

# Строительство низконапорных гидроузлов на судоходных реках



**Г. Л. Гладков,**  
д. т. н., профессор,  
зав. кафедрой водных  
путей и водных изысканий  
Государственного универ-  
ситета морского  
и речного флота  
им. адмирала  
С. О. Макарова



**В. М. Католиков,**  
к. т. н., ведущий научный  
сотрудник Государст-  
венного гидрологического  
института



**Л. А. Шурухин,**  
директор по проектной  
и научной работе  
АО «Акватик»

Стратегия развития внутреннего водного транспорта РФ на период до 2030 г. [1] предусматривает сокращение доли протяженности водных путей, лимитирующих пропускную способность Единой глубоководной системы (ЕГС) европейской части России. На многих участках водных путей по различным причинам уменьшились габариты судовых ходов [2]. Для реализации поставленных задач на разных судоходных участках в зависимости от их гидроморфологического режима следует применять те или иные подходы и инженерные решения.

## Гидравлика и морфология русел судоходных рек

В настоящее время пропускная способность ЕГС ограничена недостаточными габаритами судовых ходов на отдельных участках Волго-Балтийского и Волго-Донского водных путей, на транзитных судоходных участках Камы, Волги, нижнего Дона, а также на других реках. Основные затруднения для судоходства на зарегулированных реках представляют собой участки водных путей, расположенные в нижних бьефах гидроузлов. Вследствие перехвата твердого стока подпорными сооружениями гидроузлов на этих участках развиваются необратимые эрозионные процессы, понижаются отметки дна и уровней воды.

Интенсивность гидроморфологических изменений характеристик речного потока и русла реки в нижнем бьефе гидроузла изменяется с течением времени. Наиболее активны эрозионные процессы после перекрытия русла реки плотиной. Со временем интенсивность переформирования затухает, однако эрозион-

ные процессы распространяются вниз по течению реки. В ряде случаев ситуация в нижних бьефах гидроузлов (например, на реке Обь ниже Новосибирской ГЭС) усугубляется интенсивной добычей нерудных строительных материалов.

Ниже гидроузлов эрозионные процессы происходят на всех зарегулированных реках, вне зависимости от их географического положения, водности и состава грунтов донных отложений [3, 4]. В нижних бьефах гидроузлов повсеместно произошли необратимые изменения гидрологического и руслового режимов, что привело к нарушению условий судоходства, ухудшению экологической ситуации в бассейнах крупных судоходных рек и затронуло интересы всех водопользователей.

Другая группа водных путей — свободные реки, гидроморфологический режим которых был изменен вследствие инженерных мероприятий. Например, этому способствовало значительное переуглубление перекаатов при достижении гарантированной судоходной глубины.



Однако в подавляющем большинстве случаев превалировало влияние на гидрологический и русловой режимы рек добычи нерудных строительных материалов из русловых карьеров.

В наши дни на ряде судоходных рек РФ (на Вятке, Белой, Оке, Уфе, Вычегде, Томи, верхней Лене, верхнем Дону и др.) проявились неблагоприятные экологические последствия инженерных мероприятий. Указанные изменения обусловлены прогрессирующим понижением отметок дна и уровней воды. Наиболее сильно изменения режима реки проявляются в меженьный период, при малых расходах воды.

Сегодня перспектива строительства новых крупных гидроузлов комплексного назначения на урбанизированных территориях не просматривается. Кроме того, нет возможности наполнения ряда существующих водохранилищ до проектных отметок. Поэтому необходимо изучить варианты восстановления уровня режима рек, чтобы обеспечить судоходство на внутренних водных путях с использованием относительно недорогих и эффективных русловых низконапорных судоходных сооружений.

В соответствии с природоохранными требованиями проектируемые сооружения не должны перекрывать речную пойму и препятствовать свободному прохождению стока воды и донных наносов в весеннее половодье. Строительство низконапорных сооружений будет способствовать восстановлению уровней воды в меженьный период, создаст условия для оздоровления водного режима и экологической ситуации в бассейне реки. При этом количество потенциальных участников водохозяйственного комплекса, заинтересованных в реализации новых инвестиционных проектов по транспортному шлюзованию водных путей, может существенно увеличиться.

Возведение таких сооружений можно рекомендовать в нижних бьефах гидроузлов и на участках свободных рек, подверженных влиянию антропогенных факторов. В этих случаях традиционные методы обеспечения судоходных условий: дноуглубление и выправление — оказываются недостаточно эффективными. Мероприятия по выправлению русла реки активизируют эрозионные процессы и не могут привести к восстановлению пониженных отметок уровней воды. Дноуглубление будет способствовать дополнительной эрозии и дальнейшему понижению меженьных уровней воды.

Использование традиционных методов обеспечения судоходных условий в пределах установленных значений гидравлически допустимых судоходных глубин целесообразно сохранить на свободных реках, где уровни воды в многолетнем разрезе не изменились [5].

### **Строительство и эксплуатация низконапорных сооружений**

В России для развития водного транспорта во второй половине XVIII века началось массовое строительство судоходных низконапорных сооружений. Они возводились на Москве-реке, Оке, Дону и Северском Донце, в бассейне Северной Двины и др. На реках были построены каскады судоходных гидротехнических сооружений и созданы новые шлюзованные системы. У истоков проектирования и строительства стояли крупнейшие инженеры-гидротехники того времени. Ряд таких сооружений на внутренних водных путях успешно эксплуатируется на протяжении столетия.

Заслуживает особого внимания комплексный проект транспортного шлюзования, осуществленный в бассейне нижнего Дона. Транспортное гидротехническое строительство в этом регионе началось в первые годы XX века, чтобы обеспечить доставку каменного угля, строительных материалов и зерна из Донбасса в регионы Азово-Черноморского бассейна. В 1903 г. Министерством путей сообщения было принято решение о необходимости шлюзования Северского Донца.

Разработчиком проекта стал выпускник Института путей сообщения гидротехник Н. П. Пузыревский. В 1903–1904 гг. им были проведены подробные изыскания на Северском Донце, а к 1908 г. подготовлен проект по строительству каскада низконапорных гидроузлов. Предусматривались три очереди строительства. В случае реализации проекта появлялась возможность организации судоходства по Северскому Донцу от Дона до Белгорода и Харькова судами с осадкой до 1,7 м.

Строительство первой очереди Северско-Донецкой шлюзованной системы — от устья Северского Донца до станции Гундоровской (в районе города Донецка) — началось в мае 1911 г. и было закончено к осени 1913 г. В 1914 г. приступили к строительству Кочетовского гидроузла на Дону. Официальное открытие Северско-Донецкой шлюзованной системы состоялось 5 июля 1914 г., за несколько

недель до начала Первой мировой войны. Кочетовский гидроузел был введен в эксплуатацию в начале навигации 1920 г. Сооружения на Северском Донце и Кочетовский гидроузел успешно эксплуатируются до сих пор.

Систематизированные материалы исследований по работе низконапорных гидроузлов в бассейне реки Дон в начальный период их эксплуатации опубликованы в работах Б. В. Полякова [6]. Из полученных результатов следует, что построенные сооружения успешно решают задачу обеспечения судоходства на водных путях. Низконапорные гидроузлы на реках эффективны с позиций гидроморфологии, так как обеспечивают беспрепятственный пропуск паводковых вод и влекомых наносов через створы сооружений, а их влияние на русловой режим реки, качество воды и экологию бассейна минимально.

К началу XX века в России был накоплен бесценный опыт создания и эксплуатации указанных сооружений. Основные конструктивные решения, реализованные в проектах гидроузлов, отвечали требованиям времени и доказали свою результативность в ходе последующей эксплуатации судоходных сооружений. Между тем сегодня в нормативной базе, используемой для проектирования гидротехнических сооружений, нет упоминания о таких гидроузлах.

В наши дни идея создания каскадов аналогичных сооружений для восстановления нарушенного уровня режима на судоходных реках может быть востребована и успешно развиваться в интересах широкого круга водопользователей. Наряду с обеспечением судоходства указанные проекты будут способствовать улучшению гидрологического и руслового режимов реки, качества воды и условий хозяйственного использования пойменных территорий, развитию рыбного хозяйства, малой энергетики, водного туризма и других отраслей на прилегающих территориях.

Для реализации проектов низконапорных гидроузлов на судоходных реках необходимо разработать инженерные и технические решения, включающие использование современных материалов и новых технологий, а также усовершенствовать нормативно-техническую базу для проектирования, строительства и эксплуатации гидроузлов с учетом характеристик гидрологического режима реки и специфики развития руслового процесса.

### Гидроморфологическое обоснование сооружения низконапорных гидроузлов

В природных условиях речной поток транспортирует влекомые и взвешенные наносы в русле реки. Донные наносы в ходе своего перемещения вниз по течению реки создают многообразные подвижные русловые формы, определяющие морфологический облик русла и его поймы. Гидравлические и морфометрические показатели речных потоков характеризуются статистической устойчивостью, обусловленной механизмом взаимодействия текущей воды с деформируемым руслом реки. Проведение инженерных мероприятий на реках приводит к нарушению условий устойчивости системы речной поток – подвижное русло реки.

Гидроморфологическая теория руслового процесса [7] в зависимости от степени воздействия инженерных сооружений на определяющие факторы руслового процесса подразделяется на активные сооружения I и II категории, и на пассивные сооружения. Строительство сооружений I категории приводит к одностороннему изменению характеристик одного или нескольких определяющих факторов руслового процесса и смене его типа. Реализация объектов гидротехнического строительства необратимо нарушает устойчивость системы поток–русло и однородность гидрологических рядов, изменяет условия формирования твердого стока и транспорта наносов на участке реки в зоне влияния сооружения. Так, например, глухие плотины, перехваты-

вающие твердый сток реки, относятся к сооружениям I категории, влияние которых приводит к необратимым изменениям в жизни реки.

Воздействие сооружений II категории проявляется в локальном изменении некоторых характеристик определяющих факторов. Такие объекты, как правило, не вызывают коренной перестройки типа руслового процесса, они способствуют лишь развитию русловых образований на уровне мезоформ и микроформ. При соблюдении определенных правил, которые следует учитывать при проектировании и строительстве низконапорных гидроузлов, представляется возможным отнести рассматриваемые сооружения ко II категории.

Плановая компоновка и основные конструктивные решения проектируемых гидроузлов должны обеспечить транзитный пропуск донных наносов через створ сооружения с учетом закономерностей их движения. При этом выбор створа расположения низконапорного гидроузла, места расположения водопропускных и судоходных каналов, а также конструкции водосбросных затворов должен осуществляться на основании анализа динамики средних форм и макроформ речного русла.

Многолетний опыт успешной эксплуатации низконапорных гидроузлов, построенных в первой половине прошлого столетия, свидетельствует, что в прежние годы учитывалась необходимость обеспечения транзита донных наносов через створ гидроузла. Между тем в наши дни при проведении инженерно-гидрометеорологических изысканий не предусматривается изучение закономерностей движения донных наносов, нет данных по гранулометрическому составу донных наносов, расчетов их годового стока и анализа динамики средних русловых форм на участке. Такие упущения приводят к существенному снижению качества проектных проработок.

В современных проектах гидроузлов место расположения водосбросного сооружения выбирается таким образом, чтобы с учетом технологии строительных работ обеспечить эффективный и гидравлически выгодный пропуск воды через створ во все фазы водного режима. Закономерности развития руслового процесса и условия транспорта донных наносов при этом не учитываются.

Глухую земляную плотину зачастую располагают в вершине хорошо развитой излучины реки, перекрывая

участок русла с максимальными значениями глубины, а водопропускной и судоходный каналы — на внутреннем пойменном массиве излучины и на ее пляже у выпуклого берега, т. е. в местах максимального отложения донных наносов в паводок. Не оцениваются возможные формы движения донных наносов в водоотводящем канале, зависящие от его геометрических параметров и определяющие те гидравлические сопротивления движению водного потока в канале, которые влияют на условия работы затворов. Смена бесструктурного транспорта донных наносов на грядовое их движение (рис. 1) может привести к скачку гидравлических сопротивлений в канале и к резкой смене гидравлических условий в нижнем бьефе.

Такие объекты, реализованные без достаточного гидроморфологического обоснования проектных решений, создают серьезные затруднения при эксплуатации водопропускных и судоходных сооружений гидроузла.

Для обеспечения надежной работы новых низконапорных гидроузлов на судоходных реках необходимо изучать закономерности русловых процессов и параметров стока донных наносов на том участке, где размещаются основные сооружения гидроузла. Это потребует проведения специальных полевых работ и современного гидроморфологического анализа руслового процесса в рамках программ инженерно-гидрометеорологических изысканий. Механизм пропуска донных наносов через створ гидроузла нужно оценивать с привлечением результатов математического и физического моделирования деформаций речного дна и параметров движения донных наносов в водопропускных каналах.

Эти вопросы необходимо прорабатывать на ранних стадиях проектирования, что позволит учесть гидроморфологические требования при подготовке основных проектных решений. При этом обоснованно должны быть решены такие вопросы, как выбор створа сооружения, допустимая степень стеснения в нем русла, назначение отметки порога водослива и нормального подпорного уровня воды, геометрические параметры водоподводящих и водоотводящих каналов, режим работы водохранилища и др.

Указанные недостатки современной технологии проектирования низконапорных гидроузлов на судоходных реках в части ее гидроморфологического обо-



Рис. 1. Грядовая форма движения донных наносов в нижнем бьефе гидроузла (экспериментальные исследования на физической модели)

снования обусловлены несовершенством нормативной базы в сфере проектной деятельности. По мнению авторов, назрела настоятельная необходимость создать специальный свод правил по проектированию таких сооружений, в котором вопросы учета руслового процесса должны быть разработаны на современном уровне.

### Гидравлические исследования Багаевского гидроузла на реке Дон

Первым объектом, при проектировании которого удалось в значительной степени реализовать представленные раньше идеи и рекомендации, стал Багаевский гидроузел на нижнем Дону, строительство которого началось в текущем году. В ходе проектных и изыскательских работ авторами была получена детальная информация о реальных изменениях гидрологического и руслового режимов нижнего Дона в результате эксплуатации каскада вышерасположенных гидроузлов и осуществления хозяйственной деятельности в бассейне реки [8]. На основании материалов исследований установлены проектные характеристики создаваемого водохранилища и разработаны рекомендации по восстановлению водного режима на нижнем Дону.

В работе использовались результаты математического и гидравлического моделирования проектируемых сооружений. Гидравлические расчеты выполнялись с использованием 2D-гидродинамической модели, основанной на решении методом конечных элементов системы уравнений движения и неразрывности в приближении мелкой воды.

Численные методы в речной гидравлике позволяют с достаточной степенью надежности решать задачи о распределении средних на вертикали скорости течения в речных потоках и моделировать влияние проектируемых мероприятий на скоростной режим и уровни воды.

Вместе с тем сегодня отдельные вопросы речной гидравлики, характеризующие внутреннюю структуру турбулентного взвесенесущего потока, параметры крупномасштабной турбулентности, движение влекомых наносов и русловые переформирования, в таких моделях не решаются либо решаются неудовлетворительно. При проектировании ответственных сооружений на водных объектах дополнительно проводятся гидравлические исследования на крупномасштабных моделях. Методология проектирования и строительства жестких пространственных гидравли-

ческих моделей разработана в Государственном гидрологическом институте (ГГИ) в ходе проведения многолетних экспериментальных исследований. Методика гидравлического моделирования прошла успешную апробацию [9] при исследовании многих гидротехнических сооружений и инженерных мероприятий на водных объектах.

В рамках проекта Багаевского гидроузла были проведены экспериментальные исследования на пространственной гидравлической модели участка реки Дон и сооружений Багаевского гидроузла, построенной в масштабе 1:100 в русловой гидравлической лаборатории ГГИ. При строительстве модели участка реки Дон были использованы материалы инженерных изысканий и проектные решения по основным сооружениям Багаевского гидроузла.

Все экспериментальные исследования проводились в русловой гидравлической лаборатории ГГИ с использованием парка ее измерительной техники и оборудования. Общий вид построенной гидравлической модели приведен на рис. 2.

Гидравлические исследования на модели проводились для нескольких вариантов состояния русла, соответствующих различным этапам строительства запроектированных сооружений. Анализ материалов гидравлических исследований на модели Багаевского гидроузла подтвердил высокую эффективность и обоснованность основных проектных инженерных решений. Были внесены отдельные корректировки, способствующие повышению безопасности и надежности работы гидроузла.

### Нормативно-техническое обеспечение строительства низконапорных гидроузлов

В настоящее время основополагающим нормативным документом при проектировании гидроузлов служит СП 58.13330.2012 «Гидротехнические сооружения. Основные положения». Данный свод правил ориентирован на проектирование крупных гидроузлов комплексного назначения, оказывающих существенное воздействие на русловую режим реки. При строительстве таких сооружений создаются большие площади затопления водохранилища, способные осуществлять многолетнее и сезонное регулирование речного стока в интересах широкого круга водопользователей.

В случае строительства низконапорных гидроузлов на судоходных реках создаются водохранилища руслового типа без затопления пойменных территорий. При этом степень воздействия низконапорных гидроузлов на сезонное распределение стока минимальна, а основной эффект от создания каскада подпертых бьефов по длине реки заключается в обеспечении необходимого уровня режима.

Применительно к практике проектирования низконапорных гидроузлов ряд положений СП 58: необходимость определения границы зоны затопления — изъятия земель под водохранилище, указания о необходимости пропуска расчетных максимальных расходов воды через основные водосбросные сооружения гидроузла — избыточен. Это приводит к необоснованному завышению стоимости строительства сооружений.

В действующих нормативных документах даны необходимые рекомендации

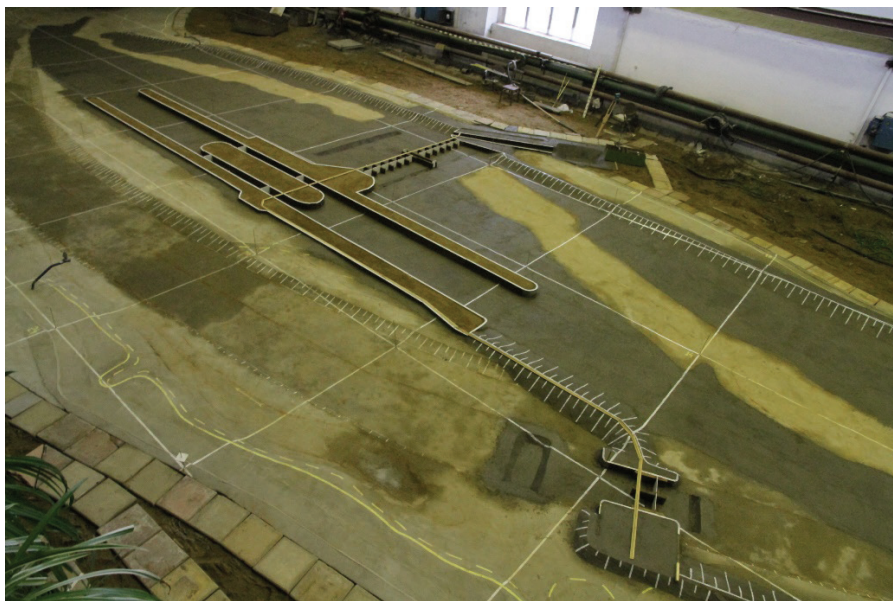


Рис. 2. Гидравлическая модель Багаевского гидроузла на реке Дон: общий вид

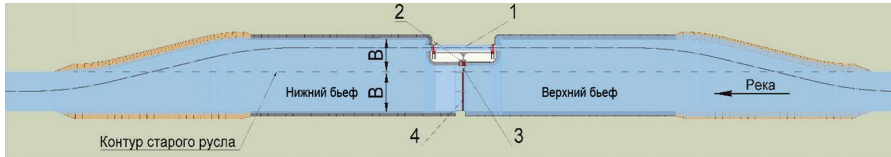


Рис. 3. Типовая схема компоновки низконапорного гидроузла: 1 – судоходный шлюз; 2 – здание центрального пульта управления (ЦПУ); 3 – малая ГЭС; 4 – водосливная плотина

по проектированию гидротехнических сооружений: судоходного шлюза, водосборной и глухой плотин и др. Между тем ни в одном из действующих нормативных документов, применяемых на обязательной основе, нет конкретных рекомендаций по проектированию компоновки основных сооружений гидроузла в целом с учетом его гидроморфологического обоснования. Эти вопросы нужно расценивать как определяющие при создании на судоходных реках низконапорных гидроузлов для обеспечения их эксплуатационной надежности.

Поэтому на практике, несмотря на очевидность принимаемых проектных решений с точки зрения инженеров, противоречие или отсутствие явных указаний в положениях основного нормативного документа по проектированию гидротехнических сооружений СП 58 вызывает обоснованные вопросы при прохождении государственной экспертизы проектной документации, а в отдельных случаях ее успешное прохождение становится невозможным.

С учетом опыта эксплуатации отечественных и зарубежных объектов предложена возможная типовая схема компоновки низконапорного гидроузла (рис. 3, 4).

В состав гидроузла входят: однокамерный судоходный шлюз с направляющими

плалами; разборная водосливная плотина с пролетами, перекрываемыми клапанными затворами с пневматическим или гидropневматическим приводом; малая ГЭС, здание ЦПУ и подводящий/отводящий каналы.

Судоходный шлюз без стенки падения выполнен с головной системой питания через клинкет в рабочих воротах верхней и нижней голов. Рабочие ворота приняты плоскими откатными, что обеспечивает минимальные строительные объемы голов шлюза. Верхние ворота при этом выполняют функцию аварийных и ремонтных ворот. Клапанные затворы водосборной плотины в навигационный период смогут обеспечить пропуск транзитных расходов воды без значительных размывов в нижнем бьефе. В межнавигационный период затворы полностью укладываются на порог плотины, обеспечивая бесподпорный режим работы гидроузла и всего участка водного пути.

Рекомендуется установить сезонный режим эксплуатации такого гидроузла, при котором навигация начинается после прохождения весеннего половодья, в период которого сооружения гидроузла могут быть затоплены без ущерба для дальнейшей эксплуатации.

Таким образом, для разработки программы восстановления качественных характеристик внутренних водных путей, которую предстоит подготовить с целью реализации Стратегии развития внутреннего водного транспорта РФ, на каждом судоходном участке необходимо проработать возможные варианты инженерных решений с учетом перспективы развития судоходства и гидроморфологической ситуации в бассейне реки. Один из возможных путей решения проблемы по обеспечению судоходства на реках с нарушенным уровнем режимом — строительство каскадов низконапорных гидроузлов.

На основании анализа многолетнего опыта эксплуатации существующих низконапорных гидроузлов на судоходных реках России и после проведения специальных гидравлических исследований необходимо сформулировать основные требования, которые следует учитывать

при проектировании, строительстве и эксплуатации таких сооружений. Они должны стать своего рода рекомендацией для разработки нового нормативного документа в области проектирования.

Разработка и внедрение нового нормативно-технического документа — свода правил по проектированию низконапорных гидроузлов на судоходных реках — позволит существенно упростить процесс проектирования таких сооружений и сократить затраты на их строительство. ■

## Литература

1. Стратегия развития внутреннего водного транспорта Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства Российской Федерации от 29 февраля 2016 г. № 327-р.
2. Гладков Г. Л. Обеспечение условий судоходства на внутренних водных путях // Транспорт РФ. 2014. № 1. С. 8–14.
3. Babiński, Habel 2015. Międzynarodowa Droga Wodna E40. Stan i możliwości zagospodarowania, Global Compact w Polsce, Raport Żegluga Śródlądowa – Wisła, Rozdz. II, Bezpieczeństwo ekologiczne, s. 212–217.
4. Гладков Г. Л., Чалов Р. С. Гидроморфология русел судоходных рек. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2016. — 432 с.
5. Руководство по улучшению судоходных условий на свободных реках. СПб. : ЛИВТ, 1992. — 312 с.
6. Поляков Б. В. Гидрология бассейна реки Дона. Ростов на Дону: Управление главного инженера строительства Волго-Дона, 1930. — 344 с.
7. Кондратьев Н. Е., Попов И. В., Снищенко Б. Ф. Основы гидроморфологической теории руслового процесса. Л. : Гидрометеоздат, 1982. — 272 с.
8. Гладков Г. Л., Католиков В. М., Шурухин Л. А. Обеспечение судоходных условий на нижнем Дону // Сб. матер. юбилейной межд. науч.-практ. конф., посвященной 110-летию создания гидротехнической лаборатории им. проф. В. Е. Тимонова. В 2 т. СПб. : Изд-во ГУМРФ им. адм. С. О. Макарова, 2017. Т. 1. С. 196–216.
9. Клавен А. Б., Копалиани З. Д. Экспериментальные исследования и гидравлическое моделирование речных потоков и руслового процесса. СПб. : Нестор-История, 2011. — 544 с.

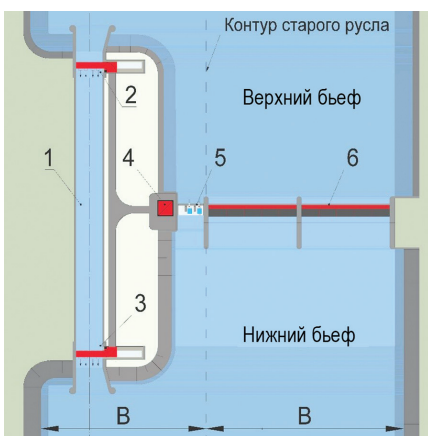


Рис. 4. Фрагмент основных сооружений низконапорного гидроузла: 1 – камера судоходного шлюза; 2 – верхняя голова с откатными воротами; 3 – нижняя голова с откатными воротами; 4 – здание центрального пульта управления (ЦПУ); 5 – малая ГЭС; 6 – водосливная плотина