

У збірнику опубліковані наукові статті з раціонального використання природних ресурсів, гідротехнічних споруд, будівництва, машинознавства, економіки, права. Призначений для наукових працівників, інженерів, аспірантів та студентів вищих навчальних закладів.

#### Редакційна колегія

**Мошинський В.С.**, д.с.-г.н., професор, ректор НУВГП, головний редактор; **Савіна Н.Б.**, д.е.н., професор, в.о. проректора з наукової роботи та міжнародних зв'язків НУВГП, заступник головного редактора; **Мамай Л.М.**, здобувач кафедри екології, провідний фахівець відділу аспірантури і докторантури, відповідальний секретар; **Россінський В.М.**, к.т.н., старший викладач кафедри водопостачання, водовідведення та бурової справи, відповідальний секретар; **Левицька С.О.**, д.е.н., професор, директор навчально-наукового інституту економіки, менеджменту та права; **Герасімов Є.Г.**, начальник науково-дослідної частини, к.т.н., доцент; **Клименко М.О.**, директор навчально-наукового інституту агроекології та землеустрою, д.с.-г.н., професор; **Хлапук М.М.**, директор навчально-наукового інституту водного господарства та природооблаштування, д.т.н., професор; **Гавриш В.С.**, в.о. директора навчально-наукового механіко-енергетичного інституту, к.т.н., доцент; **Макаренко Р.М.**, в.о. директора навчально-наукового інституту будівництва та архітектури, к.т.н., доцент; **Тадесв П.О.**, в.о. директора навчально-наукового інституту автоматики, кібернетики та обчислювальної техніки, д.пед.н., професор; **Марчук М.М.**, в.о. директора навчально-наукового автодорожнього інституту, к.т.н., професор; **Дорошенко О.О.**, голова Ради молодих вчених, к.е.н., доцент кафедри обліку і аудиту; **Грицина О.О.**, заступник голови Ради молодих вчених, к.т.н., доцент кафедри теплогазопостачання, вентиляції та санітарної техніки; **Пінчук О.Л.**, к.т.н., старший викладач кафедри водогосподарського будівництва та експлуатації гідромеліоративних систем; **Лук'янчук О.П.**, к.т.н., доцент, доцент кафедри підйомно-транспортних, будівельних, дорожніх, меліоративних машин і обладнання сільськогосподарського виробництва; **Глінчук В.М.**, к.т.н., старший викладач кафедри автомобілів та автомобільного господарства; **Карпан Т.С.**, аспірант кафедри транспортних технологій і технічного сервісу; **Гарбарук Ю.В.**, аспірант кафедри основ архітектурного проектування, конструювання та графіки; **Шапран С.Ю.**, аспірант кафедри архітектури та середовищного дизайну; **Филипчук Л.В.**, старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій; **Янчук О.Є.**, к.т.н., доцент кафедри геодезії та геоінформатики; **Самолук Н.М.**, к.е.н., доцент кафедри трудових ресурсів і підприємництва; **Вашай Ю.В.**, к.е.н., старший викладач кафедри економічної теорії; **Ботвінко-Ботюк О.М.**, викладач кафедри іноземних мов та українознавства, аспірант Волинського національного університету ім. Лесі Українки кафедри практики англійської мови.

**Збірник «Студентський вісник Національного університету водного господарства та природокористування» зареєстрований у Державній реєстраційній службі України - реєстраційний номер КВ 20359 - 10159 Р від 11.10.2013 р.**

**Матеріали Студентського вісника НУВГП розглянуті і рекомендовані до видання на Вченій раді університету 27 червня 2014 р., протокол № 6.**  
**Адреса редколегії: 33028, м. Рівне, вул. Соборна, 11, НУВГП**

**© Національний університет водного господарства та природокористування, 2014**

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 provodylylya 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 гідроспоруди [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  $\gamma_{fc}$  – коефіцієнт поєднання навантаження;

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

$\gamma_n$  – 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):

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

$S_p, u_p, \omega_p$  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  $\gamma_n, \gamma_{fc}$  – коефіцієнт надійності за умови відповідальності споруди і коефіцієнт поєднання навантаження;

$\gamma_{cd}$  – 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.