

15. Чепурненко В. С. Совершенствование расчета гибких трубобетонных колонн с учетом обжатия в плоскостях сечений / В. С. Чепурненко, К. Н. Хашхожев, С. Б. Языев, А. А. Аваков // Строительные материалы и изделия. – 2021. – Т. 4, № 3. – С. 41–53.

© А. Е. Евсеев, И. Н. Гарькин, Э. Ю. Абдуллазянов

Ссылка для цитирования:

Евсеев А. Е., Гарькин И. Н., Абдуллазянов Э. Ю. Формирование матриц жёсткости стержня по дифференциальному уравнению при его изгибе // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 3 (49). С. 57–65.

УДК 625.731; 627.8

DOI 10.52684/2312-3702-2024-49-3-65-73

**ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФИЛЬТРАЦИОННОЙ УСТОЙЧИВОСТИ
ГРУНТОВЫХ ПЕРЕМЫЧЕК ПЛОТИН**

С. С. Рекунов, Н. В. Купчикова, И. В. Федосюк

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 транспорта (РУТ МИИТ); старший научный сотрудник, научно-исследовательский институт городского транспорта города Москвы «МосТрансПроект», г. Москва, Российская Федерация; e-mail: kupchikova79@mail.ru;

Федосюк Игорь Викторович, главный инженер проекта, ООО «МКЛ Плюс», г. Волгоград, Российская Федерация; e-mail: iviktorovich34@mail.ru

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 проведено исследование потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок с помощью численного моделирования. Выполнен анализ фильтрационной устойчивости методом конечных элементов при динамических воздействиях. Разработаны предложения для исключения скопления профильтровавшейся воды через тело перемычки.

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

NUMERICAL SIMULATION OF FILTRATION STABILITY OF DAMS' GROUND BRIDGES

S. S. Rekunov, N. V. Kupchikova, I. V. Fedosyuk

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

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

Fedosyuk Igor Viktorovich, Chief Project Engineer, MKL Plus LLC, Volgograd, Russian Federation; e-mail: iviktorovich34@mail.ru

As a result of studying the influence of structural and technological solutions for the device of bridges, as temporary navigable hydraulic structures on filtration processes and the stability of the embankment of the core of the dam under operational influences, the following were performed: analysis of structural and technological solutions for the device of bridges of the SGTS; 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; criteria have been identified to ensure the filtration strength of the soil for filling the core of a soil dam; a study of the potential destruction of the jumper was carried out when calculating the main combination of loads using numerical modeling; analysis of the filtration stability of the jumper by the finite element method under dynamic influences; proposals have been developed to eliminate the accumulation of filtered water through the body of the bridge.

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

Введение

Перекрытие русла реки в гидротехнических сооружениях 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 [1-10]. 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, водопрооницаемости 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.

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.

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.

Расчет устойчивости перемычки

Метод

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 и обсуждение

Общий вид расчетной схемы представлен рисунках 1 и 2. Результаты расчетов устойчивости для наиболее опасных расчетных случаев представлены на рисунках 3–7.

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

$$\frac{R}{F} > \frac{\gamma_{lc} \cdot \gamma_n}{\gamma_c} = \frac{1,00 \cdot 1,20}{1,00} = 1,20, \quad (1)$$

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, принимаемый равным 1,00 при основном сочетании нагрузок; γ_n – коэффициент надежности по ответственности сооружения, принимаемый равным 1,20 для сооружений II класса; γ_{lc} – коэффициент условия работы, учитывающий тип сооружения, принимаемый равным 1,00.

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

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 двумерной постановке методом конечных элементов. Результаты расчетов представлены на рисунке 8.

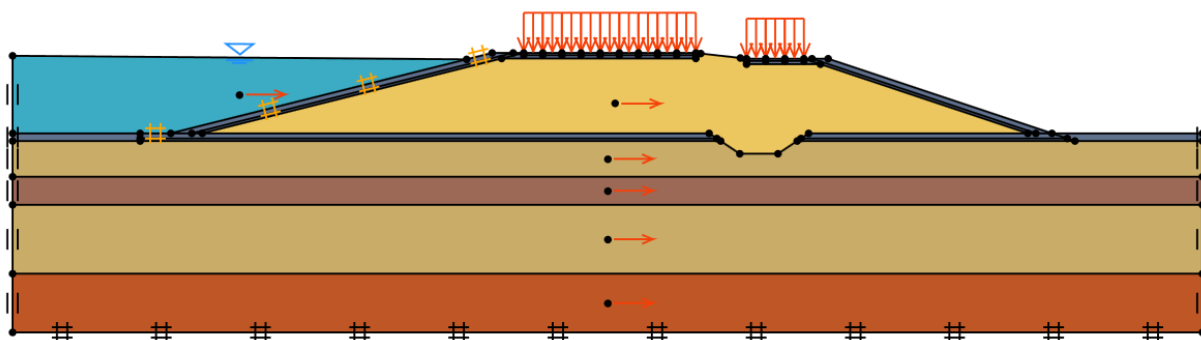


Рис. 1. Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов в программном комплексе Adonis

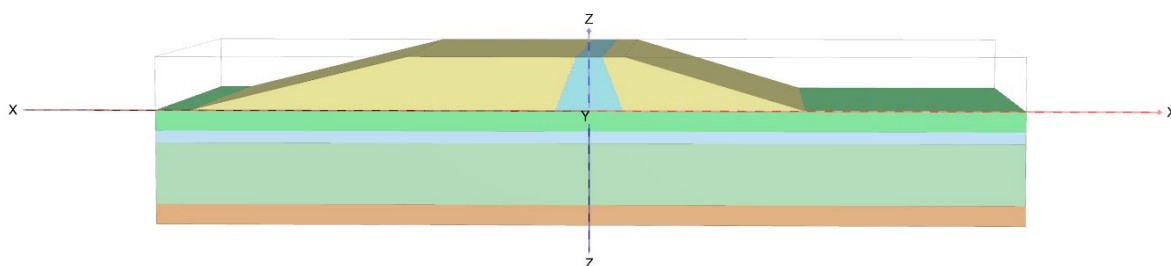


Рис. 2. Общий вид расчетной схемы для анализа устойчивости откосов перемычки методом конечных элементов в программном комплексе Plaxis

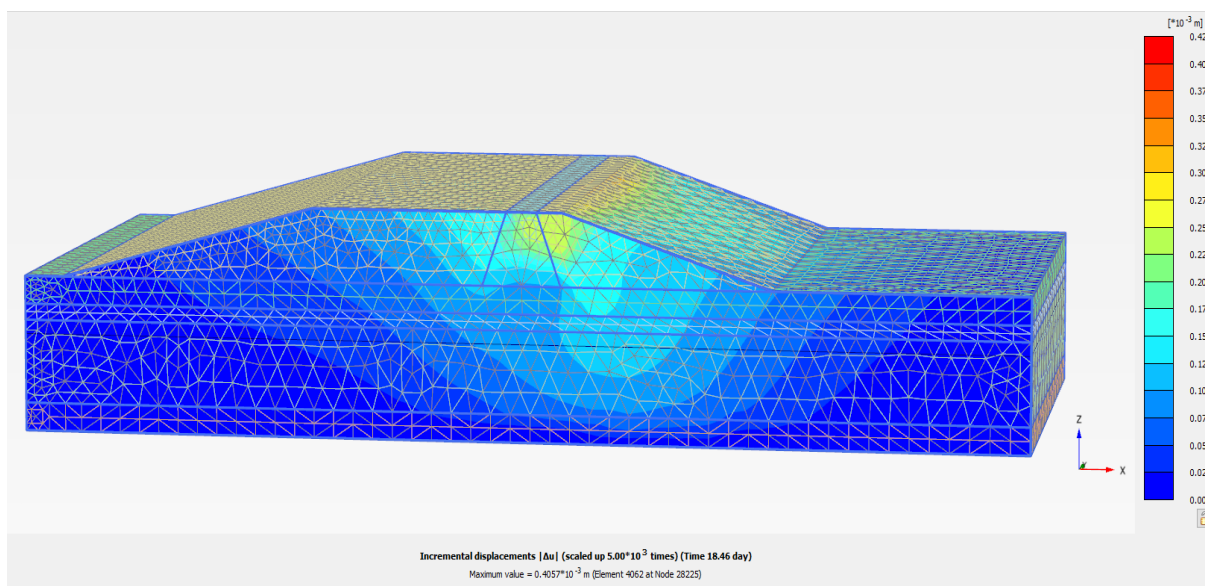


Рис. 3. Схема потенциальных перемещений в теле грунтовой перемычки в программном комплексе Plaxis (позволяет наблюдать механизм разрушения)

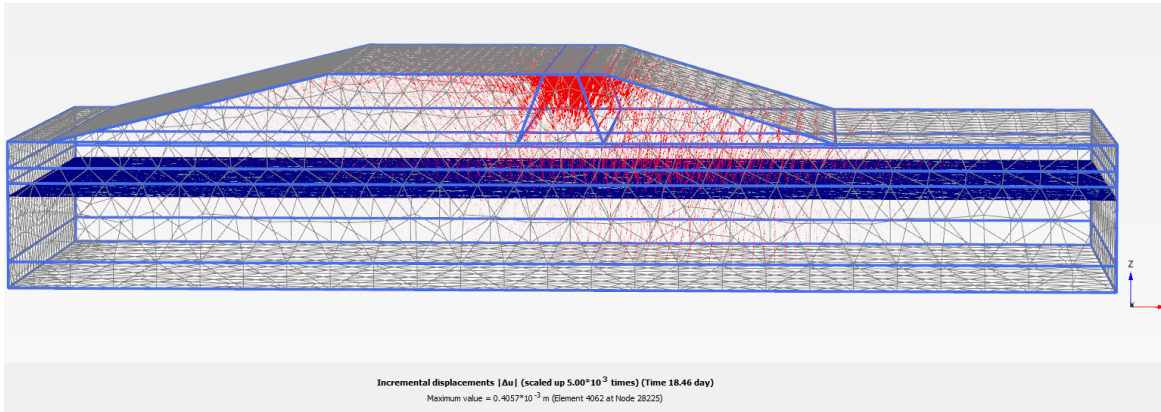


Рис. 4. Представление полученных результатов на рисунке 1 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения

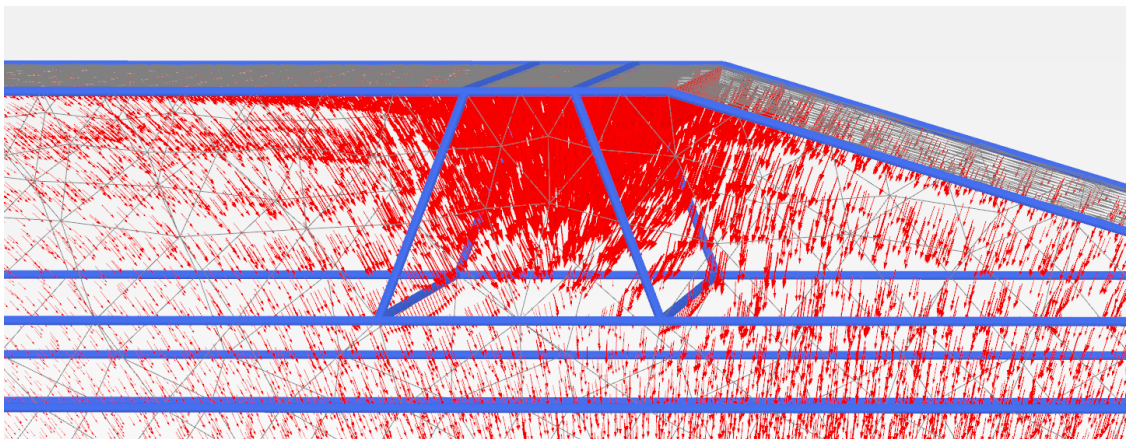


Рис. 5. Фрагмент разрушения ядра грунтовой перемычки

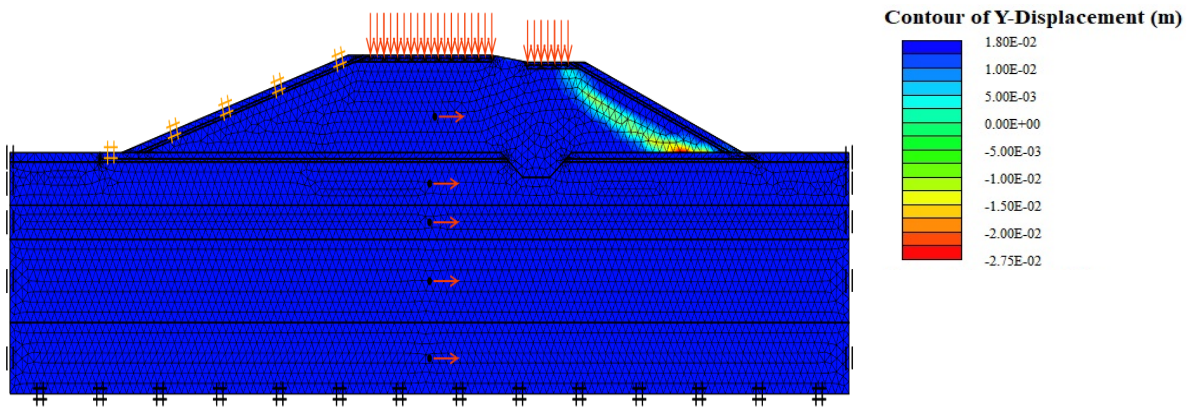


Рис. 6. Схема потенциального разрушения перемычки при действии сейсмических нагрузок и при максимальном уровне воды в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,26

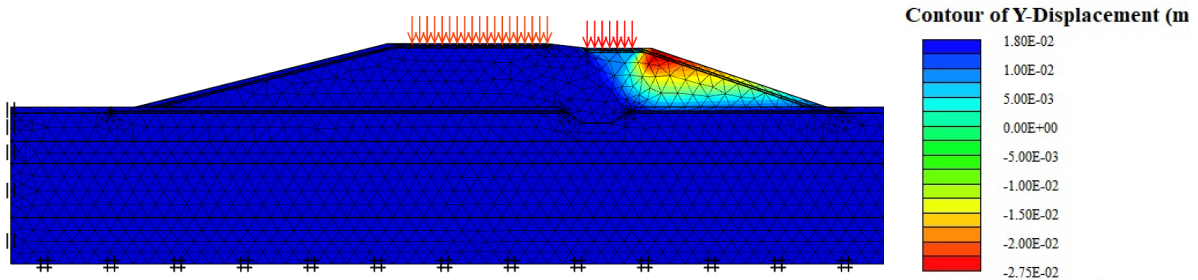


Рис. 7. Схема потенциального разрушения перемычки при расчете на основное сочетание нагрузок в программном комплексе Adonis. Коэффициент запаса по устойчивости – 1,58

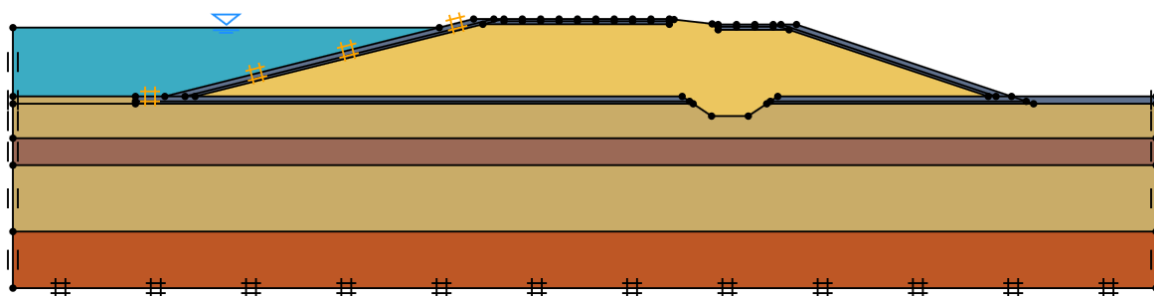


Рис. 8. Расчетная схема к анализу фильтрации перемычки методом конечных элементов в программном комплексе Adonis

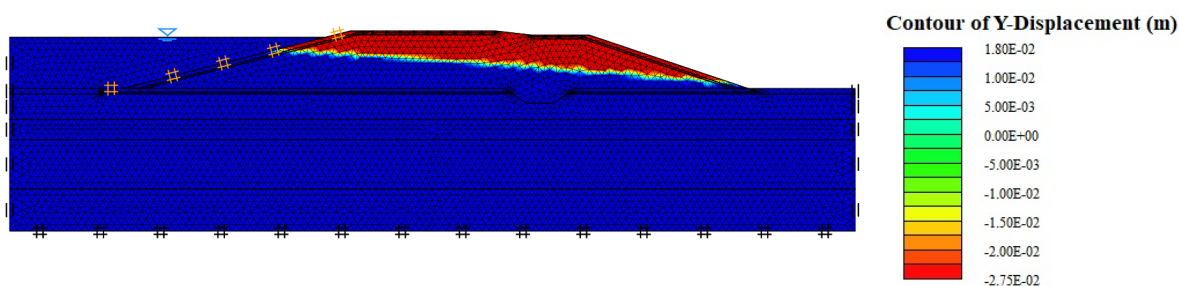


Рис. 9. Положение депрессионной поверхности в теле перемычки в программном комплексе Adonis

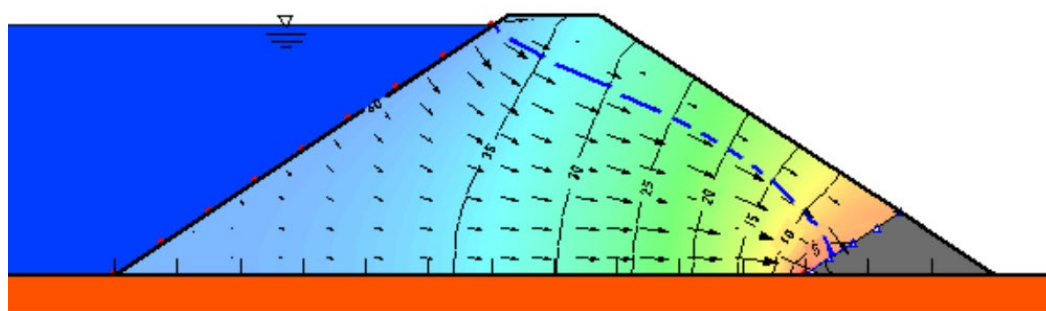


Рис. 10. Схема потока воды внутри перемычки

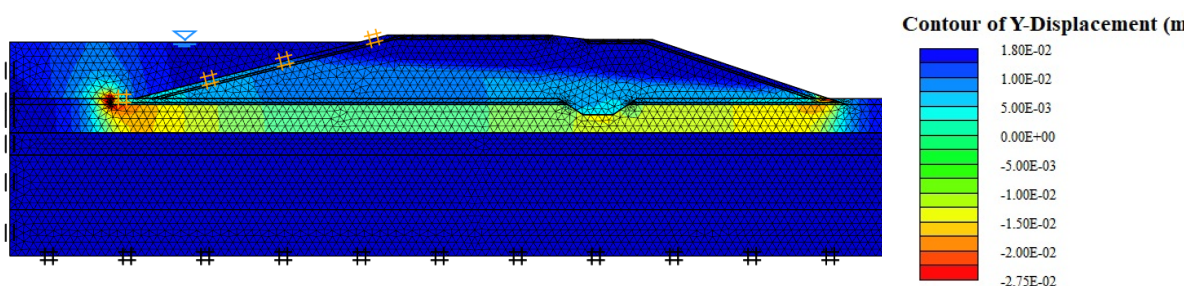


Рис. 11. Распределение потока в теле перемычки и в основании в программном комплексе Adonis

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 профильтрованной 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.

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

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

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

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.

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

Отсутствие размыва по подошве перемычки обеспечивается при условии:

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

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

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]:

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

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 водонепроницаемой 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:

$$I_{вых.} > 0,60 - 0,70 \quad (8)$$

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

$$I_{вых}^{max} \geq I_{кр}^B, \quad (9)$$

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

$$I_{кр}^B = \left(\frac{\Delta}{\gamma_b} - 1 \right) \cdot (1 - n) \cdot \alpha, \quad (10)$$

где Δ – удельный вес частиц грунта; γ_b – 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.

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

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 деформацией гребня грунтовой дамбы используются эмпирические зависимости.

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

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

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

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:

$$S_t = S_c \cdot (1 - 2,7^{-0,5 \cdot t}) = 0,002 \cdot (1 - 2,7^{-5}) = 4,9 \cdot 10^{-3} \text{ м}, \quad (41)$$

где S_t – осадка за время от начала приложения нагрузки; S_c – стабилизированная осадка.

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

Представление полученных результатов на рисунке 13 с помощью «стрелок» позволяют наблюдать более точный механизм разрушения. 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/deyatelnost/napravleniya_deyatelnosti/rechnoy_flot/vvt/sudohodnyie_gidrotehnicheskie_sooruzheniya/?ysclid=lqiehilt5a647160453 (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 / 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. – М.: 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. 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 // Г. Г. Лапин. – 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-исследовательским 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 / В. В. Буренкова, П. М. Буренков // 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 Designing 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.

© С. С. Рекунов, Н. В. Купчикова, И. В. Федосюк

Ссылка для цитирования:

Рекунов С. С., Купчикова Н. В., Федосюк И. В. Численное моделирование фильтрационной устойчивости грунтовых перемычек плотин // Инженерно-строительный вестник Прикаспия : научно-технический журнал / Астраханский государственный архитектурно-строительный университет. Астрахань : ГБОУ АО ВО «АГАСУ», 2024. № 3 (49). С. 65–73.