможных ошибок определения составляющих баланса расхода предлагается провести актуализацию характеристик бьефов всех ГЭС, совершенствование методики определения испарения и расходов отбора и возврата воды водопотребителями, а также оснастить гидрометрические посты современными средствами и системами автоматизированного сбора данных.

Поступила: 21.01.2026; рецензирована: 04.02.2026; принята: 06.02.2026.

Литература

1. Беднарук С.Е. Регулирование речного стока каскадами водохранилищ: учебное пособие / С.Е. Беднарук. М., 2020. 151 с.
2. Дворецкая М.И. Возобновляемая энергия. Гидроэлектростанции России: справочник / М.И. Дворецкая, А.П. Жданова, О.Г. Лушников, И.В. Слива; под ред. В.В. Берлина. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2018. 224 с.
3. Самойлова С.Ю. Динамика наводнений на реке Оби в черте города Барнаула / С.Ю. Самойлова, В.А. Казанцева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2025. № 4. С. 35–49. URL: <https://doi.org/10.35567/19994508-2025-3-35-49>, EDN: SGQHKD.
4. Самойлова С.Ю. Оценка стационарности годового и сезонного стока рек бассейна Верхней Оби / С.Ю. Самойлова, О.В. Ловцкая, А.Б. Голубева // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2024. № 5. С. 21–38. DOI:10.35567/19994508-2024-5-21-38.
5. Научно-прикладной справочник: Многолетние характеристики притока воды в крупнейшие водохранилища РФ / колл. авторов; под ред. В.Ю. Георгиевского. М.: ООО «РПЦ Офорт», 2017. 132 с.
6. Приказ Министерства природных ресурсов Российской Федерации от 30 ноября 2007 года № 314 «Об утверждении Методики расчёта водохозяйственных балансов водных объектов». Зарегистрирован Минюстом России 29 декабря 2007 г., регистрационный № 10861.
7. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2017 году: справочное издание. СПб.: Росгидромет, 2018. URL: <http://www.hydrology.ru/biblio?page=5&s=type&o=asc> (дата обращения: 22.10.2025).
8. Обзор состояния системы гидрологических наблюдений, обработки данных и подготовки информационной продукции в 2021 году: Справочное издание. СПб.: Росгидромет, 2022. URL: <http://www.hydrology.ru/ru/content/obzor-sostoyaniya-sistemy-gidrologicheskikh-nablyudeni-y-obrabotki-dannyh-i-podgotovki-6> (дата обращения: 03.11.2025).
9. Действующие метеорологические станции сети Росгидромета. URL: http://esimo.ru/dataview/viewresource?resourceId=RU_RIHMI-WDC_2667 (дата обращения: 18.05.2025).

10. Тягунов М.Г. Актуализация характеристик бьефов ГЭС на основе статистических данных с применением машинного обучения / М.Г. Тягунов, А.А. Сысоев, Д.Д. Субботина // Гидротехническое строительство, 2024. № 7. С. 17–24.
11. Особенности функционирования гидроэнергетики России в изменяющихся внешних условиях (на примере Волжско-Камского каскада ГЭС): монография / [А.Ю. Александровский, В.В. Клименко, А.Г. Терешин и др.]; под общ. ред. проф. А.Ю. Александровского и чл.-корр. РАН В.В. Клименко. М.: ИД Энергия, 2016. 169 с.
12. Беркович К.М. Размыв речных берегов: факторы, механизм, деятельность человека / К.М. Беркович, Л.В. Злотина, Л.А. Турыкин // Геоморфология. 2019. № 2. С. 3–17. URL: <https://doi.org/10.31857/S0435-4281201923-17>.