

**КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ РЕШЕНИЯ ПЕРЕМЫЧЕК –
ВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ
И ИХ СОПРЯЖЕНИЯ С ГРУНТОВЫМ ОСНОВАНИЕМ**

С. С. Рекунов, Н. В. Купчикова, А. А. Чураков

Рекунов Сергей Сергеевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Строительная механика», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (8442) 96-98-17; e-mail: rekunoff@mail.ru;

Купчикова Наталья Викторовна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, здания и сооружения», Российский университет транспорт» (РУТ МИИТ); старший научный сотрудник, научно-исследовательский институт городского транспорта города Москвы «МосТрансПроект», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Чураков Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Строительные конструкции, надежность и основания сооружений», Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Российская Федерация, тел.: + 7 (8442) 96-99-90; e-mail: alexei.churakov@yandex.ru

В статье в рамках изучения влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек судоходных гидротехнических сооружений на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях выполнен анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС и способов перекрытия русла реки как процессов постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки, а также выявлены критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта для отсыпки ядра грунтовой плотины. На следующем этапе будет проведено исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования, анализ ее фильтрации методом конечных элементов при динамических воздействиях и разработаны предложения для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки.

Ключевые слова: конструктивно-технологические решения, перемычки, временные гидротехнические сооружения, сопряжения с грунтовым основанием.

**STRUCTURAL AND TECHNOLOGICAL SOLUTIONS OF JUMPERS –
TEMPORARY HYDRAULIC STRUCTURES AND THEIR INTERFACE WITH THE SOIL BASE**

S. S. Rekunov, N. V. Kupchikova, A. A. Churakov

Rekunov Sergey Sergeevich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor the Department of Structural Mechanics, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, phone: + 7 (8442) 96-98-17; e-mail: rekunoff@mail.ru;

Kupchikova Natalya Viktorovna, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Buildings and Structures, Russian University of Transport (RUT MIIT); Senior Researcher, Research Institute of Urban Transport of the City of Moscow "MosTransProject", Moscow, Russian Federation; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Churakov Aleksey Aleksandrovich, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Building Structures, Foundations and Reliability of Structures, Volgograd State Technical University, Volgograd, Russian Federation, phone: + 7 (8442) 96-99-90; e-mail: alexei.churakov@yandex.ru

In the article, as part of the study of the influence of structural and technological solutions for the device of bridges of navigable hydraulic structures on filtration processes and the stability of the embankment of the core of the dam under operational influences, the following is performed analysis of structural and technological solutions for the device of bridges of the SGTS, and analysis of methods for blocking the riverbed, as processes of gradual compression of the flow until the appearance of flow velocities that erode the riverbed and the filling material, and also criteria have been identified to ensure the filtration strength of the soil for filling the core of a soil dam. At the next stage, a study will be conducted of the potential destruction of the bulkhead when calculating for the main combination of loads using numerical modeling, an analysis of its filtration using the finite element



method under dynamic effects, and proposals will be developed to eliminate the accumulation of filtered water through the bulkhead body.

Keywords: structural and technological solutions, jumpers, temporary hydrotechnics.

Введение

В Российской Федерации расположено более 350 судоходных гидротехнических сооружений (СГТС), отнесенных к критически важным объектам Российской Федерации, которые подлежат декларированию безопасности в соответствии с Федеральным законом от 21 июля 1997 года № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» [2].

По состоянию на 01.01.2024 СГТС имеют следующие уровни безопасности [1]:

- нормальный – 45,2 %;
- пониженный – 46,1 %;
- неудовлетворительный – 8,4 %;
- опасный – 0,3 %.

На внутренних водных путях РФ расположено 741 судоходное гидротехническое сооружение, сосредоточенное в основном в европейской части страны. В его число входят 108 шлюзов, 11 гидроэлектростанций, 8 насосных станций, 1 судоподъемник, 11 аварийно-заградительных ворот, 31 водоспуск, 128 каналов, 115 дамб, 93 плотины и прочее – 235 (рис. 1) [1].

В целях обеспечения надежной и безаварийной работы гидротехнических сооружений и обеспечения безопасности судоходства на внутренних водных путях проводятся мероприятия по их реконструкции и капитальному ремонту (рис. 2) [1, 3].

Для замены рабочих двустворчатых ворот (нижний бьеф) судоходных шлюзов и подъемно-опускных ворот (верхний бьеф) предусмотрены ремонтные ворота, на некоторых гидротехнических сооружениях предусматриваются аварийно-ремонтные ворота. При длительной эксплуатации шлюза, а также попеременного воздействия различных атмосферных условий (водной и воздушной) на металлических конструкциях появляется коррозионный износ (рис. 3) [4].

Значения предельно-допустимых износов силовых элементов ворот и затворов судоходных шлюзов, как правило, устанавливаются в размере 15 % от проектной толщины [5, 6].

Последняя во всех случаях не должна быть меньше расчетного значения, обеспечивающего необходимые запасы прочности по конструкции [6, 7, 8].

Цель исследования – изучение влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС на фильтрационные

процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях.

Поставленная цель достигается посредством решения следующих задач:

- анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек;
- выявление критериев, обеспечивающих фильтрационную прочность грунта для отсыпки ядра грунтовой плотины;
- анализ способов перекрытия русла реки как процессов постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки;
- исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования;
- анализ фильтрации перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях;
- разработка предложений для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки.

Методология

Для определения фактического состояния износа металлоконструкции в соответствии с п. 5.1 СП 13-102-2003 производится обследование в три этапа (подготовительные работы; предварительное (визуальное) и детальное (инструментальное)), на основании которого разрабатывается технический отчет об их состоянии.

Ремонтные ворота состоят из разного количества секций, причем нижняя может отличаться по размерам конструкции от остальных. Остальные секции являются взаимозаменяемыми, что позволяет в зависимости от уровня бьефа манипулировать высотой ворот. Замена ремонтных заградителей является одной из самых трудоемких, поскольку для этого необходимо осушить места проведения работ. Осуществлять работы с помощью водолазного расчета считается нецелесообразным с точки зрения трудозатрат и экономической составляющей, так как необходимо их проводить в межнавигационный период для возможности функционирования шлюза в обычном режиме с целью обеспечения судопропуска, с чем связано зимнее удорожание, а также сложности в подводных сварочных и бетонных работах.

Для осушения места работ следует перекрыть русла реки, что представляет собой строительный процесс, при котором бытовое русло перегораживается полностью [10].



Рис. 1. Состав гидротехнических сооружений



Рис. 2. Сроки эксплуатации гидротехнических сооружений



Рис. 3. Общий вид судоходного шлюза:

НБ – нижний бьеф, ВБ – верхний бьеф, РДВ – рабочие двустворчатые ворота, ПОВ – подъемно-опускные ворота, РВ – ремонтные ворота

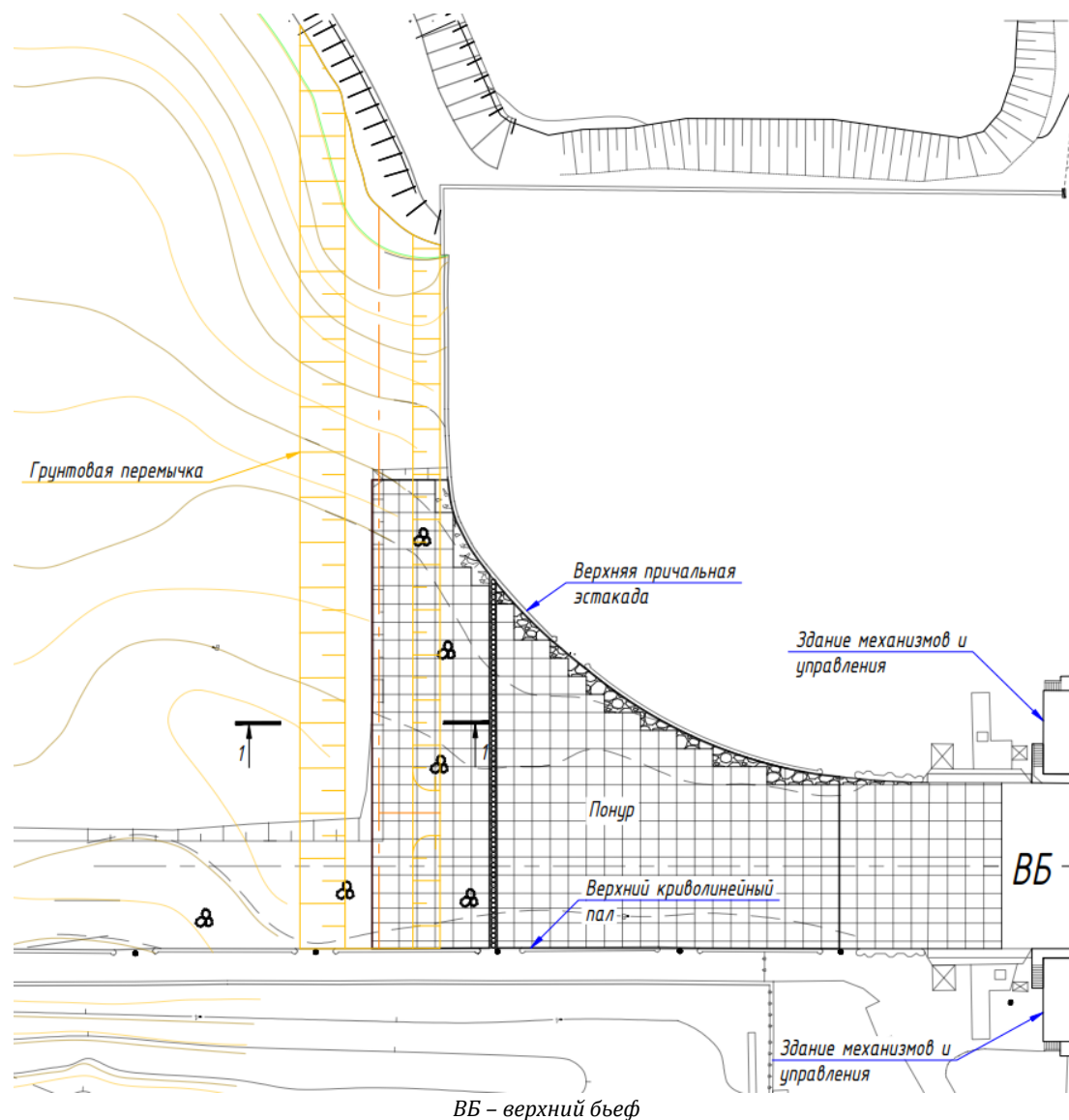


Рис. 4. Расположение перемычки вблизи понура на верхнем бьефе

Перекрытие русла реки осуществляется с помощью перемычек. Перемычки являются временными гидротехническими сооружениями, как правило IV класса, предназначенными для отгораживания части русла реки, создания котлованов и производства работ насухо [10].

Перемычки бывают следующих видов [11]:

1) *грунтовые*:

- земляные (достоинства: относительная дешевизна, полная механизация работ, легкий процесс разборки, применение при любых напорах и высотах; недостатки: большая ширина по основанию (распластанность), повышенная размываемость при переливе воды через гребень);

- каменно-земляные (применяются в основном, где имеется камень из полезных выемок);

- каменно-набросные (применяются в основном, где имеется камень из полезных выемок);

2) *деревянные ряжевые* (достоинства: малое стеснение русла реки, хорошее противостояние большим скоростям воды и льда, допускается перелив через гребень, большая несущая способность; недостатки: трудоемкое устройство, необходимость квалифицированной плотницкой работы, в зимний период ряжи должны собираться над поверхностью льда, над местом производства работ, однако не на всей территории Российской Федерации в начале межнавигационного периода образуется лед над поверхностью воды):

- широкие сквозной рубки;
- узкие;

3) *шпунтовые* (достоинства: большая жесткость и достаточная устойчивость, малое стеснение русла, хорошая сопротивляемость

воздействию больших скоростей воды и льда, значительная высота перемычки, возможность комплексной механизации, легкость разборки и высокий возврат материала для повторного использования; недостатки: забивка плавучими копрами (в зимний период особая сложность возникает при транспортировке флота, так как навигационный период закончен, что приводит к дополнительным затратам для перевода плавсредств на «горячий» отстой):

- цилиндрические ячеистые;
- сегментные ячеистые;

4) **бетонные** (достоинства: минимально возможная ширина по основанию, наибольшая сопротивляемость воздействию скоростей воды и льда, в том числе и при переливе воды через гребень, минимальное стеснение русла; недостатки: большая стоимость, сложность возведения и разборки, при возведении бетонных перемычек стремятся к тому, чтобы они не разбирались и оставались в составе сооружения).

Анализ конструктивно-технологических решений показывает, что наиболее оптимальный способ осушения – это отсыпка места производства работ песчаной (грунтовой) перемычкой.

Рассмотрим расположение грунтовой перемычки в верхнем бьефе гидроузла рядом с понуром (рис. 4).

Понур – водонепроницаемое покрытие, часть флютбета, создаваемое в верхнем бьефе для удлинения пути фильтрации грунтовых вод и предохранения от размыва поверхностным потоком участка ложа реки, примыкающего к гидротехническому сооружению [12].

Устройство перемычек

При помощи перемычек осуществляется направление речного потока при пропуске строительных расходов, создаются условия для осушения котлованов и возведения сооружений гидроузлов насухо. Таким образом, для речного гидротехнического строительства перемычки являются одним из необходимых элементов схемы пропуска строительных расходов [10].

Основные требования к перемычкам обуславливаются их назначением и временным характером. Как напорные сооружения перемычки являются плотинами и к ним предъявляются соответствующие требования с точки зрения устойчивости, прочности, водопроницаемости и защиты от воздействия потока воды. Как временные сооружения они относятся к IV классу капитальности с соответствующим снижением коэффициентов запаса, максимальным облегчением и удешевлением

конструкций при применении местных строительных материалов. Как сооружения разбираемые перемычки должны удовлетворять требованию легкости разборки [10].

Работы по устройству перемычек должны производиться в межнавигационный период, так как в указанный период уровень воды в бьефах гораздо ниже и отсутствует судопропуск на гидротехнических сооружениях (ГТС), что позволяет произвести работы без остановки шлюзований.

Уровень перемычки должен быть минимум на 0,5 м выше максимального уровня воды в бьефе (сухой запас).

Перекрытие русла реки речного гидроузла является одним из сложных этапов работ по общей схеме пропуска строительных расходов. Его сущность заключается в постепенном или мгновенном завале русла различного рода материалами (песчано-гравелистой смесью, горной массой, сортировочным камнем, специальными кубами и др.) [10].

Процесс перекрытия должен начинаться с постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки. Оставшийся неперекрытым участок реки называют прораном. Применяются следующие способы перекрытия [10]:

- фронтальный (применяется преимущественно на равнинных руслах, русло которых сложено легкоразмываемыми грунтами);
- пионерный (используется на реках, русло которых сложено скальными породами);
- обрушение в проран больших массивов направленным взрывом (применяется на перекрытии рек в горных условиях при крутых каньонообразных створах);
- намывной или бесперемычный (при возведении грунтовых плотин методом намыва);
- комбинированный (совмещение нескольких способов перекрытия).

Наиболее оптимальный способ – пионерный. Перекрытие осуществляется путем постепенного сужения прорана отсыпкой материалов банкета в текущую воду с торцов, выдвигаемых в русло реки дамб. При этом отсыпка может вестись самосвалами как с одного берега, так и с двух, как в одном створе, так и в нескольких [13].

Для того чтобы оценить преимущества и недостатки выбранного способа, рассмотрим подробнее гидравлические условия потока и изменение указанных характеристик.

При пионерном перекрытии различают две стадии: водослива и быстроточка, или шлейфообразования.

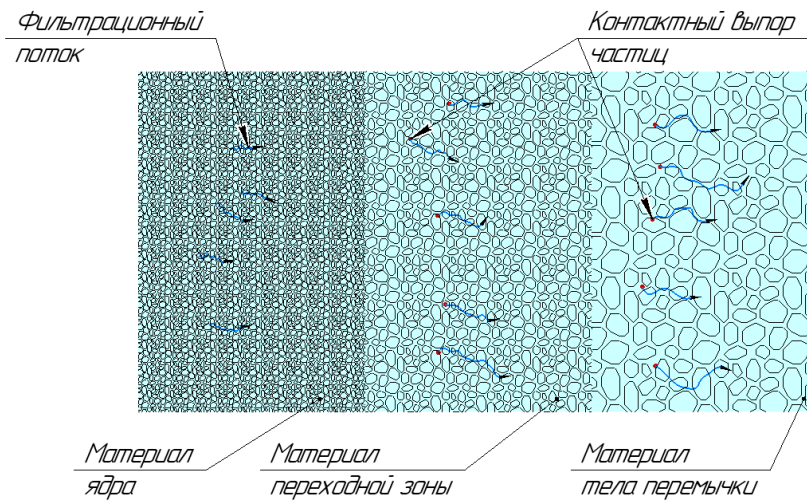


Рис. 5. Фильтрационная прочность ядра

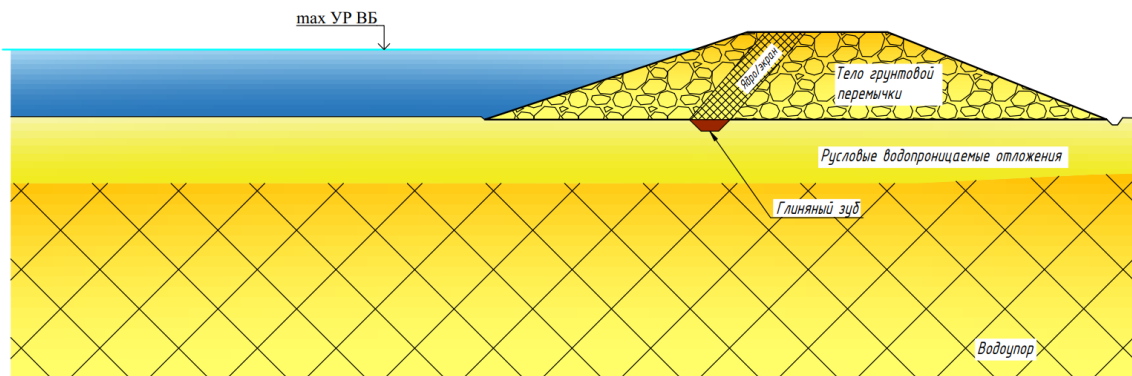


Рис. 6. Сопряжение перемычки с основанием с использованием глиняного зуба (см. рис. 4, сечение 1-1)

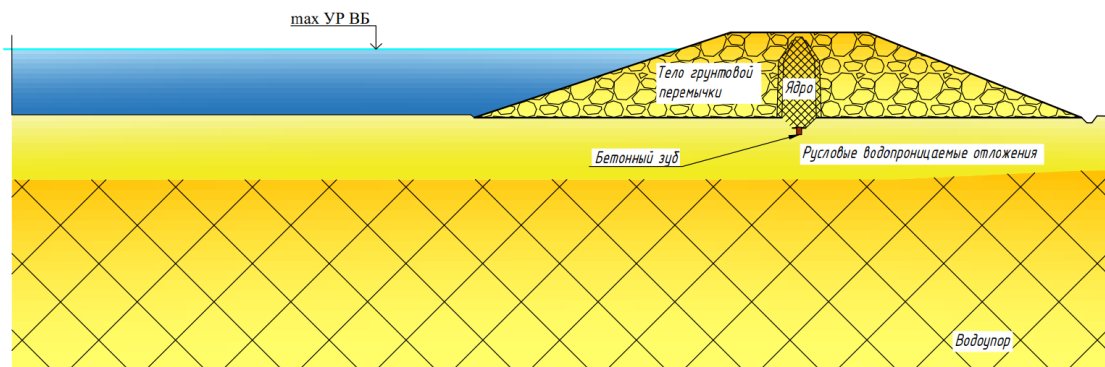


Рис. 7. Сопряжение перемычки с основанием с использованием бетонного зуба (см. рис. 4, сечение 1-1)

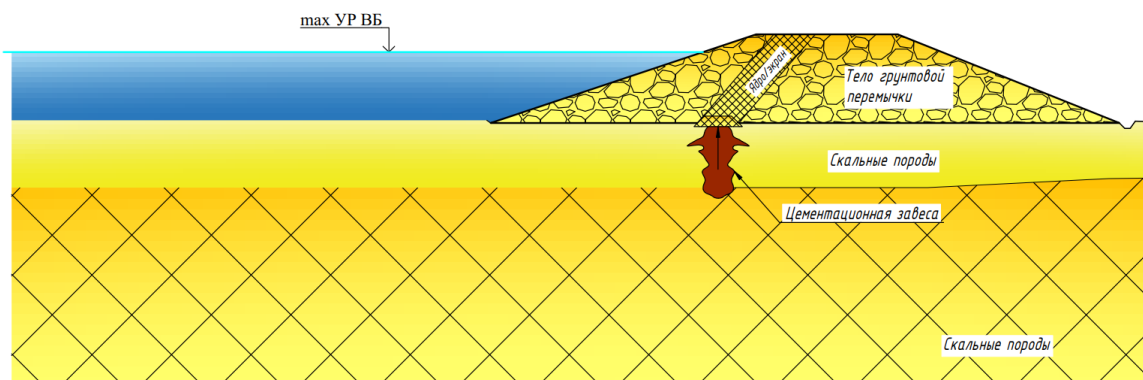


Рис. 8. Сопряжение перемычки с основанием с использованием цементационной завесы (см. рис. 4, сечение 1-1)

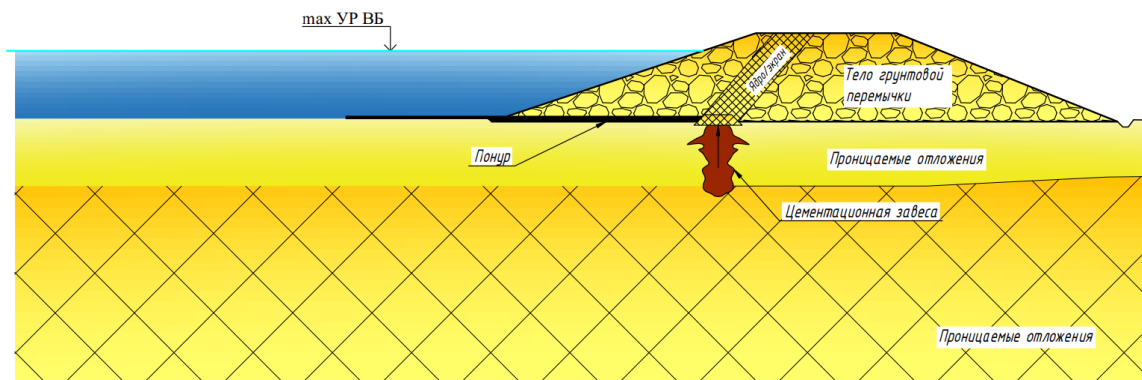


Рис. 9. Сопряжение перемычки с основанием с использованием понура с цементационной завесой (см. рис. 4, сечение 1-1)

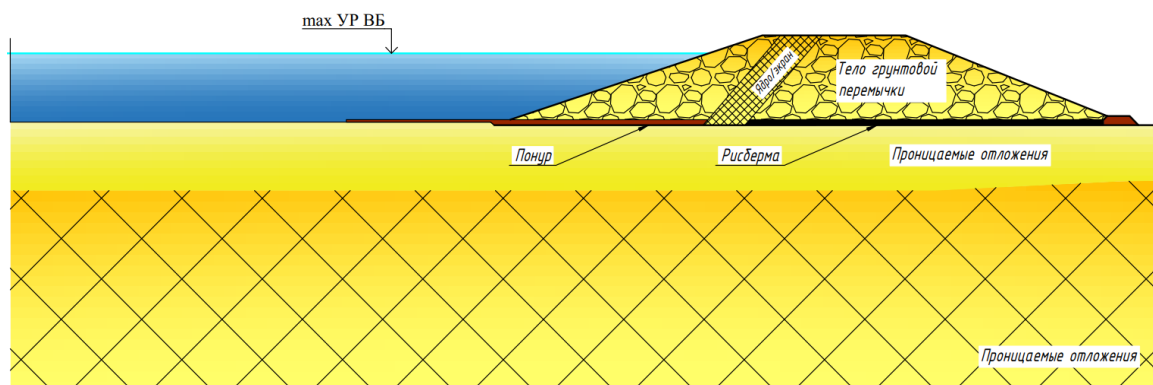


Рис. 10. Сопряжение перемычки с основанием с использованием понура с развитым дренажем по подошве плотины (см. рис. 4, сечение 1-1)

Стадия водослива наблюдается до тех пор, пока скорость потока между банкетам меньше предельных скоростей размыва для материала наброски. Для поддержания этого состояния по мере сужения ширины прорана и увеличения скоростей увеличивают крупность отсыпаемого камня.

Стадия шлейфообразования начинает появляться, когда скорость в проране становится больше допустимой и происходит интенсивный разрыв материала наброски. С этого момента применяют еще более крупные фракции камня – бетонные кубы или тетраэдры. Размываемый материал начинает заполнять пространство между банкетами, уменьшая тем самым глубину потока. На заключительном этапе перекрытия в гидравлическом отношении шлейф представляет собой быстроток с критической глубиной на гребне банкета.

Общий перепад складывается из перепада на входе в проран и на быстроточе.

Фильтрационная прочность ядра

Ядро грунтовой плотины является ее главным противofильтрационным элементом. Именно оно обеспечивает предотвращение проникновения воды, фильтрующейся в теле плотины [14].

Структура ядра не должна быть повреждена при всех фильтрационных процессах, которые будут действовать в период ее эксплуатации. Важнейшим показателем служит фильтрационная прочность материала ядра (рис. 5) [14].

При проектировании ядра грунтовой перемычки учитываются различные критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта, из которого отсыпается ядро плотины.

Сопряжение перемычки с основанием подходного канала

От типа сопряжения перемычки и основания зависит фильтрационная устойчивость. Выбор неоптимальной конструкции сопряжения может привести к развитию фильтрационных процессов, размыв ее [10].

При выборе типа сопряжения перемычки с основанием подходного канала наиболее важным фактором служит определение типа основания – скальное или нескальное (податливые русловые отложения) [10].

Существует пять основных способов сопряжения [10]:

1) *глиняный зуб в открытом котловане на водоупоре* – применим при наличии русловых отложений малой мощности (до 3–3,5 м), подстилаемых водоупором (рис. 6);

2) **бетонный зуб в открытом котловане на водоупоре** – при наличии русловых отложений средней мощности (от 3,5 м до 20 м), подстилаемых водоупором (рис. 7);

3) **цементационная завеса** – применяется, когда основание скальное, и поверх него полностью отсутствуют мягкие отложения (рис. 8);

4) **пону́р с цементационной завесой** – используется, если основание представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (то есть водоупор практически недостижим), и при этом основание допускает устройство цемзавесы (нагнетание цементного раствора) – рисунок 9;

5) **пону́р и развитый дренаж по подошве плотины** (рис. 10) – применяется, если основание:

- представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (водоупор практически недостижим);
- не допускает выполнение цементационной завесы (нагнетание цементного раствора невозможно).

Выводы

В рамках поставленной цели исследования в данной работе выполнен анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС и способов перекрытия русла реки как процессов постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки, выявлены критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта для отсыпки ядра грунтовой плотины:

- исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования;

- анализ фильтрации перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях;

- разработка предложений для исключения скопления профильтрованной воды через тело перемычки.

Выявлено, что наиболее оптимальным конструктивно-технологическим решением является (с точки зрения экономической составляющей и простоты производства строительных работ) перемычка поперек судоходного канала с глиняным зубом (первый способ).

Силы, удерживающие грунты от размыва, – это силы трения ($\text{tg } \varphi$), зацепления, пригрузки грунтом, геометрическое соотношение размера частиц и пор контактируемых грунтов [15].

При перекрытии прорана грунтовой перемычки отсыпкой увеличивается перепад уровня воды, поэтому наиболее эффективным будет применение материала разной крупности: на начальном этапе – песок фр. 0,1–0,2, а на заключительном – крупный камень (негабариты) [16]. В качестве защитного экрана должна применяться геомембрана, соответствующая п. 4.20 СП 39.13330.2012. Уклон мокрого откоса принимается 1:4, а сухого – 1:3 [11].

Для проезда строительной техники к месту производства работ поверх перемычки укладываются автодорожные плиты (рис. 11).

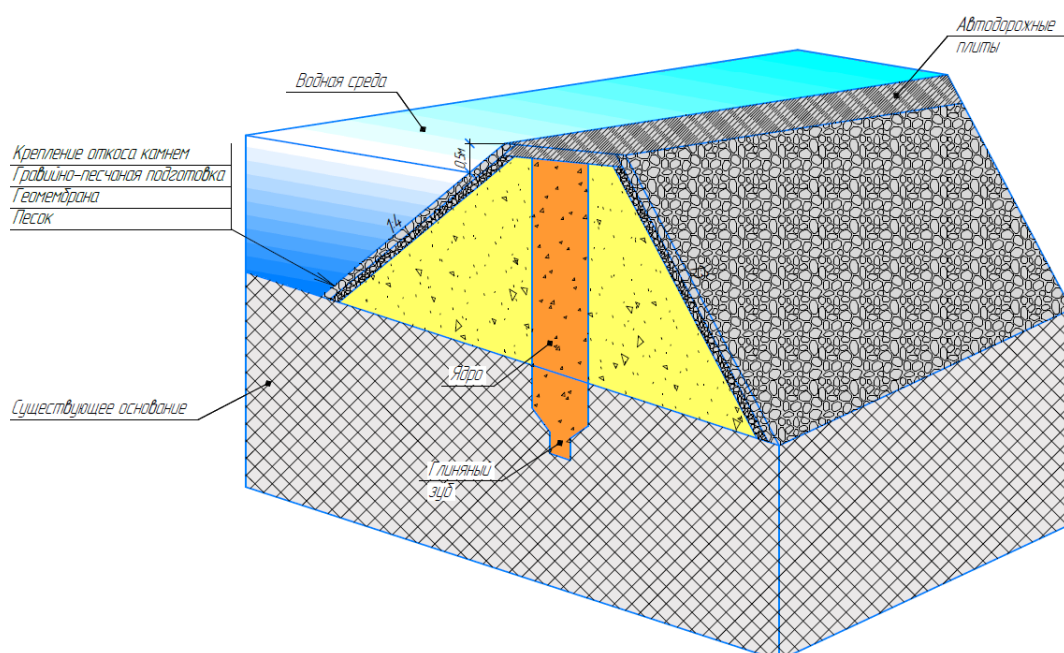


Рис. 11. Устройство грунтовой перемычки

При проведении работ по устройству перемычки необходимо осуществлять геотехнический контроль за состоянием тела и основания перемычки, в соответствии с требованиями п. 4.18 СП 39.13330.2012.

На следующем этапе будет исследовано потенциальное разрушение перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью

численного моделирования, выполнен анализ фильтрации перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях и осуществлена разработка предложений для исключения скопления профильтрованной воды через тело перемычки.

Список литературы

1. Судходные гидротехнические сооружения и сроки их работы // Федеральное агентство морского и речного транспорта. – Режим доступа: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnicheskie_sooruzheniya/?ysclid=lqiehilt5a647160453 (дата посещения 22.12.2023), свободный. – Заглавие с экрана. – Яз. рус.
2. Российская Федерация. О безопасности гидротехнических сооружений : федеральный закон № 117-ФЗ от 27.07.1997 // Собрание законодательства РФ. – 28.07.1997. - № 30. – Ст. 3589.
3. Колосов М. А. Диагностика состояния камеры шлюза по степени гашения напора на верхней голове / М. А. Колосов, К. П. Моргунов, С. А. Головкин // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2014. - № 2 (83). – С. 83–86.
4. Соколова Ю. А. Причины атмосферной коррозии металлоконструкций и методы защиты / Ю. А. Соколова // Инновации и инвестиции. – 2017. – № 8. – С. 157–160.
5. МУ 050-025-2001. Методические указания. Определения технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. – Москва : ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. – 86 с.
6. Кульмицкий М. Л. Расчетные исследования влияния коррозионного износа на прочность металлоконструкций ворот и затворов шлюзов / М. Л. Кульмицкий, Н. М. Ксенофонтов, В. Б. Чистов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. – № 1 (35). – С. 60–66.
7. Российская Федерация. Технический регламент о безопасности зданий и сооружений : федеральный закон № 384-ФЗ от 30.12.2009 // Собрание законодательства РФ. – 04.01.2010. – № 1. – Ст. 5.
8. СП 58.13330.2012. Гидротехнические сооружения. Основные положения. Актуализированная редакция СНиП 33-01-2003. – Введены 2012–01–01. – Москва : Минрегион России, 2012. – 40 с.
9. СП 13-102-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Правила обследования несущих строительных конструкций зданий и сооружений. – Введены 2003–08–21. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003 – 31 с.
10. Лапин Г. Г. Организация гидротехнического строительства : практическое пособие для проектировщиков, строителей и студентов вуза // Г. Г. Лапин. – Москва : Печатный дом Ильиных, 2021. – 189 с. – ISBN 978-56044903-1-0.
11. Телешев В. И. Организация, планирование и управление гидротехническим строительством // В. И. Телешев. – Москва : Стройиздат, 1989. – 416 с.
12. Рассказов Л. Н. Гидротехнические сооружения : в 2 ч. / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин ; под ред. Л. Н. Рассказова. – 2-е изд. – Москва : Ассоциация строительных вузов, 2011. – Часть 1. – 575 с.
13. П-885-91. Пособие по технологии возведения плотин из грунтовых материалов к СНиП 2.06.05-84 и СНиП 3.07.01-85 (утв. Всесоюзным ордена Ленина проектно-изыскательским научно-исследовательским объединением «Гидропроект» им. С. Я. Жука 22.02.1991). – Введен 1991-02-22. – Москва, 1991. – 162 с.
14. Праведный Г. Х. Подготовка скальных оснований плотин из грунтовых материалов / Г. Х. Праведный, В. Г. Радченко. – Ленинград : Энергия, 1973. – 82 с.
15. Буренкова В. В. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания / В. В. Буренкова, П. М. Буренков // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 84–91.
16. URL: <http://geowizard.org/index.html> (дата посещения 22.12.2023).
17. Baotang Shen. An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks / Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. – 2018. – Vol. 10, issue 4. – P. 645–652.
18. Hassani Rahim. Classical Method and Numerical Modeling for Designing of Sheet Pile Wall / Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. – Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan, 2016. – 10.13140/RG.2.2.10294.91208.

© С. С. Рекунов, Н. В. Купчикова, А. А. Чураков

Ссылка для цитирования:

Рекунов С. С., Купчикова Н. В., Чураков А. А. Конструктивно-технологические решения перемычек – временных гидротехнических сооружений и их сопряжения с грунтовым основанием // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 3 (49). С. 31–39.