

ОБОСНОВАНИЕ ЦЕЛЕСООБРАЗНОСТИ СУТОЧНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ СТОКА НИЗКОНАПОРНЫМ ГИДРОУЗЛОМ

С.О. Агеев

Федеральное бюджетное учреждение «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей», г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: gg6258@yandex.ru

Аннотация. В работе рассматриваются возможные проблемы для судоходства, которые могут возникнуть после строительства и ввода в эксплуатацию Нижегородского низконапорного гидроузла. Путем анализа имеющихся данных по изменению навигационных расходов через Нижегородскую гидроэлектростанцию и проведенного прогнозного расчета водного режима в створе создаваемого Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) в работе выясняется, обеспечиваются ли судоходные габариты по глубине на участке выше и ниже створа ННГУ в течение навигационного периода, кроме того определяется проблема неравномерности сбрасываемых расходов с ННГЭС, которая будет сказываться на гидрологическом режиме нижнего бьефа ННГУ и на формировании русла этого участка реки. С целью решения данных проблем предлагается введение регулирования стока на водосливе ННГУ. Для определения возможности регулирования стока на водосливе ННГУ на базе лаборатории ВГУВТ ставится эксперимент, в ходе которого устанавливаются скоростные и временные параметры движения водного потока. В статье приводятся результаты проведенной работы.

Ключевые слова: неравномерность сбросов воды, расходы воды, транспортный попуск, гидрологический прогноз, кривая обеспеченности, регулирование стока, колебание уровней воды, нижний бьеф.

1. Введение

Участок средней Волги Городец – Нижний Новгород остаётся незарегулированным, мелководным и значительно ограничивает транзитное судоходство и речные перевозки по Волге. Такая ситуация сложилась из-за частичного наполнения Чебоксарского водохранилища весной 1981 г. до промежуточной 63-й отметки. Решение этой проблемы путем дноуглубления мелководных участков приводит лишь к посадке уровней воды.

Реализация мероприятий по строительству Нижегородского низконапорного гидроузла предусмотрена Стратегией развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, Транспортной стратегией Российской Федерации на период до 2030 года, федеральным проектом «Внутренние водные пути» Комплексного плана модернизации и расширения магистральной транспортной инфраструктуры на период до 2024 года в целях устранения инфраструктурного ограничения на лимитирующем участке Единой глубоководной системы и увеличения пропускной способности внутренних водных путей.

Створ ННГУ планируется расположить в 40,5 км ниже по течению от створа плотины Горьковского гидроузла в районе 890,5 км судового хода (рис. 1). В результате реализации проекта на Волге появятся два объекта: сам гидроузел и создаваемое им водохранилище. Водоохранилище на отметке нормального подпорного уровня (НПУ), равной 68,0 м, будет иметь емкость в 154 млн. м³ и площадь водной поверхности 47,5 км² [1, 2]. Создаваемое низконапорным гидроузлом промежуточное водохранилище имеет небольшие размеры, планируется, что в нем вода будет накапливаться до 68-й отметки, а все что свыше - проходить транзитом в нижний бьеф (НБ). Таким образом, на участке реки: нижний бьеф Нижегородской ГЭС (НБ ННГЭС) - верхний бьеф ННГУ (ВБ ННГУ) будут обеспечены судоходные габариты по глубине.

Поскольку сбросы воды с Нижегородской ГЭС привязаны к целям энергетики, то имеется высокая неравномерность в значениях сбрасываемых расходов. Так, максимальные расходы воды в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла регистрировались в пределах от 1700 м³/с (1967 г.) до 7750 м³/с (1966 г.). Средний максимальный расход составил 4960 м³/с. В условиях регулирования стока в период летне-осенней межени среднесуточные расходы воды в нижнем бьефе Нижегородской ГЭС изменялись от 753 м³/с (август 1973 г.) до 6160 м³/с (ноябрь 2012 г.), средний сбросной расход составил 1300 м³/с [2].

Опираясь на исследования Р.Д. Фролова, Шестовой М.В., др. ученых [3, 4] и представленные выше цифры, можно предположить, что с вводом в эксплуатацию ННГУ, в начальный период при наступлении половодья водохранилище довольно быстро можно наполнить до 68-й отметки, а дальше излишки воды будут проходить транзитом. Но потом наступает межень, и для обеспечения судоходных глубин в НБ ННГУ воды может не хватить.

Следующий очевидный факт - неравномерность попусков воды через турбины ГЭС приведёт к большому колебанию уровней в нижнем бьефе, и волна попуска значительно может повлиять на безопасность судоходства на акватории небольших размеров, к которой относится водохранилище, создаваемое Нижегородским низконапорным гидроузлом.

Кроме того, неравномерность сбрасываемых расходов с ННГЭС будет сказываться на гидрологическом режиме нижнего бьефа ННГУ и на формировании русла этого участка реки. И здесь нельзя исключить того, что можно получить условия для интенсивного переформирования дна реки ниже створа ННГУ. То есть, появится риск переместить участок с лимитирующими глубинами ниже по течению, в нижний бьеф ННГУ.



Рис. 1. Месторасположение створа ННГУ

2. Материалы и методы. Результаты

Чтобы выяснить, обеспечиваются ли судоходные габариты по глубине на участке ниже створа ННГУ в течение навигации, в работе [5] был выполнен расчет изменчивости стока. При этом учитывалось, что транспортный попуск, исходя из соображений обеспечения уровней воды на нижерасположенном участке не менее проектных значений (для сверхмагистральной категории водного пути 99 % вероятности), установлен водохозяйственным расчетом [6] в размере $1140 \text{ м}^3/\text{с}$.

Для примера были выбраны два характерных навигационных месяца 2017 года – май (высокие уровни - время прохождения половодья) и август (относительно низкие уровни - межень). Согласно своду правил [7] был проведен гидрологический прогноз по методу моментов (метод Фостера). В расчет закладывались среднесуточные величины сбрасываемых расходов с ННГЭС (при этом использовались данные генерации). В результате выяснилось, что на протяжении каждого суток, выбранных двух месяцев величина транспортного пропуска в размере $1140 \text{ м}^3/\text{с}$ с необходимым процентом вероятности для рассматриваемых водных путей (99 %), не обеспечивается. Это иллюстрируют представленные графики изменения расходов воды во времени суток для различных процентов обеспеченности (рис. 2, 3), на которых нанесена линия, соответствующая величине транспортного пропуска в $1140 \text{ м}^3/\text{с}$. Как следствие полученного результата – это то, что гарантированная (проектная) глубина в нижнем бьефе ННГУ при отметке уровня воды в 64,37 м БС (при расходе $1140 \text{ м}^3/\text{с}$) не обеспечивается, на что косвенно указывают расчеты в работе [6].

В период высоких вод (на примере мая) величина пропуска не выдерживается в ночные и утренние часы для расходов высокой обеспеченности (90 - 99,9 % обеспеченности). В вечерние часы не выдерживаются только для расхода 99,9 % обеспеченности.

В межень период (на примере августа) не выдерживаются не только в ночные и утренние часы (для расходов 25 - 99,9 %), но и в вечерние, причем для расходов выше 60 % обеспеченности.

На формирование водного режима зарегулированного участка реки влияет очень много разнообразных факторов, их большая изменчивость во времени обуславливает серьезные трудности при прогнозировании. В данном конкретном случае имеется в виду нерегулярность сбросов во времени как в течение суток (ночью сбросы меньше), в течение недели (больше сбрасывается воды в рабочие дни), так и в течение года, когда весной в половодье или осенью в дождевой паводок накладывается увеличенный сток реки. Поэтому аналогичные расчеты были проведены для каждого суток каждого месяца навигационного периода (май - ноябрь) 2017 г. Полученные графики расходов различной обеспеченности, сбрасываемых ежечасно, показали схожую картину: гарантированные глубины для судоходства в НБ ННГУ обеспечиваются с 9.00 до 15.00 для любого процента вероятности превышения расхода, в остальное время суток периодически испытывается дефицит воды.

К такому же выводу можно прийти, проведя анализ расчетных параметров, связанных с максимальным и минимальным значениями уровней воды, суточной амплитудой колебаний уровней, максимальным и минимальным расходами воды для проектных условий при отметке уровня воды в водохранилище 68,0 м БС и в бытовом состоянии при среднесуточном расходе, сбрасываемом с ННГЭС, равном транспортному попуску $1140 \text{ м}^3/\text{с}$ [2]. В этой работе, выполненной в рамках разработки проектной документации для строительства

ННГУ, приводятся расчетные характеристики расходов и уровней для 4-х створов, интересующих нас в нашем исследовании: 1) НБ ННГЭС, 2) ВБ ННГУ; 3) НБ ННГУ; 4) гидропост Нижний Новгород (г/п НН).

Результаты представлены ниже:

– уровни воды (УВ) при проектных условиях в створах

НБ ННГЭС на 1,15 ÷ 1,63 м выше бытовых,

ВБ ННГУ на 3,05 ÷ 3,43 м выше бытовых,

НБ ННГУ на 0,45 м выше ÷ 0,16 м ниже бытовых,

г/п НН на 0,11 м выше ÷ 0,06 м ниже бытовых.

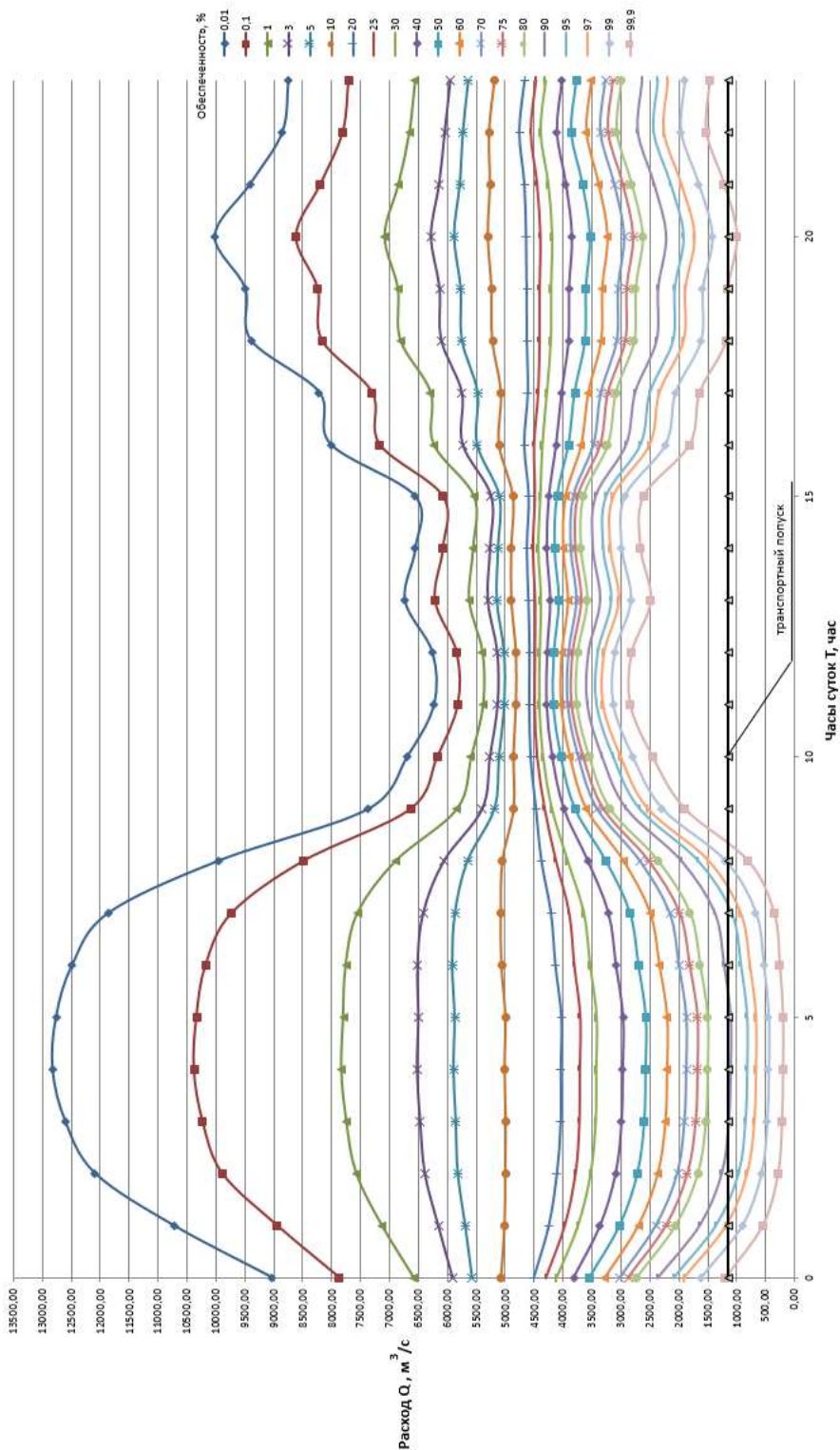


Рис. 2. Графики обеспеченности расходов воды (по часам) различной обеспеченности через ННГЭС в мае 2017 г.

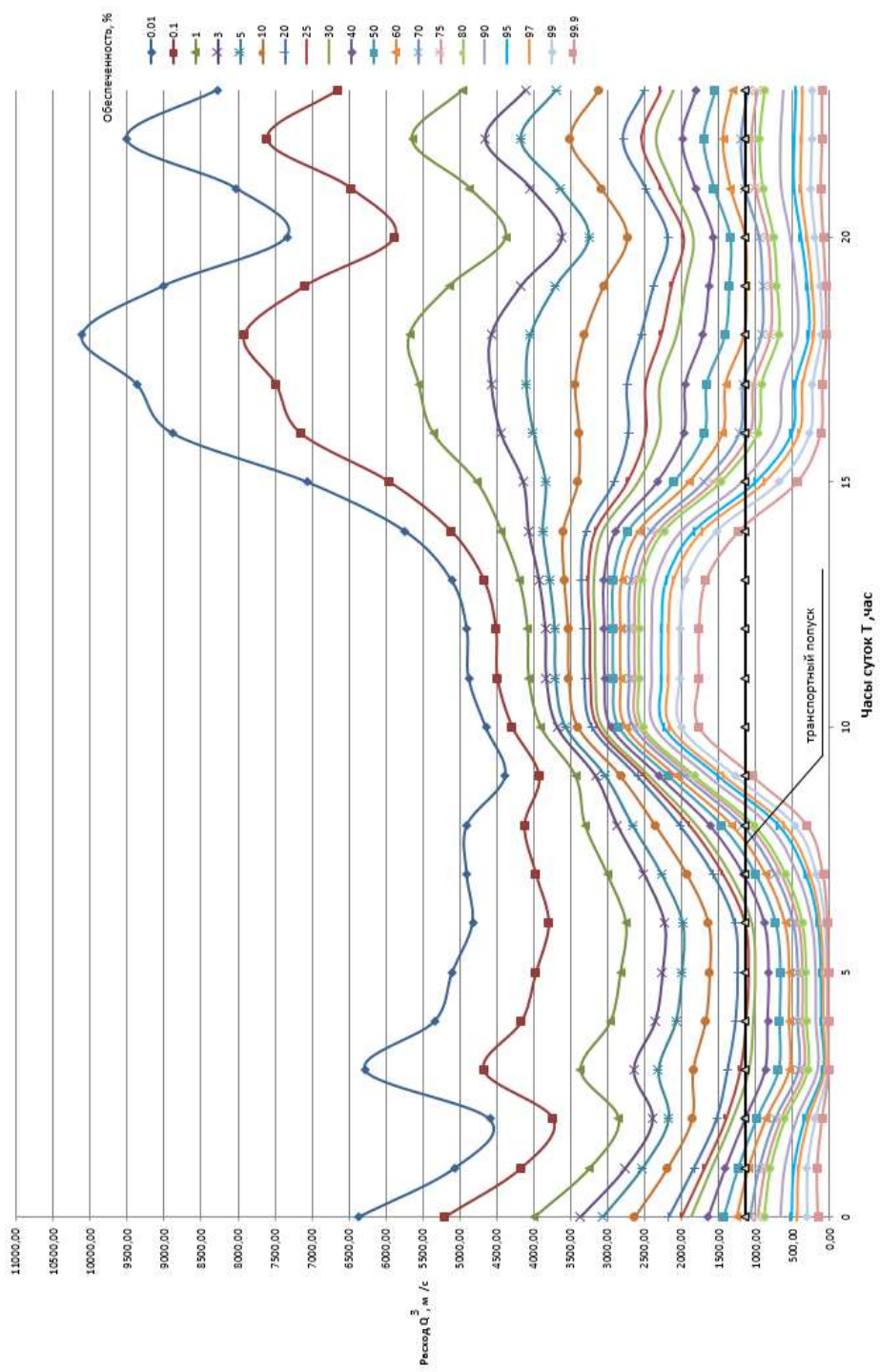


Рис. 3. Графики обеспеченности расходов воды (по часам) различной обеспеченности через ННГЭС в августе 2017 г

Вывод: создание ННГУ решает проблему повышения отметок воды (увеличения глубин) только на участке создаваемого водохранилища. На участке НБ ННГУ ÷ г/п НН, где сохраняется естественный речной сток, возможно дальнейшее снижение отметок УВ (уменьшение глубин);

– *суточная амплитуда колебаний уровней при проектных условиях в створах*

НБ ННГЭС на 0,48 м меньше бытовых,
ВБ ННГУ на 0,38 м меньше бытовых,
НБ ННГУ на 0,61 м выше бытовых,
г/п НН на 0,17 м выше бытовых.

Вывод: на акватории создаваемого водохранилища амплитуда колебаний УВ снижается, чего не скажешь про участок реки, расположенного ниже ННГУ. В НБ ННГУ следует ожидать существенного увеличения амплитуды колебаний УВ, она несколько снизится у г/п НН;

– *расходы воды при проектных условиях в створах*

НБ ННГЭС не меняются,
ВБ ННГУ на 597 м³/с больше ÷ 140 м³/с меньше бытовых,
НБ ННГУ на 597 м³/с больше ÷ 140 м³/с меньше бытовых,
г/п НН на 546 м³/с больше ÷ 143 м³/с меньше бытовых.

Вывод: создавая ННГУ, неравномерность сбрасываемых расходов сохраняется на всем исследуемом участке.

Это говорит о том, что поставленная цель по ликвидации лимитирующего участка в створах НБ ННГЭС ÷ ВБ ННГУ достигается, но вместе с тем, неравномерность сбросов в нижний бьеф ННГУ влечет за собой негативные последствия (высокие скорости, деформации русла и лимитирующие глубины уже в нижнем бьефе ННГУ), вплоть до Нижнего Новгорода.

Используя опыт эксплуатации подобных проблемных участков водных путей, для уменьшения негативной нагрузки на НБ ННГУ можно предложить вариант суточного регулирования водохранилищем, создаваемым низконапорным гидроузлом.

Чтобы выяснить, можно ли при ожидаемых гидрологических условиях на проектируемом гидроузле ввести суточное регулирование стока, проводится эксперимент на модели русловой площадки в лабораторных условиях (рис. 4) на базе гидротехнической лаборатории кафедры водных путей и гидротехнических сооружений ВГУВТ. Цель эксперимента заключается в том, чтобы оценить связь между подаваемыми расходами воды на входе площадки и величиной слоя воды, которые формируются над водосливом в конце площадки; проанализировать наблюдаемые скорости добегаания волны от начального створа к конечному в зависимости от положений подвижной стенки водослива в конце площадки.



Рис. 4. Фото модели русловой площадки

Модель представляет собой участок русла реки (рис. 5). В начальном створе (вход на площадку) установлен водослив Томсона, в конечном створе (выход из нее) – водослив с тонкой стенкой, высоту которой можно регулировать, заглубляя её в паз. В ходе эксперимента определяются характеристики волны попуска: скорости распространения волны и время ее добегаания до конечного створа; формирующийся при каждом опыте уклон свободной поверхности воды, создающийся напор на водосливе - высота слоя воды над порогом водослива.

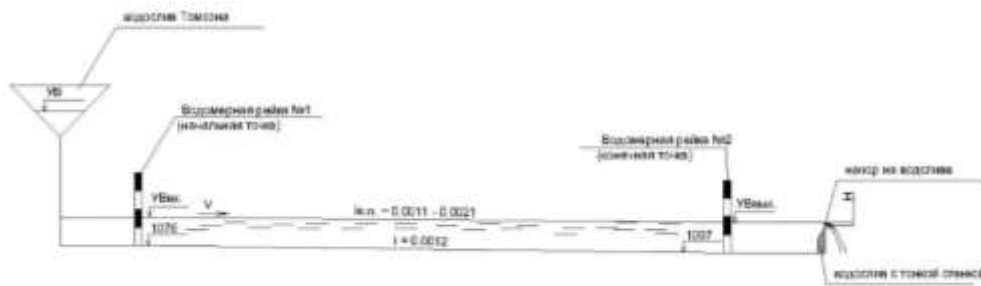


Рис. 5. Схема русловой площадки

Подаваемый расход на водослив Томсона определяется по формуле

$$Q_{\text{вх}} = mH_{\text{вх}}^{5/2} \text{tg}\theta \sqrt{2g}, \quad (1)$$

где m – коэффициент расхода водослива;
 $H_{\text{вх}}$, м – напор на водосливе;
 θ – угол наклона боковой стенки;
 g , м/с² – ускорение свободного падения.

На выходе модели расход рассчитывается по формуле водослива с тонкой стенкой

$$Q_{\text{вых}} = mb\sqrt{2g}H_{\text{вых}}^{3/2}, \quad (2)$$

где m – коэффициент расхода водослива;
 b , м – ширина водослива;
 $H_{\text{вых}}$, м – напор на водосливе с тонкой стенкой.

Результаты эксперимента представлены графиками зависимости средних скоростей добегания волны от подаваемых расходов на входе русловой площадки $v = f(Q)$ и высоты слоя воды на водосливе от подаваемых расходов $H_{\text{вых}} = f(Q)$, рис. 6. Разным цветом показаны осредненные графики экспериментов для трех положений подвижной стенки водослива в конце площадки. Для каждого положения стенки проводилось по несколько опытов с различными значениями подаваемого расхода от меньшего значения к большему. Сначала стенка водослива была полностью утоплена в паз; затем – стенка водослива занимала промежуточное положение; дальше – стенка водослива была максимально поднята.

Как видно из рис. 6, график изменения скорости добегания волны для третьего эксперимента, когда стенка полностью поднята, имеет меньшие значения по сравнению с опытами, когда стенка полностью утоплена в паз или в промежуточном положении. При этом формирующийся напор на водосливе для всех трех опытов практически одинаково меняется в зависимости от подаваемого расхода.

Проведенные опыты показали достаточно тесную связь между подаваемым расходом на входе площадки Q и формирующимся напором на водосливе $H_{\text{вых}}$ на выходе. Полученные в ходе эксперимента данные подверглись корреляционному анализу по программе ФАКТОР [8], целью которого было выявление оценки силы связи между случайными величинами (признаками), которые характеризуют реальный процесс. Теснота связи между напором на водосливе на выходе $H_{\text{вых}}$ и расходами воды на входе $Q_{\text{вх}}$ очень сильная и оценивается коэффициентом корреляции 0,98.

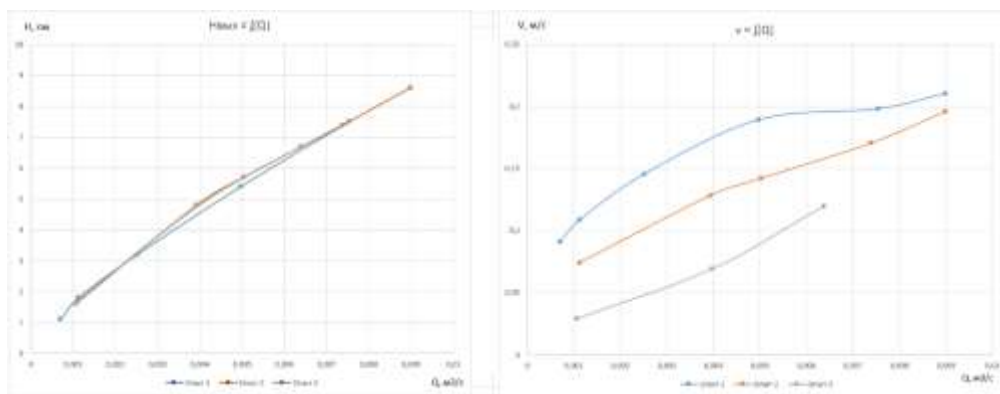


Рис. 6. Графики зависимости $v=f(Q)$ и $H_{\text{вых}}=f(Q)$

4. Обсуждение

Все выше сказанное дает право говорить о том, что единственно возможное решение избежать получения лимитирующих глубин, сгладить неравномерность попусков с целью снижения скоростных характеристик потока и тем самым уменьшить негативную нагрузку на НБ ННГУ можно путем суточного регулирования воды на проектируемом гидроузле в навигационный период. Это сделать необходимо и возможно, поскольку проектируемый гидроузел «не завязан» на энергетике и воды можно сбрасывать столько, сколько этого требуют задачи судопропуска. Для этого требуется определиться с диапазоном расходов регулирования.

Водохозяйственными расчетами [6] установлено, что обеспеченность водохозяйственных показателей в вариантах до строительства низконапорного гидроузла и после его строительства отличаются незначительно, а анализ диспетчерских графиков работы водохранилища ННГУ показал, что при обеспеченности стока 1 – 75 % время на наполнение водохранилища не требуется, так как расходы, проходящие через створ ННГУ соответствуют уровням воды выше 68,0 отметки, и поэтому вся «лишняя вода» проходит транзитом. При больших обеспеченностях стока необходимо время на наполнение водохранилища, максимальное значение которого соответствует 20 сут. при 99 % обеспеченности. Максимальная продолжительность периода опорожнения составляет 10,5 дней при 99 % обеспеченности годового стока, а минимальная 4,6 дней при 1 % обеспеченности годового стока. Анализ показал, что расходы во времени имеют большой разброс.

Проработка путей реализации такого решения и является предметом дальнейшего исследования.

При таком режиме работы ННГУ гарантированные глубины в НБ ННГУ обеспечиваются только при транспортном попуске в 1140 м³/с. Как показано выше, расход в НБ ННГУ не отвечает требованиям обеспечения транспортного попуска, но за счет введения в технологический процесс суточного регулирования может быть увеличен, причем вне зависимости от водности года. Суточное регулирование можно вести за счет кратковременного рационального увеличения объема воды в водохранилище ННГУ, что потребует некоторого кратковременного повышения уровня воды, например, на 0,5 м. В этом случае объем увеличится на 23,4 млн. м³ и составит 177,14 млн. м³.

Заключение:

1. Проведенные на данном этапе исследования автора и анализ работ других ученых и проектировщиков подтверждают необходимость в регулировании расходов воды через водослив ННГУ. Оптимизация расходов воды на выходе может быть достигнута путем рационального усреднения входного гидрографа.

2. Оценка регулирующих возможностей водохранилища с отметкой НПУ, равной 68,0 м БС, показала возможную при определенных условиях нехватку воды в навигационный период для обеспечения судходных глубин в НБ ННГУ.

3. Для определения в каком диапазоне расходов возможно проводить суточное регулирование в створе ННГУ, следует провести водно-балансовые расчеты создаваемого водохранилища при отметке НПУ, равной, например, 68,5 м БС, используя интегральные кривые стока. В дальнейшем, это поможет выработать методические подходы для расчета уровней воды в створе ННГУ при различных попусках через ННГУЭС, и дальше – для подачи в НБ ННГУ возможно более равномерного расхода в течение суток, что положительно скажется на русловом и водном режиме нижнего бьефа. Эта задача осуществима путем разработки алгоритма маневрирования автоматическими затворами на водосливе ННГУ.

Список литературы:

1. Агеев С.О. Анализ проблемных вопросов безопасности судоходства на участке Городец – Нижний Новгород до и после строительства Нижегородского низконапорного гидроузла / С.О. Агеев, М.А. Матюгин // Труды конгресса «Великие реки – 2017». Вып. 6. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 1–4.
2. Строительство Нижегородского низконапорного гидроузла. Этап проектных работ. Инженерно-гидрометеорологические изыскания. 153-038 / ННГУ-ИГИ.ИЗ. – ООО «Техтрансстрой». – Самара, 2018. – 178 с.
3. Фролов, Р.Д. Об улучшении судходного состояния нижнего бьефа Нижегородской ГЭС на р. Волге // Труды Академии проблем водохозяйственных наук РФ «Проблемы русловедения». Вып. 9 / Р.Д. Фролов – М., 2003. – 186–194 с.
4. Шестова, М.В. Русловой режим нижнего бьефа Нижегородской ГЭС // Сборник трудов «Водные пути и гидротехнические сооружения», вып. 297 / М. В. Шестова. – Н. Новгород: ВГАВТ, 2001.
5. Агеев, С.О. Анализ изменений навигационных расходов через Нижегородскую ГЭС в навигацию 2017 года и рекомендации по улучшению водного режима участка р. Волги ниже створа Нижегородского низконапорного гидроузла (ННГУ) / С.О. Агеев // Труды конгресса «Великие реки – 2018». Вып. 7. – Н. Новгород: Изд – во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2018. – с. 1–7.
6. Ситнов, А.Н. Обоснование параметров обеспеченности водохозяйственных балансов и режима работы водохранилища Нижегородского низконапорного гидроузла / А.Н. Ситнов, Н.В. Кочкурова, Д.А. Мильцын // Вестник ВГАВТ. Вып. 50. – Н.Новгород: Изд-во ФГБОУ ВО «ВГУВТ», 2017. – с. 23–31.
7. СП 33-101.2003. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. Одобрен постановлением Госстроя России №218 от 26.12.2003. – М., 2004. – 108 с.
8. Шихалев, А.М. Корреляционный анализ. Непараметрические методы: Учебно-методическое пособие / А.М. Шихалев. – Казань: Казан. ун-т, 2015. – 58 с.

DRAIN REGULATION OF LOW-HEADED HYDRAULIC UNIT

Sergey O. Ageev,

Administration of the Volga basin of inland waterways, 603001, Nizhniy Novgorod, Rozhdestvenskaya, 21 B, e-mail: gg6258@yandex.ru

Abstract. The article considers possible problems for shipping, which may arise after the construction and commissioning of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. By analyzing the available data on the change in navigation expenses through the Nizhny Novgorod hydroelectric power station and the predicted calculation of the water regime in the alignment of the created Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric system, it is ascertained in the article whether the navigable dimensions in depth are ensured in the section above and below the alignment of the NNSU during the navigation period. In order to determine the possibility of regulating runoff on a spillway of the Nizhny Novgorod State University, an experiment is set up at the Volga State University of Water Transport laboratory, during which the speed and time parameters of the water flow are established. The article presents the results of the work.

Key words: water discharges irregularity, water discharge, transport release, hydrological forecast, supply curve, flow regulation.

References:

1. Ageev S.O., Matyugin M.A. «Analysis of the problematic issues of shipping safety on the Goro-dets-Nizhny Novgorod section before and after the construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydraulic system» V sbornike: Trudy 19-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2017». Web. 07 Sep. 2019 <<http://www.вф-река-море.рф/>>
2. Construction of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex. Stage of design work. Hydrometeorological engineering surveys. 153-038 / NNGU-IGI. – LLC Tech-Transstroy. – Samara, 2018. 178 p.
3. Frolov, R.D. «On improving the navigable condition of the downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station on the river. Volge», Proceedings of the Academy of Problems of Water Economics of the Russian Federation «Problems of the Russian Language». Vol. 9 / R.D. Frolov – M., 2003. –186–194 s.
4. Shestova, M.V. «The riverbed regime of the downstream of the Nizhny Novgorod hydroelectric station», Collection of works «Waterways and hydraulic structures», vol. 297 / M.V. Shestova. – N. Nov-Gorod: VGAVT, 2001.
5. Ageev, S.O. «Analysis of changes in navigation costs through the Nizhny Novgorod Hydroelectric Power Station in the navigation of 2017 and recommendations for improving the water regime of the r. Volga below the alignment of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex (NNSU)» V sbornike: Trudy 20-go mezhdunarodnogo nauchno-promyshlennogo foruma «Velikie reki-2018».
6. Sitnov, A.N. «Substantiation of the parameters of the supply of water balances and the operation mode of the reservoir of the Nizhny Novgorod low-pressure hydroelectric complex» Vestnik Volzhskoy gosudarstvennoy akademii vodnogo transporta 50 (2017): p. 23–31.
7. SP 33-101.2003. Determination of the main calculated hydrological characteristics. It is approved by the resolution of the Gosstroy of Russia No. 218 of 12/26/2003. – M., 2004. – 108 p.
8. Shikhalev, A.M. «Correlation analysis. Nonparametric methods: educational-methodical manual», Kazan: Kazan. Univ., (2015): 58 p.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ / INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Сергей Олегович Агеев, главный геолог (заместитель начальника) службы главного маркшейдера, Федеральное Бюджетное учреждение «Администрация Волжского бассейна внутренних водных путей» (ФБУ «Администрация Волжского бассейна»), 603001, г. Нижний Новгород, ул. Рождественская, 21 «Б», e-mail: gg6258@yandex.ru

Sergey O. Ageev, Chief geologist (deputy chief) of the service of the chief surveyor, Administration of the Volga Basin, 21 «B», Rozhdestvenskaya st, Nizhniy Novgorod, 603001

Статья поступила в редакцию 06.02.2020 г.