

В.С. ФЁДОРОВ¹, Н.В. КУПЧИКОВА^{1,2}, С.С. РЕКУНОВ³, И.В. ФЕДОСЮК

¹ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта», г. Москва, Россия

²ГБУ НИИ «МосТрансПроект», г. Москва, Россия

³Волгоградский государственный технический университет, г. Волгоград, Россия

⁴ООО «МКЛ Плюс», г. Волгоград, Россия

ФИЛЬТРАЦИОННАЯ УСТОЙЧИВОСТЬ ГРУНТОВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПЛОТИН КАК ВРЕМЕННЫХ ГИДРОТЕХНИЧЕСКИХ СООРУЖЕНИЙ

Аннотация. Изучение влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек судоходных гидротехнических сооружений на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях. Метод исследования представляет собой численное моделирование процессов и аналитические методы исследования позволили получить результаты поставленной цели. В результате изучения влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек, как временных судоходных гидротехнических сооружений на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях выполнен анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек судоходных гидротехнических сооружений, анализ 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. Проведено исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования. Выполнен анализ фильтрационной устойчивости перемычки методом конечных элементов при динамических воздействиях. Разработаны предложения для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки. Фильтрационная устойчивость грунтовой перемычки, как временного гидротехнического сооружения обеспечивается, по действующему градиенту напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует. Полученные результаты численного моделирования позволяют наблюдать более точный механизм разрушения перемычек плотин. Производить работы по замене ремонтных ворот шлюза под защитой грунтовой перемычки возможно только с соблюдением требований нормативно-технической документации и проведением необходимых расчетов.

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

V.S. FEDOROV¹, N.V. KUPCHIKOVA^{1,2}, S.S. REKUNOV³, I.V. FEDOSYUK⁴

¹The Russian University of Transport (RUT (MIIT), Moscow, Russia

²«Scientific Research and Design Institute of Urban Transport of the city of Moscow», Moscow, Russia

³Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia

⁴ООО «МКЛ Плюс», Volgograd, Russia

FILTRATION STABILITY OF SOIL BRIDGES OF DAMS AS TEMPORARY HYDRAULIC STRUCTURES

Abstract. Study of the influence of design and technological solutions for the construction of bulkheads of shipping hydraulic structures on filtration processes and the stability of the embankment of the dam core under operational impacts. The research method is a numerical modeling of the processes and analytical research methods made it possible to obtain the results of the set goal.

As a result of studying the influence of design and technological solutions for the construction of bulkheads, as temporary shipping hydraulic structures, on filtration processes and the stability of the embankment of the dam core under operational impacts, the following were completed: analysis of design and technological solutions for the construction of bulkheads of shipping hydraulic structures; analysis of the methods of blocking the river bed, as processes of gradual compression of the flow until the appearance of flow velocities that wash away the river bed and the backfill material. Criteria were identified that ensure the filtration strength of the soil for backfilling the core of the earth dam. A study was conducted of the potential destruction of the bulkhead when calculating for the main combination of loads using numerical modeling. Analysis of the filtration stability of the bulkhead using the finite element method under dynamic impacts has been carried out. Proposals have been developed to prevent the accumulation of filtered water through the bulkhead body. The filtration stability of the soil bulkhead as a temporary hydraulic structure is ensured by the current pressure gradient at the contact of two soils, which is significantly less than the permissible gradient, i.e., there is no erosion. The obtained results of numerical modeling allow us to observe a more accurate mechanism for the destruction of dam bulkheads. It is possible to carry out work on replacing the repair gates of the sluice under the protection of the soil bulkhead only in compliance with the requirements of regulatory and technical documentation and performing the necessary calculations.

Keywords: *filtration stability, structural and technological solutions, bridges, temporary hydraulic structures, interfaces with the soil base.*

Введение

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 [1]. В Российской Федерации расположено более 350-ти судоходных гидротехнических сооружений (далее по тексту – 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].

Одним из них является судоходный шлюз – гидротехническое водоподпорное сооружение, разделяющее два водоема с разными уровнями воды [3].

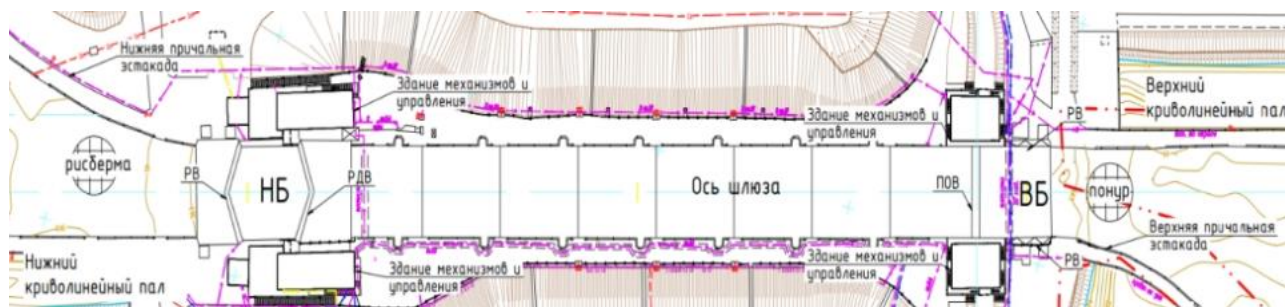


Рисунок 1 – Общий вид судоходного шлюза

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

Для замены рабочих двустворчатых ворот (нижний бьеф) 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 [4].

Проведение работ по замене ремонтных заграждений один из самых трудоемких, поскольку для их замены необходимо производить осушение места производства работ. Производить работы с помощью водолазного расчета, считается не целесообразным с точки зрения трудозатрат и экономической составляющей, т.к. работы должны проводиться в

межнавигационный период, для возможности работы шлюза в обычном режиме для обеспечения судопропуска, с чем связано зимнее удорожание, а также сложности в подводных сварочных и бетонных работах. Для осушения места работ необходимо произвести перекрытие русла реки – это строительный процесс, при котором бытовое русло перегораживается полностью [10].

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

Перемычки бывают следующих видов [11]: грунтовые (земляные, каменно-земляные, каменно-набросные), деревянные ряжевые с широкой и узкой ряжевой сквозной рубкой, шпунтовые, ячеистые цилиндрические и сегментные, бетонные. Практический опыт показывает, что наиболее оптимальный способ осушения места проведения работ – это отсыпка места производства работ песчаной (грунтовой) перемычкой.

Цель исследования - изучение влияния конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС на фильтрационные процессы и устойчивость насыпи ядра плотины при эксплуатационных воздействиях.

В рамках поставленной цели запланированы к решению следующие задачи:

- анализ конструктивно-технологических решений устройства перемычек СГТС;
- анализ способов перекрытия русла реки, как процессов постепенного обжатия потока до появления скоростей течения, размывающих русло реки и материал отсыпки;
- выявление критериев, обеспечивающих 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 профильтровавшейся воды через тело перемычки.

Рассмотрим конструктивно-технологические решения при расположении грунтовой перемычки в верхнем бьефе гидроузла рядом с понуром (рис. 2), который является водонепроницаемым покрытием, частью флютбета, создаваемым в верхнем бьефе для удлинения пути фильтрации грунтовых вод и предохранения от размыва поверхностным потоком ложа реки, примыкающего к гидротехническому сооружению [12].

При помощи перемычек осуществляется направление речного потока при пропуске строительных расходов и создаются условия для осушения котлованов и возведения сооружений гидроузлов насухо и для речного гидротехнического строительства перемычки являются одним из необходимых элементов схемы пропуска строительных расходов [10]. 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 перемычки относятся к IV классу капитальности с соответствующим снижением коэффициентов запаса и максимальным облегчением, и удешевлением конструкций при применении местных строительных материалов.

Работы по устройству перемычек должны производиться в межнавигационный период, т.к. в указанный период, уровень воды в бьефах гораздо ниже и отсутствует судопропуск на гидротехнических сооружениях, 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. Сущность перекрытия заключается в постепенном или мгновенном завале русла различными строительными материалами (песчано-гравелистой смесью, горной массой, сортировочным камнем, специальными кубами и др.) [8].

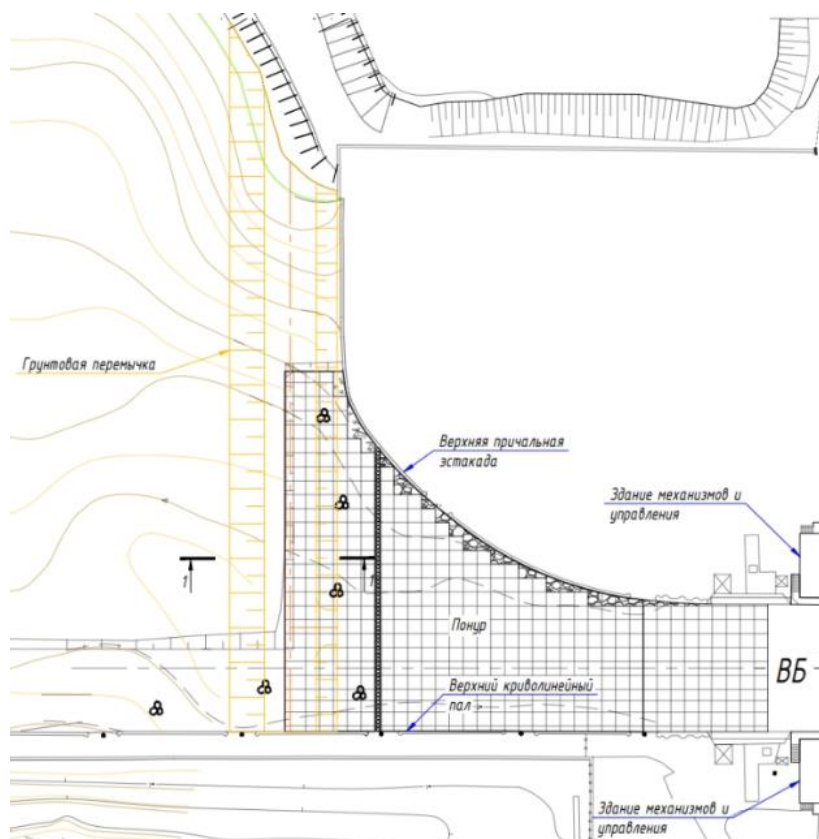


Рисунок 2 – Расположение перемычки вблизи понура на верхнем бьефе (ВБ – верхний бьеф)

Фильтрационная прочность ядра грунтовой плотины

Ядро грунтовой плотины является главным противофильтрационным элементом плотины. Именно ядро обеспечивает предотвращение проникновения воды, фильтрующейся в теле плотины [12].

Структура ядра не должна быть повреждена при всех фильтрационных процессах, которые будут действовать в период ее эксплуатации, поэтому важнейшим показателем является фильтрационная прочность материала ядра [12].

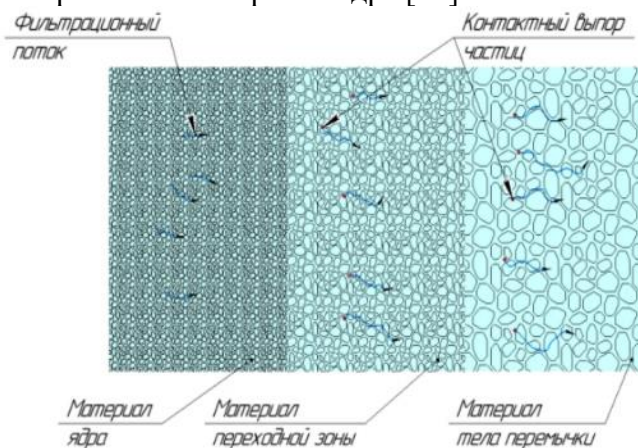


Рисунок 3 – Фильтрационная прочность ядра

При проектировании ядра грунтовой перемычки учитываются различные критерии, обеспечивающие фильтрационную прочность грунта, из которого отсыпается ядро грунтовой 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, и как следствие к её размыву. При выборе типа сопряжения перемычки с основанием подходного канала наиболее важным фактором служит определения типа основания - скальное или нескальное (податливые русловые отложения).

Существует 5 основных способов сопряжения грунтовых перемычек с основанием [10]:

1.глиняный зуб в открытом котловане на водоупоре. Данное сопряжение применимо при наличии русловых отложений малой мощности (до 3-3,5 м), подстилаемых водоупором (рис. 4, б);

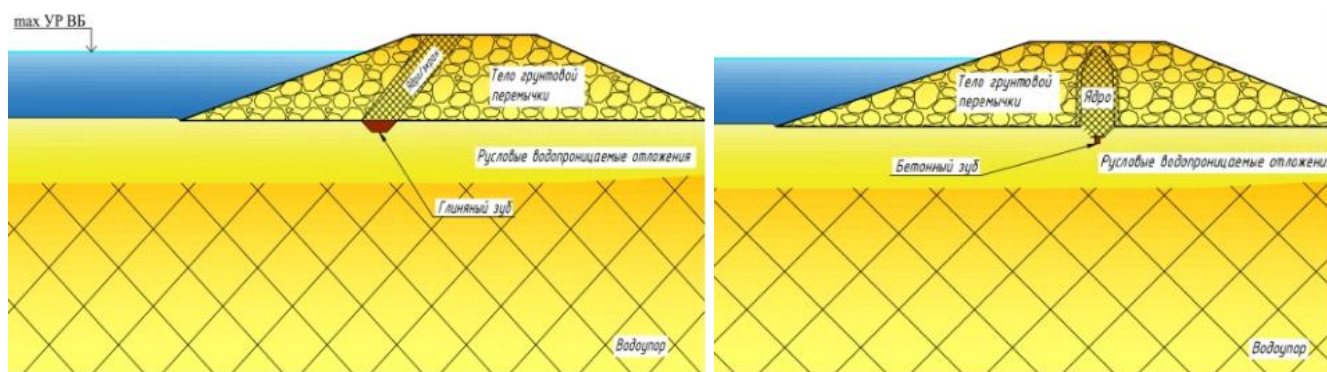


Рисунок 4 – Сопряжение перемычки с основанием с использованием: а - бетонного зуба; б - глиняного зуба

2.бетонный зуб в открытом котловане на водоупоре. Данное сопряжение применимо при наличии русловых отложений средней мощности (от 3,5 м до 20 м), подстилаемых водоупором (рис. 4, а);

3.цементационная завеса. Данная конструкция применяется, когда основание - скальное, и поверх него полностью отсутствуют мягкие отложения (рис.5, а);

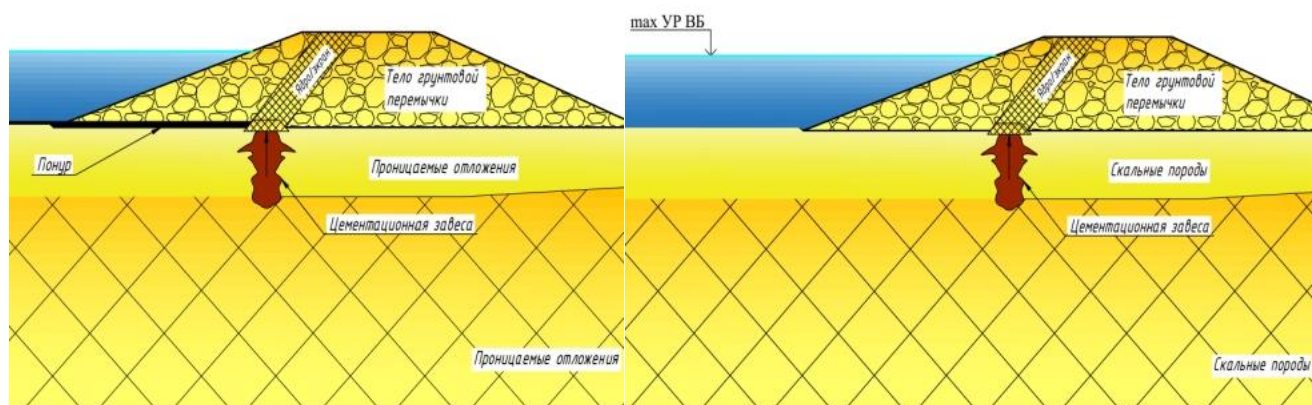


Рисунок 5 - Сопряжение перемычки с основанием с использованием: а - цементационной завесы; б – понура с цементационной завесой

4.понур с цементационной завесой. Данная конструкция применяется, если основание представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (т.е. водоупор

практически недостижим), и при этом основание допускает устройство цементационной завесы (рис.5, б);

5.понур и развитый дренаж по подошве плотины. Данная конструкция применяется, если основание представлено проницаемыми отложениями очень большой мощности (т.е. водопор практически недостижим) и не допускает выполнение цементационной завесы.

Наиболее эффективная (с точки зрения экономической рентабельности и простоты производства строительных работ) перемычка поперек судоходного канала с глиняным зубом (1-й способ).

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

При перекрытии прорана грунтовой перемычкой отсыпкой, увеличивается перепад уровня воды, поэтому для отсыпки на разных стадиях перекрытия должен в принципе применяться материал разной крупности. Однако на практике зарекомендовали себя к применению применяют два вида материалов. На начальном этапе применяется 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. 6).

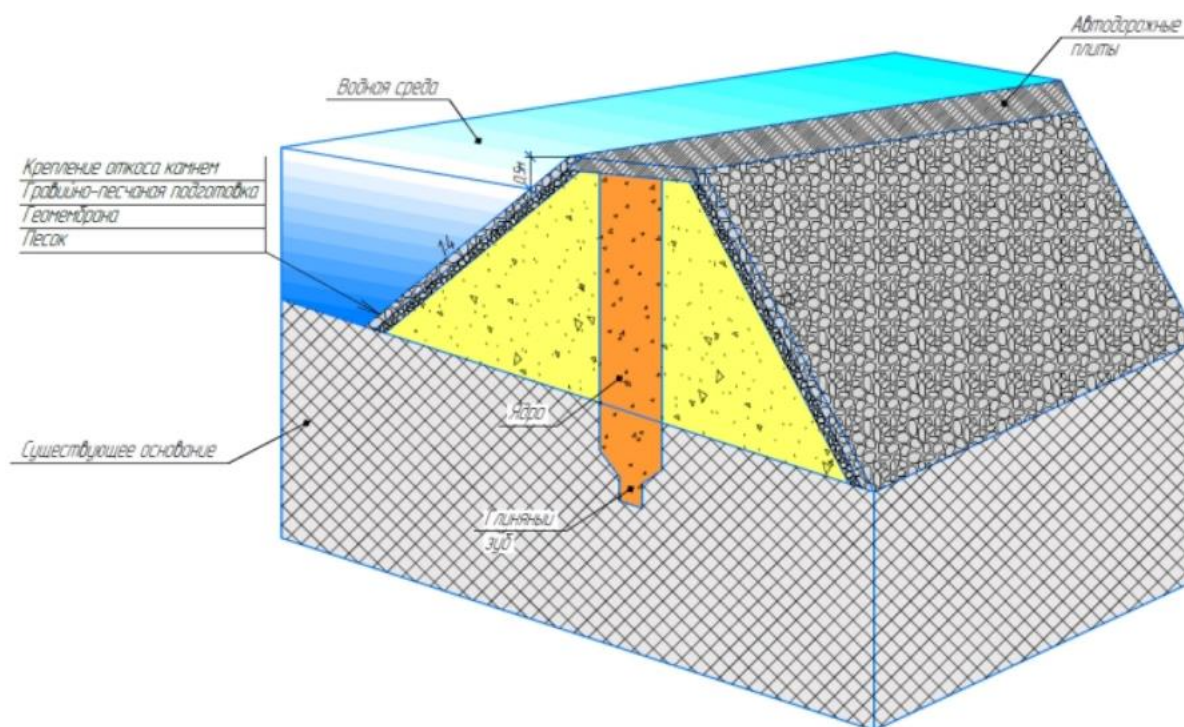


Рисунок 6 – Устройство грунтовой перемычки

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

Модели и методы

Расчет устойчивости откосов перемычки выполняется на основное и особое сочетание нагрузок. Нахождение коэффициента устойчивости откоса производится в ходе нелинейного упругопластического расчета методом конечных элементов (МКЭ) с использованием метода снижения прочностных характеристик (SRM), что соответствует пункту 9.10 СП 39.13330.2012.

Расчет грунтовой перемычки производится на максимально возможный уровень воды в зимний период. Численное моделирование возможно выполнять в следующих программных комплексах: Plaxis; Geo5; Sio 2D; Midas GTS NX; Adonis и т.д.

Численное моделирование было выполнено в лицензионном программном комплексе ADONIS и Plaxis.

ADONIS – это программа, применяемая для линейного и нелинейного анализа геотехнических задач. Она имеет полный графический пользовательский интерфейс (GUI) для предварительной или постобработки и использует полностью автоматический генератор сеток для создания сложных сеток с конечными элементами [17].

PLAXIS - сертифицированная и верифицированная программа для решения геотехнических задач методом конечных элементов. Программа разработана на основе мирового опыта исследовательских институтов в области механики грунтов и численного моделирования в геотехнике [18].

Для моделирования поведения грунтов используется упругопластическая модель Кулона-Мора [19, 20].

Граничные условия задаются путем фиксации боковых границ расчетной модели от горизонтальных, а нижней – от горизонтальных и вертикальных перемещений. Ширина и глубина расчетной области задается таким образом, чтобы не влиять на результаты расчета. Кроме опорных граничных условий, задаются гидрогеологические граничные условия: уровень вод, фильтрационные характеристики грунтов, проницаемость строительных материалов.

Расчетная область разбивается на конечные элементы (КЭ) высокого порядка. Используется тип КЭ – «3/6-узловой Гаусс». Применяется адаптивная конечно-элементная сетка, параметры которой автоматически уточняются на каждом расчетном шаге. Адаптивная сетка предполагает анализ сходимости, когда конечно-элементная сетка постепенно измельчается до тех пор, пока не будет обнаружено, что некоторые ключевые характеристики (перемещения, напряжения и т. д.) достигают устойчивых значений.

Взаимодействие различных слоев между собой происходит через интерфейсные элементы, которые позволяют учитывать характер контакта между конструкцией и грунтом. Параметры контактных элементов назначаются в соответствии с таблицей 9.1 СП 22.13330.2016.

Учет сейсмического воздействия производится в соответствии с пунктом 6.15 СП 358.1325800.2017, т.е. используется расчет по статической теории, который предполагает, что значения сейсмических нагрузок определяются произведением массы конструкции (или рассматриваемого объема грунта) на абсолютное ускорение этой конструкции (или указанного объема грунта).

В рамках квазистатической задачи предполагается, что вызванные землетрясением силы представляются в виде сил инерции, приложенных статически. При использовании квазистатической расчетной схемы ускорение грунта принимается как горизонтально направленным, так и с наклоном вектора сейсмического воздействия к горизонтальной плоскости под углом 30°.

В расчетах на сейсмическое воздействие используются динамические характеристики грунта. В зависимости от расчетного случая учитываются фильтрационные силы,

соответствующие ситуации «неустановившейся фильтрации» или «установившейся фильтрации».

Влияние воды, насыщающей откос, учитывается следующим образом - к насыщенному водой объему грунта элемента прикладываются фильтрационные силы, определяемые в ходе расчета. В расчетах учитывается нагрузка от транспорта величиной 20 кПа.

Грунтовая перемычка располагается на следующем основании (слои указаны сверху вниз):

1. техногенные отложения (насыпные грунты):

- пески крупные серовато-буровато-желтые с гравием и галькой средней плотности и плотные с кусками кирпича и бетона в кровле, неоднородные;
- пески мелкие бурые, слабглинистые с включениями единого гравия и гальки, от рыхлых до плотных, неоднородные;

2. голоценовые аллювиальные отложения:

- русловые отложения современного аллювия молодой поймы, пески зеленовато и желтовато-серые различной крупности, гравийные грунты с песчаным заполнителем;
- старинные отложения современного аллювия: глины темно-серой окраски с растительными остатками, консистенция тугопластичная и мягкопластичная.

Результаты исследования и их анализ

Общий вид расчетной схемы представлен на рис. 7 и 8. Результаты расчетов устойчивости для наиболее опасных расчетных случаев представлены на рис. 9-13.

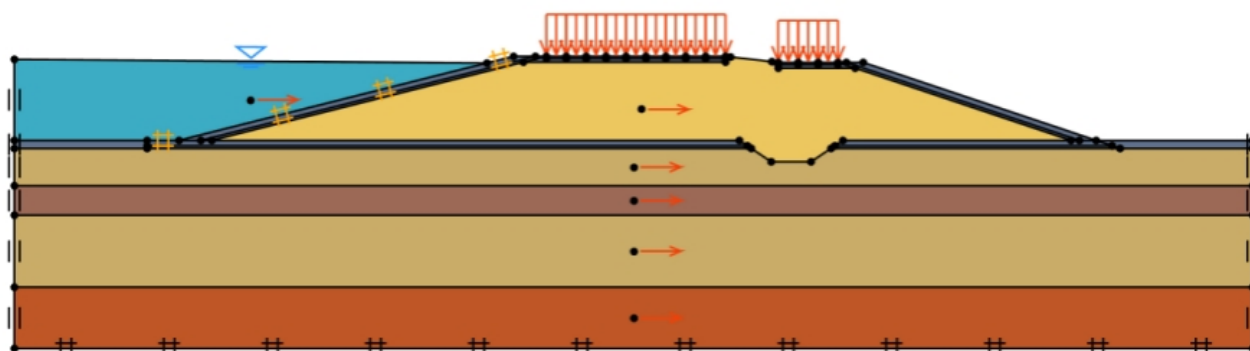


Рисунок 7 – Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

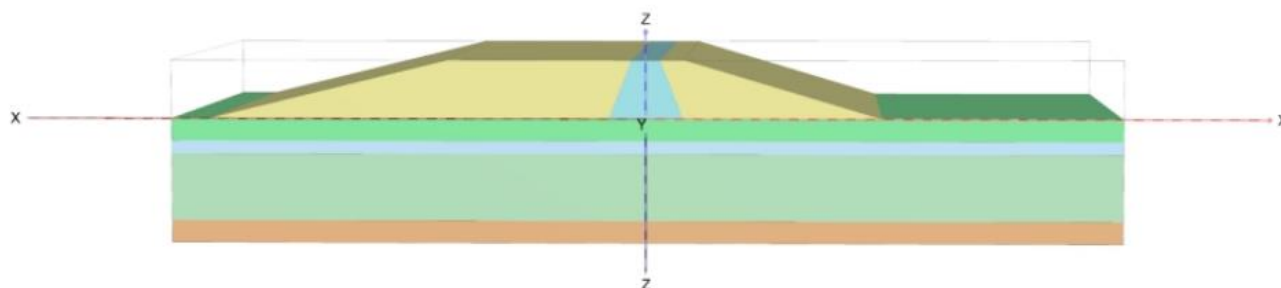


Рисунок 8 – Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis

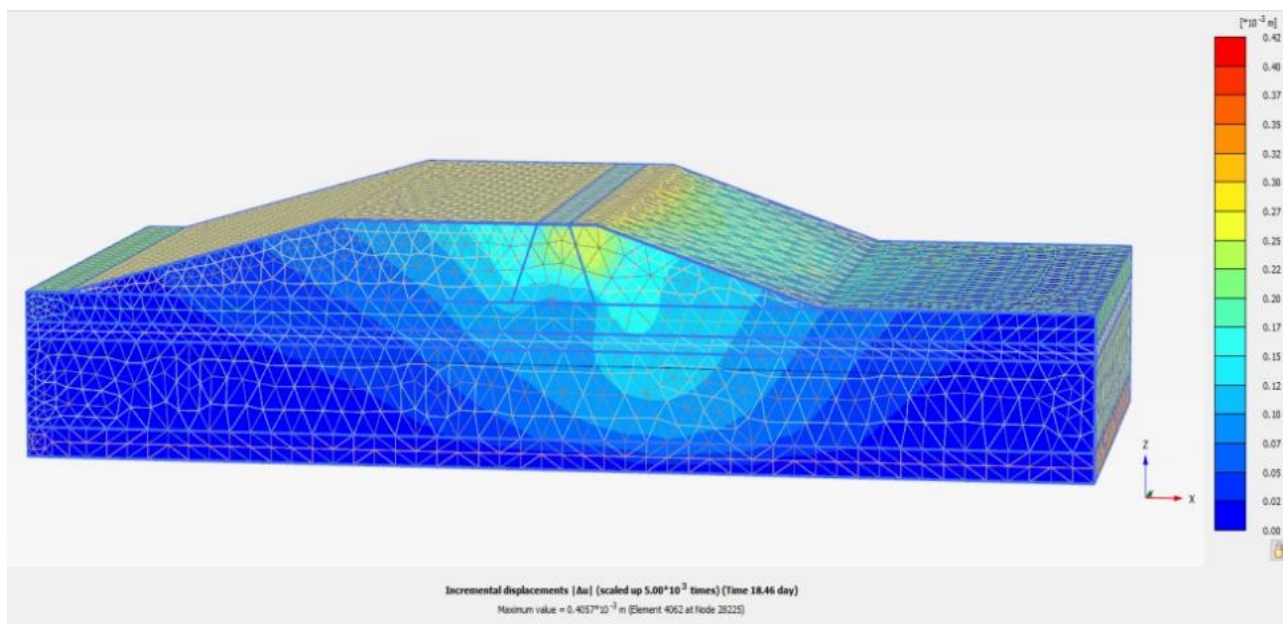


Рисунок 9 - Схема потенциальных перемещений в теле грунтовой перемычки (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Plaxis (позволяет наблюдать механизм разрушения)

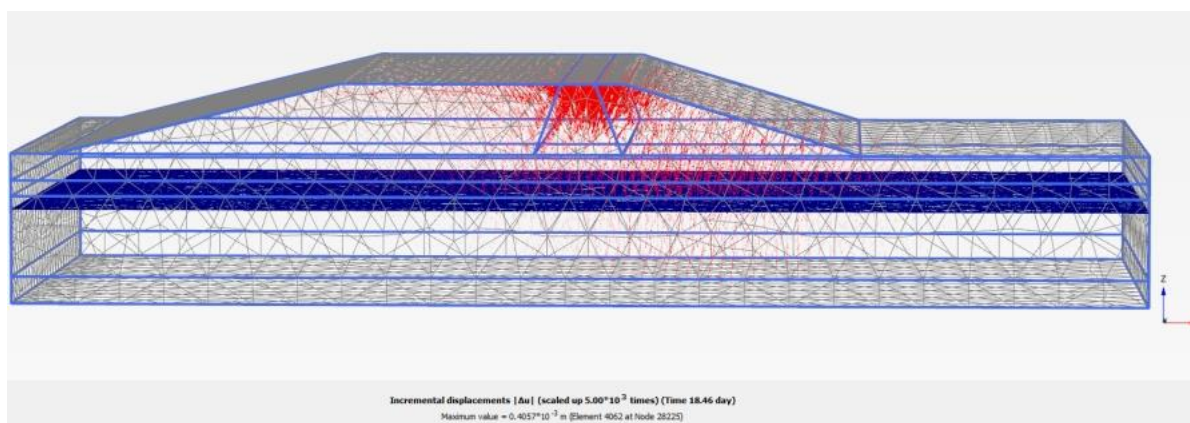


Рисунок 10 - Представление полученных результатов на рисунке 13 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения

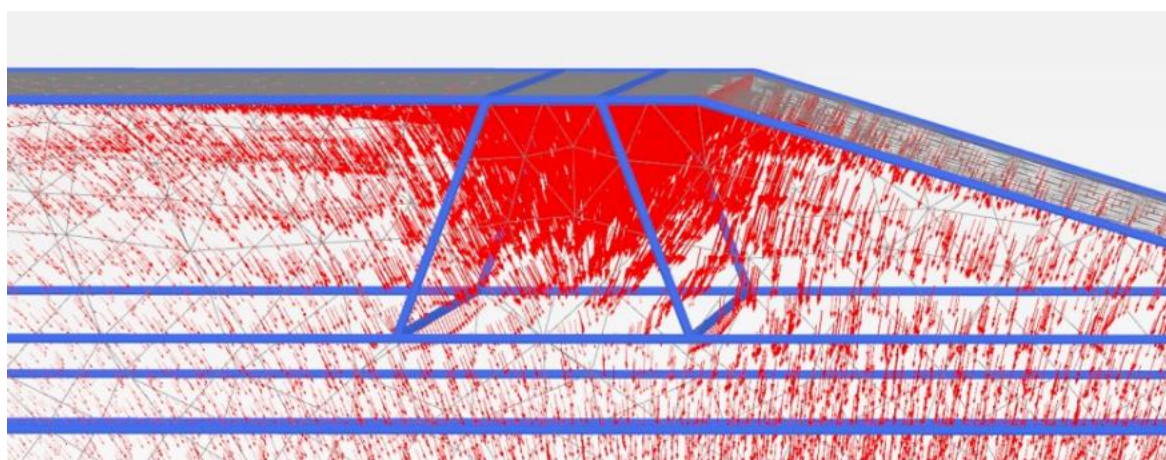


Рисунок 11 - Фрагмент разрушения ядра грунтовой перемычки

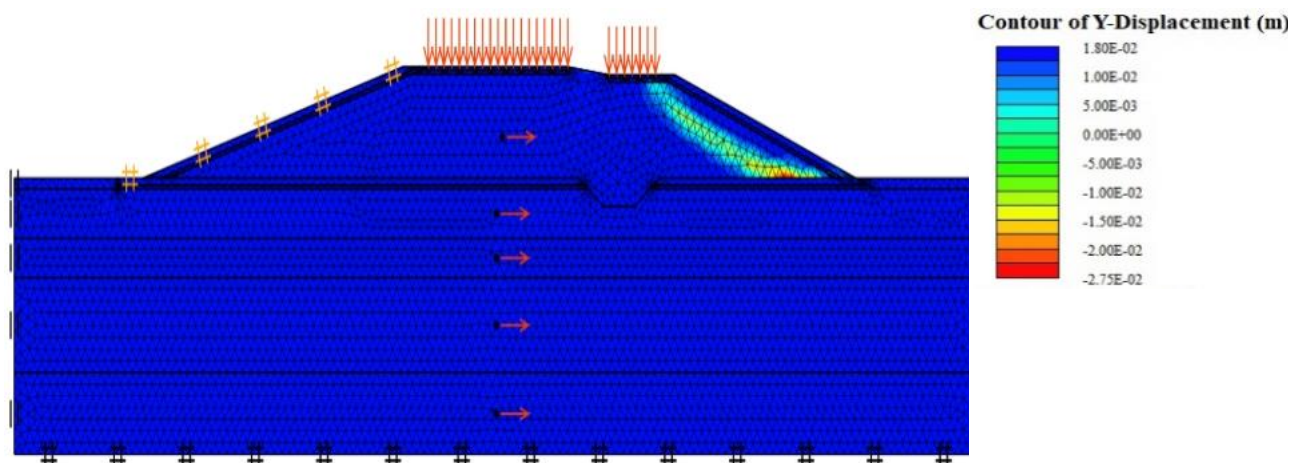


Рисунок 12 - Схема потенциального разрушения перемычки при действии сейсмических нагрузок и при максимальном уровне воды в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,26

Критерием обеспечения устойчивости (несущей способности) системы «Сооружение-основание» по СП 23.13330.2018 является выполнение условия:

где F и R – расчетные значения соответственно обобщенных сдвигающих сил и сил предельного сопротивления или моментов сил, стремящихся сдвинуть (повернуть) и удержать систему «сооружение-основание» или склон;

γ_c – коэффициент сочетания нагрузок, принимаемы равный 1,00 при основном сочетании нагрузок;

γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый равным 1,20 для сооружений II класса;

γ_c – коэффициент условия работы, учитывающий тип сооружения, принимаемый равным 1,00.

Предлагаемый вариант перемычки обеспечивает запас устойчивости при действии сейсмических нагрузках: $1,26 > 1,20$.

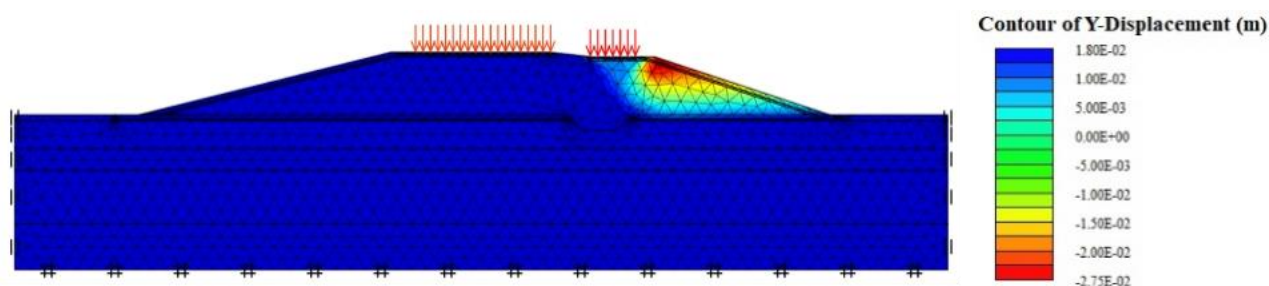


Рисунок 13 - Схема потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,58

Предлагаемый вариант перемычки обеспечивает запас устойчивости при основном сочетании нагрузок: $1,58 > 1,20$.

Фильтрационный расчет перемычки

Фильтрационный расчет перемычки выполняется в соответствии с пунктом 9.4 СП 39.13330.2012. Фильтрационный расчет выполняется в двухмерной постановке методом конечных элементов. Результаты расчетов представлены на рис. 19, 21.

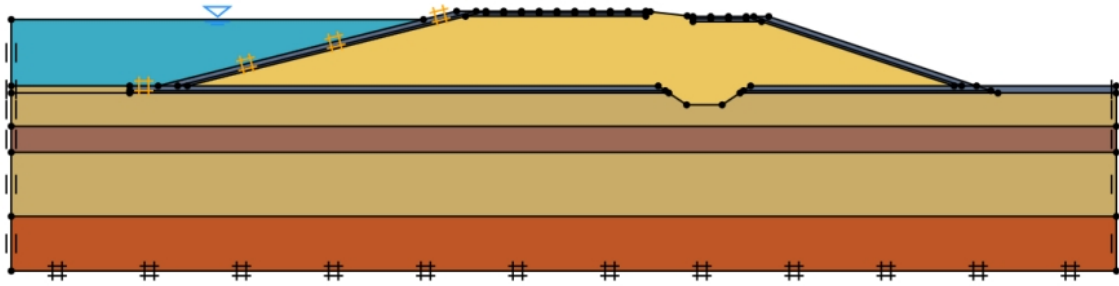


Рисунок 14 - Расчетная схема к анализу фильтрации перемычки методом конечных элементов (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

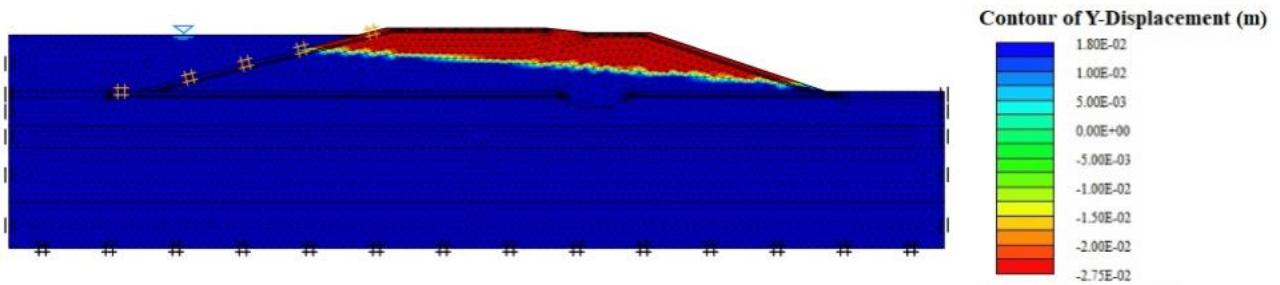


Рисунок 15 - Положение депрессионной поверхности в теле перемычки (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

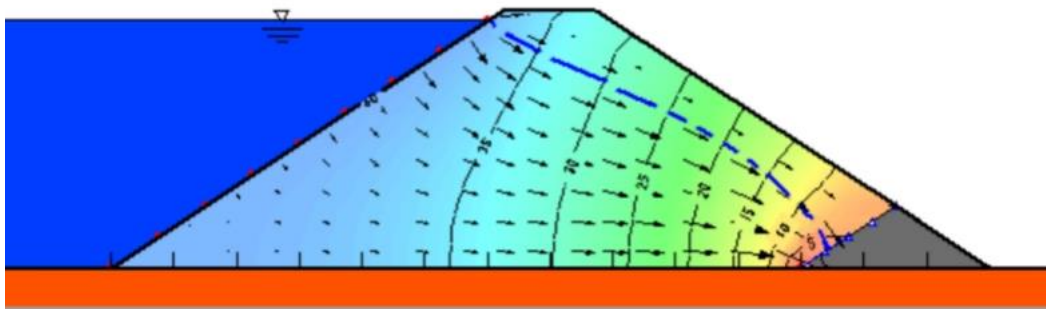


Рисунок 16 - Схема потока воды внутри перемычки

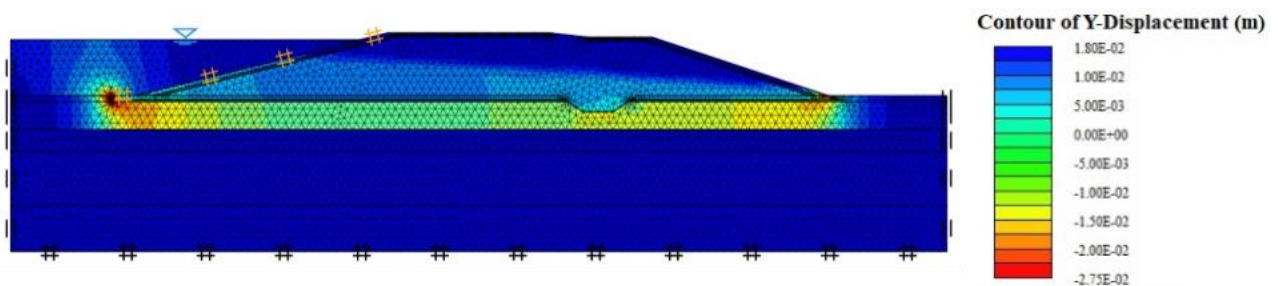


Рисунок 17 - Распределение потока в теле перемычки и в основании (см. рис. 4, сечение 1-1) в программном комплексе Adonis

Согласно рис. 17, депрессионная поверхность в теле перемычки не гасится к ее окончанию, это вызвано тем, что расчет производился на максимально-возможный уровень воды в верхнем бьефе в случае аварийных ситуаций на водохранилище или иных, рядом расположенных гидроузлах. Производить увеличение перемычки не целесообразно с экономической точки зрения, т.к. согласно рис. 14 и 15, она обладает достаточным коэффициентом устойчивости.

Для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки необходимо предусматривать горизонтальный дренаж [11].

Определение критических градиентов контактного размыва и проверка на отсутствие контактного размыва по подошве перемычки

Критический градиент размыва на контакте грунтов определяется по следующей формуле СП:

$$I_{кр.конт.} = \frac{1,35}{\sqrt{D_0^{max}}} = 1 \quad (2)$$

где D_0^{max} – максимальный диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта.

$$D_0^{max} = \kappa \cdot D_0 = 1,5 \cdot 0,05 = 0,008 \text{ см} \quad (3)$$

κ – коэффициент неравномерности раскладки частиц в грунте, величина κ составляет: для грунтов с коэффициентом разнородности $\eta \leq 25$:

$$\kappa = 1 + 0,05 \cdot \eta = 1 + 0,05 \cdot 10 = 1,5 \quad (4)$$

где η – коэффициент разнородности грунта, принимаемый 10:

$$D_0 = 0,46 \cdot \sqrt[6]{\eta} \cdot \frac{n}{1-n} \cdot d_{17} = 0,46 \cdot \sqrt[6]{10} \cdot \frac{0,33}{1-0,33} \cdot 0,14 = 0,05 \text{ мм} \quad (5)$$

где D_0 – средний диаметр фильтрационных пор крупнозернистого грунта;

n – пористость (в долях единицы), принимаемая 0,33;

d_{17} – размеры частиц основания, меньше которых содержится 17% частиц по массе, принимаемые 0,14.

$$l_{кр.конт.} = \frac{1,35}{\sqrt{0,008}} - 1 = 14,17$$

Отсутствие размыва по подошве перемычки обеспечивается при условии:

$$l_{д.конт.} \leq \frac{1}{\gamma_n} \cdot l_{кр.конт.} \quad (6)$$

$$0,5 \leq \frac{1}{1,1} \cdot 14,17 = 12,9$$

Действующий градиент напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует.

Проверка устойчивости грунта на низовом откосе.

Грунт в области выхода кривой депрессии на откос считается устойчивым, если удовлетворяется условие [24]:

$$m_H = 3 > \frac{2}{tg\varphi_T} = \frac{2}{tg31^\circ} = 3,3 \quad (7)$$

где φ_T – угол внутреннего трения грунта тела плотины.

Поскольку условие устойчивости не выполняется, низовой «сухой» откос в пределах заклинивания на него кривой депрессии покрывается слоем водопроницаемой пригрузки - наклонный дренаж.

Выпор грунта при выходе фильтрационного потока в сторону «сухого» откоса

Выпор грунта может появиться за пределами подземного контура сооружения, при выходе фильтрационного потока в сторону «сухого» откоса, где должен располагаться дренаж, выполняющий одновременно и роль пригрузки грунта основания.

Проверку грунта на выпор в области «сухого» откоса следует выполнять при условии, если максимальный выходной градиент напора со стороны «сухого» откоса:

$$I_{\text{ВЫХ}} > 0,60 - 0,70 \quad (8)$$

При максимальном значении выходного градиента напора в сторону «сухого» откоса:

$$I_{\text{ВЫХ}}^{\text{МАКС}} \geq I_{\text{КР}}^{\text{В}} \quad (9)$$

где $I_{\text{КР}}^{\text{В}}$ – критический градиент выпора для данного грунта основания, величина которого определяется по формуле, при отсутствии пригрузки в месте выхода фильтрационного потока для мелкозернистых песчаных грунтов:

$$I_{\text{КР}}^{\text{В}} = \left(\frac{\Delta}{\gamma_{\text{В}}} - 1 \right) \cdot (1 - n) \cdot \alpha \quad (10)$$

где Δ – удельный вес частиц грунта;

$\gamma_{\text{В}}$ – объемный вес воды;

n – пористость грунта в долях единицы;

α – поправочный коэффициент (0,90-0,95).

$$\Delta = \rho \cdot g = 1,7 \cdot 9,81 = 16,68 \text{ кН/м}^3 \quad (11)$$

где ρ – плотность грунта;

g – ускорение силы тяжести (9,81 м/с²).

Пористость грунта определяется по формуле:

$$n = \frac{\rho_s - \rho_d}{\rho_s} = \frac{1,7 - 1,2}{1,7} = 0,5 \quad (12)$$

где ρ_s – плотность частиц грунта;

ρ_d – плотность сухого грунта.

$$I_{\text{КР}}^{\text{В}} = \left(\frac{16,68}{9,8} - 1 \right) \cdot (1 - 0,5) \cdot 0,9 = 0,32$$

В виду того, что:

$$I_{кр}^B(0,32) < I_{вых}(0,6)$$

выпор грунта отсутствует.

Учет осадки при расчете высоты плотины

При назначении проектной отметки гребня осадка перемычки и ее основания в эксплуатационный период не учитывается. В связи с этим отметка гребня сооружения в момент окончания строительства должна превышать проектную на ожидаемую эксплуатационную осадку.

Для приближенной оценки вертикальных деформаций гребня грунтовой дамбы используются эмпирические зависимости.

Размер конечной (стабилизированной) осадки гребня S_c и ее распределение во времени определяется по эмпирическим формулам [28]:

$$S_c = -0,453 \cdot (1 - \exp(0,08 \cdot H_{пл})) = -0,453 \cdot (1 - \exp(0,09 \cdot 0,06)) = 0,002 \text{ м} \quad (13)$$

$$S_t = S_c \cdot \exp(-0,693 \cdot t^{-1,157}) = 0,002 \cdot \exp(-0,693 \cdot 10^{-1,157}) = 0,0019 \text{ м} \quad (14)$$

где $H_{пл}$ – высота плотины;

t – продолжительность осадки, лет.

Для предварительных расчетов ориентировочно запас на осадку тела перемычки принимается: для плотин высотой до 10...15 м из песчаных грунтов – $0,01 \cdot H_{пл}$.

Запас на осадку основания S_c принимают: для низких плотин на плотных песчаных или суглинистых грунтах мощностью более $0,25 H_{пл}$ – $(0,01-0,02) H_{пл}$.

Нестабильную осадку основания определяют по эмпирической формуле:

$$S_t = S_c \cdot (1 - 2,7^{-0,5t}) = 0,002 \cdot (1 - 2,7^{-5}) = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м} \quad (15)$$

где S_t – осадка за время от начала приложения нагрузки;

S_c – стабилизированная осадка.

Выводы

1. Фильтрационная устойчивость грунтовой перемычки, как временного гидротехнического сооружения обеспечивается, по действующему градиенту напора на контакте двух грунтов значительно меньше допустимого градиента, т.е. размыв отсутствует.

2. Представленные полученные результаты на рисунке 13 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения перемычек плотин. Производить работы по замене ремонтных ворот шлюза под защитой грунтовой перемычки возможно только с соблюдением требований нормативно-технической документации и проведением необходимых расчетов. После проведения строительно-монтажных работ, грунтовая перемычка демонтируется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: https://morflot.gov.ru/devatelnost/napravleniya_devatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnicheskie_sooruzheniya/?ysclid=1qiehl5a647160453 (дата посещения 22.12.2023 г.).
2. Федеральный закон от 27.07.1997 г. № 117-ФЗ «О безопасности гидротехнических сооружений» // Собрание законодательства РФ. – 28.07.1997. – № 30. – Ст. 3589.
3. Колосов М. А. Диагностика состояния камеры шлюза по степени гашения напора на верхней голове // 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 // инновации и инвестиции. – 2017. № 8. – С. 157-160.
5. МУ 050-025-2001. Методические указания. Определения технического состояния металлоконструкций ворот и затворов СГТС. – М.: ФГУП ЦБНТИМТ РФ, 2002. – 86 с.

6. Кульмицкий М.Л. Расчетные исследования влияния коррозионного износа на прочность металлоконструкций ворот и затворов шлюзов // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С. О. Макарова. – 2016. - № 1 (35). – С. 60-66.
7. Федеральный закон от 30.12.2009 № 384-ФЗ «Технический регламент о безопасности зданий и сооружений» // Собрание законодательства РФ. – 04.01.2010. - № 1. – Ст. 5.
8. Лапин Г. Г. Организация гидротехнического строительства: практическое пособие для проектировщиков, строителей и студентов вуза // . – Москва, 2021. – 189 с. – ISBN 978-56044903-1-0.
9. Телешев В. И. Организация, планирование и управление гидротехническим строительством // В. И. Телешев. – Москва : Стройиздат, 1989. – 416 с.
10. Рассказов Л. Н. Гидротехнические сооружения. Часть 1 / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Н. А. Анискин. – 2-е изд. – Москва : Изд-во Ассоциации строительных вузов: под редакцией Л. Н. Рассказова, 2011. – 575 с.
11. 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). Введ. 1991-02-22. – М., 1991 – 162 с.
12. Праведный Г. Х. Подготовка скальных оснований плотин из грунтовых материалов / Г. Х. Праведный, В. Г. Радченко – Ленинград : Изд-во Энергия, 1973. – 82 с.
13. Буренкова В. В. Отечественный опыт оценки фильтрационной прочности несвязных грунтов тела плотины и основания // Природообустройство. – 2020. – № 4. – С. 84-91.
14. СП 39.13330.2012. Плотины из грунтовых материалов. Актуализированная редакция СНиП 2.06.05-84. Введ. 2013-01-01. – М., 2013 – 58 с.
15. URL: <http://geowizard.org/index.html> (дата посещения 22.12.2023 г.).
16. URL: <https://www.plaxis.ru> (дата посещения 22.12.2023 г.).
17. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks // Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering. 2018. Vol. 10.Iss. 4. Pp. 645-652.
18. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. Classical Method and Numerical Modeling for De-signing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 2016. 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
19. П 56-90/ВНИИГ. Рекомендации по проектированию обратных фильтров гидротехнических сооружений. С.-Петербург, 1992 – 110 с.
20. ВСН 04-71. Указания по расчету устойчивости земляных откосов. «Энергия», 1971 – 105 с.
21. Чугаев Р.Р. Гидравлика. Л.: Энергоиздат. Ленинградское отделение, 1982. - 672 с.
22. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. Часть 1. Глухие плотины. Агропромиздат, 1985. - 318 с.
23. Чугаев Р.Р. Гидротехнические сооружения. Часть 2. Водосливные плотины. Агропромиздат, 1985. - 302 с.
24. Расчёт водохранилища: водохозяйственное обоснование и определение параметров. Часть II. Расчёт параметров грунтовой плотины: методические указания к выполнению практических работ по курсам «Проектирование водохозяйственных систем», «Водохозяйственные сооружения» и «Инженерные сооружения» для студентов V курса, обучающихся по специальностям 280302 «Комплексное использование и охрана водных ресурсов» и 130302 «Поиски и разведка подземных вод и инженерно-геологические изыскания» / О.Г. Савичев, В.В. Крамаренко. –Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2009. – 40с.

REFERENCES

1. URL: https://morflot.gov.ru/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnic_heskie_sooruzheniya/?ysclid=lqiehilt5a647160453 (date of visit 12/22/2023).
2. Federal Law of 07/27/1997 No. 117-FZ "On the Safety of Hydraulic Structures" // Collected Legislation of the Russian Federation. - 07/28/1997. - No. 30. - Art. 3589.
3. Kolosov, M. A. Diagnostics of the lock chamber condition by the degree of pressure damping on the upper head. *Bulletin of the Admiral*. – 2014. - No. 2 (83). – Pp. 83-86.
4. Sokolova, Yu. A. Causes of atmospheric corrosion of metal structures and methods of protection *Innovations and investments*. – 2017. No. 8. – Pp. 157-160.
5. MU 050-025-2001. Methodical instructions. Definitions of the technical condition of metal structures of gates and valves of the SGTS. – М.: FSUE TsBNTIMT RF, 2002. – 86 p.
6. Kulmitsky, M.L. Calculation studies of the effect of corrosive wear on the strength of metal structures of gates and valves of locks. *Bulletin of the Admiral*. – 2016. - No. 1 (35). – Pp. 60-66.

7. Federal Law of 30.12.2009 No. 384-FZ "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures". *Collection of Legislation of the Russian Federation*. – 04.01.2010. - No. 1. – Art. 5.
8. Lapin, G. G. Organization of hydraulic engineering construction: a practical guide for designers, builders and university students. – Moscow, 2021. – 189 p. – ISBN 978-56044903-1-0.
9. Teleshev, V. I. Organization, planning and management of hydraulic engineering construction. – Moscow: Stroyizdat, 1989. – 416 p.
10. Rasskazov, L. N. Hydraulic engineering structures. Part 1 - 2nd ed. - Moscow: Publishing house of the Association of construction universities: edited by L. N. Rasskazov, 2011. - 575 p.
11. P-885-91. Manual on the technology of construction of dams from earth materials to SNiP 2.06.05-84 and SNiP 3.07.01-85" (approved. All-Union Order of Lenin Design and Survey Research Association "Gidroproekt" named after S. Ya. Zhuk on 22.02.1991). Introduced. 1991-02-22. - M., 1991 - 162 p.
12. Pravedny, G. Kh. Preparation of rocky foundations of dams from earth materials - Leningrad: Energia Publishing House, 1973. - 82 p.
13. Burenkova, V. V. Domestic experience in assessing the filtration strength of non-cohesive soils of the dam body and foundation. *Nature management*. - 2020. – No. 4. – P. 84-91.
14. SP 39.13330.2012. Dams made of earth materials. Updated version of SNiP 2.06.05-84. Introduced 2013-01-01. – M., 2013 – 58 p.
15. URL: <http://geowizard.org/index.html> (date of visit 12/22/2023).
16. URL: <https://www.plaxis.ru> (date of visit 12/22/2023).
17. Baotang Shen, Jingyu Shi, Nick Barton, An approximate nonlinear modified Mohr-Coulomb shear strength criterion with critical state for intact rocks. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*. 2018. Vol. 10.Iss. 4. pp. 645-652.
18. Hassani, Rahim & Basirat, Rouhollah & Mahmoodian, Navid. Classical Method and Numerical Modeling for De-signing of Sheet Pile Wall (Case Study: Tuti-Bahri Bridge, Sudan). 2016. 10.13140/RG.2.2.10294.91208.
19. P 56-90/VNIIG. Recommendations for the design of reverse filters of hydraulic structures. S.-Peretrubr, 1992 – 110 p.
20. VSN 04-71. Guidelines for calculating the stability of earth slopes. "Energy", 1971 – 105 p.
21. Chugaev R.R. Hydraulics. L.: Energoizdat. Leningrad Branch, 1982. - 672 p.
22. Chugaev R.R. Hydraulic structures. Part 1. Blind dams. Agropromizdat, 1985. - 318 p.
23. Chugaev R.R. Hydraulic structures. Part 2. Spillway dams. Agropromizdat, 1985. - 302 p.
24. Reservoir calculation: water management justification and determination of parameters. Part II. Calculation of parameters of an earth dam: guidelines for practical work on the courses "Design of water management systems", "Water management structures" and "Engineering structures" for fifth-year students studying in the specialties 280302 "Complex use and protection of water resources" and 130302 "Prospecting and exploration of groundwater and engineering-geological surveys". - Tomsk: Publishing house of Tomsk Polytechnic University, 2009. - 40 p.

Информация об авторе

Фёдоров Виктор Сергеевич

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ)

Доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Строительные конструкции, здания и сооружения».

E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Купчикова Наталья Викторовна

ФГАОУ ВО «Российский университет транспорта» (РУТ МИИТ),

старший научный сотрудник ГБУ НИИ «МосТрансПроект»,

E-mail: kupchikova79@mail.ru

Рекунов Сергей Сергеевич

Волгоградский государственный технический университет,

к.т.н., доцент кафедры «Строительная механика»

E-mail: rekunoff@mail.ru

Федосюк Игорь Викторович

ООО «МКЛ Плюс», г. Волгоград,

главный инженер проекта

E-mail: iviktorovich34@mail.ru

Information about author

Fyodorov Viktor S.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (RUT MIIT)
Doctor of Engineering Sciences, Professor, Head of the Department of "Building Structures, Buildings and Facilities".
E-mail: fvs_skzs@mail.ru

Kupchikova Natalya V.

Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "Russian University of Transport" (RUT MIIT),
Senior Researcher of the State Budgetary Institution Research Institute "MosTransProekt",
E-mail: kupchikova79@mail.ru

Rekunov Sergey S.

Volgograd State Technical University,
PhD, Associate Professor of the Department of "Structural Mechanics"
E-mail: rekunoff@mail.ru

Fedosyuk Igor V.

ООО "MKL Plus", Volgograd,
Chief Project Engineer
E-mail: iviktorovich34@mail.ru