

УДК 627.8

РОЗРАХУНКИ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ МІЦНОСТІ ТА СТІЙКОСТІ БЕТОННОЇ ГРАВІТАЦІЙНОЇ ГРЕБЛІ НА ПРИКЛАДІ ГЕС ГЕРПЕД У ЕФІОПІЇ

К. М. Муравинець

студентка 5 курсу, групи ГЕ-51м, навчально-науковий механіко-енергетичний інститут
Науковий керівник – д.т.н., професор О. А. Рябенко

*Національний університет водного господарства та природокористування, м. Рівне,
Україна*

У статті розглядається вимоги щодо розрахунку напружено-деформованого стану, міцності та стійкості гребель, а також граничні стани забезпечення стійкості гідроспоруди. Основою для статті є дослідження напружено-деформованого стану бетонної гравітаційної греблі ГЕС Герпед, які проводилися методом кінцевих елементів за допомогою використання новітнього програмного комплексу «ABAQUS». **Ключові слова:** напружено-деформований стан, граничні стани, метод кінцевих елементів, гравітаційний метод, програмний комплекс «ABAQUS».

В статье рассматриваются требования по расчету напряженно-деформированного состояния, прочности и устойчивости плотин, а также предельные состояния обеспечения устойчивости гидросооружения. Основой для статьи является исследование напряженно-деформированного состояния бетонной гравитационной плотины ГЭС Герпед, которые проводились методом конечных элементов с помощью использования новейшего программного комплекса «ABAQUS».

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, предельные состояния, метод конечных элементов, гравитационный метод, программный комплекс «ABAQUS».

This paper deals with the requirements for the calculation of the stress-strain state, strength and stability of dams and boundary conditions to ensure the stability of hydraulic structures. The basis for the paper is to investigate the stress-strain state of concrete gravity dam hydroelectric Herped that provodylyya finite element method by using the latest software complex «ABAQUS».

Keywords: stress-strain state, boundary conditions, finite element method, the gravitational method, program complex «ABAQUS».

Для оцінки стану гідротехнічних споруд, найбільш важливе значення має аналіз напружено-деформованого стану, який дозволяє виявляти особливості роботи споруди небезпечні для її міцності та стійкості, перевірити та уточнити розрахункові методи та передумови, що були прийняті у проекті.

Вимоги розрахунку стійкості зводяться до того, щоб величини зусиль, напружень та деформацій, що виникають у спорудах від навантажень не перевищували граничних значень, які визначаються нормами проектування. При цьому розглядаються найбільші навантаження та силові впливи, при яких споруда здатна працювати нормально – N. Проте на практиці можливі відхилення від цих навантажень у несприятливу сторону, внаслідок зміни природних факторів або умов експлуатації. Ці відхилення враховуються коефіцієнтом перевантаження (n), який встановлюється в залежності від умов експлуатації. Тому в

розрахунках зазвичай враховується розрахункове значення загальної силової дії N_p , яке отримуємо:

$$N_p = N_{rn} \quad (1)$$

Існує два граничні стани забезпечення стійкості гідроспороди [1]. Перший граничний стан споруд (міцність, стійкість) настає, коли загальне розрахункове навантаження N_p досягає розрахункового значення загальної несучої здатності споруд (основи) R . Величина R враховує можливі зміни неоднорідності властивостей матеріалів шляхом введення коефіцієнта однорідності k . Оцінка настання першого граничного стану виконується за умовою:

$$\gamma_{fc} \cdot F \leq \frac{\gamma_c}{\gamma_n} \cdot R, \quad (2)$$

де γ_{fc} – коефіцієнт поєднання навантаження;

γ_c – коефіцієнт умов роботи споруди (враховує вид граничного стану, наближеність розрахункових схем, особливості конструкції та матеріалів та ін.);

γ_n – коефіцієнт надійності – враховує ступінь відповідальності, капітальності споруд і значення можливих наслідків в результаті настання граничного стану;

R – узагальнене значення сил, що опираються зсуву, $R = f \cdot V + c \cdot F$.

V – рівнодійна усіх нормальних до площини зсуву сил.

Другий граничний стан – недопущення деформації споруд – зсувів, осідання, нахилів вище граничних, при настанні яких відбувається утруднення або неможливість експлуатації споруди. Приймають такі умови для бетонних гравітаційних гребель (ГЕС Герпед):

$$n_c S_p \leq S_{up} \frac{m}{\gamma_n}, u_p \leq u_{up}, \omega_p \leq \omega_{up}, \quad (3)$$

S_p, u_p, ω_p та $S_{up}, u_{up}, \omega_{up}$ – відповідно, осідання, горизонтальні зміщення, кути нахилу, визначені розрахунком і допустимі.

Стійкість проти зсуву є одним із найважливіших факторів, які визначають безпечність бетонної греблі із укатаного бетону. При цьому необхідно забезпечити стійкість греблі проти зсуву, як по контактному перерізі з основою, так і по швах бетонування.

У відповідності з нормами проектування критерієм забезпечення стійкості проти зсуву є умова:

$$\gamma_n \cdot \gamma_{fc} \cdot F \leq \gamma_{cd} \cdot R, \quad (4)$$

де γ_n, γ_{fc} – коефіцієнт надійності за умови відповідальності споруди і коефіцієнт поєднання навантаження;

γ_{cd} – коефіцієнт умов роботи, який приймається в залежності від розрахункової поверхні зсуву, для площин зсуву, що проходять по контакту бетон скеля $\gamma_{cd} = 0,95$;

Отже залежність для визначення коефіцієнта перевантаження набуває вигляду (для скельних основ) [3]:

$$\gamma_n \leq \frac{\gamma_{cd} \cdot (V \cdot \tan \varphi + c \cdot A)}{\gamma_{fc} \cdot F}, \quad (5)$$

Для розрахунку напружено-деформованого стану ГЕС Герпед використовується гравітаційний метод (метод жорсткого тіла), який заснований на наступних припущеннях:

- Гребля розглядається як двохмірний жорсткий блок;
- Рахується, що всі навантаження прикладені до цього жорсткого блоку.

Визначення коефіцієнта безпеки греблі проти зсуву, виконується в залежності від розподілу нормальних напружень у площині, що розглядається. Це розподілення напружень приймається по лінійному закону в залежності від положення рівнодіючих сил, які прикладені до жорсткого блоку.

В останні роки широкого розвитку отримав розрахунок споруд та основ методом кінцевих елементів (МКЕ). Згідно цього методу гребля розбивається на малі елементи зазвичай трикутної форми (при плоскій задачі – трикутники, при просторовій – тетраедри), і всі навантаження, як об'ємні (власна вага, фільтраційні сили та ін.) так і контурні (тиск води, наносів та ін.) на грані греблі, основи, борта та берега перетворюються в систему зосереджених сил, що прикладені до вузлових точок (вершин) елементів.

Напружено-деформований стан греблі ГЕС Герпед визначається в межах вирішення пружно-пластичної задачі з врахуванням послідовності будівництва споруди і наповнення водосховища. Задача вирішується методом кінцевих елементів з використанням програмного комплексу «ABAQUS». Зважаючи на значну довжину греблі вирішується плоска (двохмірна) приведена задача для розрахункової області.

Розрахункова область включає в себе систему «гребля – основа». Необхідно, щоб розміри прямокутної розрахункової області, що моделює скельну основу, були достатньо великими для виключення впливу на напруження у греблі граничних умов на контурі цієї області. Приймаємо ширину розглядуваної області основи $5H$, а висоту – $2H$, де H – висота греблі.

Для моделювання тіла греблі використовуємо пружнопластичну модель бетону, використання якої передбачено програмою «ABAQUS». При цьому враховується неоднорідність матеріалу тіла греблі, пов'язана з використанням різних видів укатаного бетону в різних зонах греблі [2].

Для моделювання матеріалу основи використовується пружнопластична модель Мора-Кулона.

Моделювання послідовності спорудження греблі ГЕС Герпед виконується етапами висотою 5 м. Така висота етапів дозволяє з достатньою достовірністю врахувати технологію вкладання укатаного бетону. У якості нульового етапу розглядається природний напружений стан скельного масиву, завантаженого силами власної ваги. Послідовність заповнення водосховища враховується двома етапами. Перший етап – наповнення водосховища до відмітки РМО. Другий етап – заповнення водосховища від відмітки РМО до відмітки НПР.

У результаті розрахунків отримані значення напруження, деформації і переміщень у межах розрахункової області, що включають греблю і основу, які наведені у таблиці 1. Для виконання розрахунків міцності та стійкості греблі в рамках механіки однорідного середовища використовується метод редуції.

Суть методу редуції полягає в наступному. Виконуються розрахунки напружено-деформованого стану системи «споруда – основа». Такі розрахунки виконуються доти, доки не буде досягнутий стан граничної рівноваги, при якому розрахунковий процес розходиться (прогресуюче наростання пластичних деформацій). Значення коефіцієнта безпеки з умов міцності і стійкості визначається як відношення значень розрахункових характеристик міцності бетону греблі і зсувних характеристик ґрунтів основи до знижених значень цих характеристик, що відповідають стану граничної рівноваги.

Метод редуції дозволяє отримати більш достовірне значення коефіцієнту безпеки споруди у порівнянні з методом жорсткого тіла, оскільки при використанні методу редуції отримане значення коефіцієнта безпеки відповідає реальному характеру руйнування споруди. При їх визначенні враховуються всі компоненти тензора напружень і відповідні пружні та пластичні деформації матеріалів тіла греблі і основи.

Таблиця

Вертикальні напруження і коефіцієнт безпеки з умов стійкості проти зсуву для секцій глухої бетонної греблі ГЕС Герпед

| Умови завантаження | Розрахункові перетини | Вертикальні напруження, МПа | | Коефіцієнти безпеки з умов стійкості |
|---|---------------------------|-----------------------------|-------------|--------------------------------------|
| | | Верхній б'єф | Нижній б'єф | |
| Звичайні . Навантаження – нормальне експлуатаційне | По контакту бетон – скеля | -0,64 | -2,37 | 2,2 |
| | На відмітці 490 м | -1,2 | -2,49 | 2,57 |
| | На відмітці 566.5 м | -0,73 | -1,09 | 3,12 |
| | На відмітці 621.25 м | -0,44 | -0,27 | 6,56 |
| Екстремальні. Навантаження – нормальне експлуатаційне + максимальний розрахунковий | По контакту бетон – скеля | 0 | -3,3 | 1,7 |
| | На відмітці 490 м | -0,3 | -3,4 | 2,02 |
| | На відмітці 566.5 м | -0,09 | -1,72 | 2,13 |
| | На відмітці 621.25 м | 0 | -0,71 | 3,43 |

Висновки:

1. В рамках плоскої задачі теорії пружнопластичних тіл методом кінцевих елементів виконані розрахунки напружено-деформованого стану, міцності і стійкості всіх секцій греблі із укатаного бетону для звичайних і екстремальних умов завантаження. Результати розрахунків показали, що міцність і стійкість греблі забезпечена у всіх випадках.
2. Гравітаційним методом (методом жорсткого тіла) виконані розрахунки стійкості всіх секцій греблі із укатаного бетону для звичайних та екстремальних умов завантаження. Отримані в результаті розрахунків значення коефіцієнтів безпеки греблі з умов стійкості проти зсуву у всіх випадках більше нормальних значень.

Список використаних джерел:

1. Вайнберг А. И. Надежность и безопасность гидротехнических сооружений. Избранные проблемы. – Харьков: Издательство «Тяжпромавтоматика», 2008. – 304 с.
2. Гидротехнические сооружения. Часть 2. / Л. Н. Рассказов, В. Г. Орехов, Ю. П. Правдивец и др. – М.: Стройиздат, 1996. – с.344.
3. Гидротехнические сооружения. Часть 1. / под. ред. Гришина М. М. – М.: Высш. Школа, 1979. – 615 с.