

РОЗДІЛ 4

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ ОБРОБКИ ІНФОРМАЦІЇ ДЛЯ ВИРІШЕННЯ ЗАВДАНЬ ОСВІТИ, НАУКИ І УПРАВЛІННЯ ВИРОБНИЦТВОМ

УДК 004.9

Д.В. Іванов¹, В.В. Гнатушенко¹

¹Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Дніпро, Україна

ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ЗАТОПЛЕННЯ ТЕРИТОРІЙ ПРИ ВИНИКНЕННІ НАДЗВИЧАЙНОЇ СИТУАЦІЇ НА ГІДРОЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

Анотація. В роботі проведено імітаційне моделювання затоплення території, запропоновано методику розрахунку глибини затоплення м. Акосомбо залежно від віддалення від ГЕС «ГеП Акосомбо» з використанням методів розрахунку висоти хвилі прориву та половинного ділення площі перерізу русла ріки.

Ключові слова: зона затоплення, хвиля прориву, імітаційне моделювання, розрахунок русла, площа перерізу, розхід води, 3D-модель.

Вступ. Протягом багатьох століть людство, яке робить колосальні зусилля для захисту від повеней, ніяк не може досягти успіху в цьому заході. Збитки від повеней продовжують зростати. Особливо сильно, приблизно в 10 разів, вони зросли за другу половину минулого століття. Площа паводконебезпечних територій становить приблизно 3 млн. кв. км, на яких мешкає понад 1 мільярд осіб. Щорічні збитки від повеней за окремі роки перевищують 200 мільярдів доларів. Гинуть десятки та сотні тисяч людей. Але, на жаль, у більшості існуючих публікацій дається проста констатація про повені, заподіяні ними збитки, або ж розглядаються окремі аспекти цього феномену, такі як прогноз повеней, причини, що викликають повені, інженерні методи захисту від них.

Небезпека виникнення затоплення низинних районів виникає при руйнуванні гребель, дамб та гідровузлів. Безпосередню небезпеку представляє стрімкий і потужний потік води, що викликає ураження, затоплення та руйнування будівель та споруд. Жертви серед населення і різні порушення відбуваються через велику швидкість і величезну кількість води. Висота та швидкість хвилі прориву залежать від розмірів руйнування гідроспоруди та різниці висот у верхньому та нижньому б'єфах. Для рівнинних районів швидкість руху хвилі прориву коливається від 3 до 25 км/год, у гірській місцевості сягає 100 км/ч. Значні ділянки місцевості через 15 – 30 хв. зазвичай виявляються затоплені шаром води товщиною від 0,5 до 10 м і більше.

Для ефективного застосування сил та засобів аварійно-рятувальних формувань необхідна достовірна картина наслідків прориву напірного фронту водосховища. Цю інформацію необхідно отримати у найкоротші терміни та з максимальною точністю. Для отримання цієї інформації необхідно спільне застосування прогнозування параметрів затоплення територій, а також проведення заходів щодо розвідки площ затоплення. При вирішенні цих завдань у комплексі можуть бути зведені до мінімальних значень можливі людські жертви за рахунок більш ефективних, більш адресних та своєчасних дій аварійно-рятувальних формувань.

Постановка задачі. Для досягнення поставленої мети в роботі сформовані і вирішені такі завдання:

- викласти принципи імітаційного моделювання процесу затоплення;
- розробити метод виявлення зон затоплення території;
- спроектувати та розробити програмну частину для імітаційного моделювання зон затоплення у разі виникнення надзвичайних ситуацій на ГЕС «ГеП Акосомбо»;
- розробити тривимірну модель зон затоплення території для прогнозування можливих наслідків.

Основний зміст роботи. Нами були використані наступні методи та інструменти:

- метод моделювання територій, заснований на вирішенні одновимірних та двовимірних систем рівнянь Сен-Венана;
- геометричний підхід, що ґрунтується на аналізі триангуляційної моделі поверхні;
- гідрологічний підхід, що застосовується для аналізу на макрорівні, тобто для територій з площею в десятки та сотні кілометрів у квадраті.

Нижче наведено основні терміни, визначення та формули, що використано при розробці імітаційної моделі затоплення територій.

Розв'язання поставленого завдання вимагає дані про гідровузол і місцевість, що розташовані вище (водосховище) та нижче за течією річки. Для цього місцевість нижче за течією річки розбивається на так звані стулки, тобто перпендикулярні до течії річки перетину з кроком 5 км. У відповідних перерізах визначаються необхідні параметри, найважливішими є віддалення від створу гідровузла, позначки горизонталей місцевості та відстані між ними. Для гідровузла та водосховища найважливішими є дані про обсяг водосховища, ширину та глибину водосховища у греблі та в нижньому б'єфі.

Дані про створ гідровузла були взяті зі ЗМІ. При моделюванні розглядається варіант повного миттєвого руйнування гідровузла, оскільки висота греблі невелика (12 м), а метою моделювання в даній роботі є місто Акосомбо, яке знаходиться на відстані 20 км від гідровузла, і при невеликому проломі не сильно вплине на підйом рівня води в районі Акосомбо. Крім того, для забезпечення максимальної безпеки населення потрібно розглядати найгірші події, щоб уникнути великих втрат. Як інструмент прогнозування та

оцінки масштабів затоплення місцевості застосовується геоінформаційна система.

Гідротехнічні споруди (ГТС) – інженерні споруди, призначені для використання водних ресурсів або боротьби з руйнівною дією води. До основних гідротехнічних споруд, руйнування (прорив) яких призводить до гідродинамічної аварії (ГА), відносять: греблі (дамби, перемички, запруды та ін.), водозабірні та водозбірні споруди (шлюзи).

Греблі – гідротехнічні споруди напірного типу (штучні греблі) чи природні освіти (природні греблі), створюють різницю рівнів води з руслу річки. Отже, гребля (дамба, шлюз, перемичка та ін.) перегороджує річку чи інший водосток для підйому рівня води перед нею з метою створення напору води на її площу та утворення водосховища.

Штучні греблі являють собою гідротехнічні споруди, створені людиною для своїх потреб і включають власне греблі гідроелектростанцій, водозаборів та іригаційні системи, греблі, перемички, гачки тощо. Залежно від висоти греблі ділять на низьконапірні (до 10 м), середньонапірні (від 10 до 50 м) і високонапірні (понад 50 м). Залежно ж від використаних будівельних матеріалів греблі бувають – бетонні, залізобетонні, гравітаційні, контрфорсні, ачочні, кам'яні, ґрунтові (дамби тощо), дерев'яні. Перед греблею вгору водотоком накопичується вода і утворюються штучні і природні водосховища.

Ділянка річки між двома сусідніми греблями на річці або ділянка каналу між двома шлюзами називається б'єфом. Гідравлічний ухил річки – перевищення (в метрах) висоти рівня річки на 1000 м-код довжини. Верхнім б'єфом греблі називається частина річки вище підпірної споруди (греблі, шлюзу), а частина річки нижче такої споруди – нижнім б'єфом. Тіло греблі утворює нульовий стулок. Висота рівня води у верхньому б'єфі греблі – це рівень води у водосховищі.

Причинами руйнування гідротехнічної споруди можуть бути природні явища або стихійні лиха (землетруси, обвали, зсуви, паводки, розмив ґрунтів, урагани тощо) та техногенні фактори (руйнування конструкцій споруди, експлуатаційно-технічні дефекти чи помилки проектування, порушення режиму водозбору та ін.

Початковою фазою гідродинамічної аварії є прорив греблі, який є процес утворення прорану та некерованого потоку води водосховища з верхнього б'єфу через проран у нижній б'єф. У фронті потоку води, що спрямовується в проран, утворюється хвиля прориву.

Проран – вузька протока в тілі (насипу) греблі, косі, мілини, в дельті річки, або спрямлена ділянка річки, що утворилася в результаті розмиву закруту в повінь. Хвиля прориву – хвиля, що утворюється у фронті потоку води, що проходить в проран, що має значну швидкість руху і володіє великою руйнівною силою.

Отже, вражаюча дія хвилі прориву ГА пов'язана з поширенням із великою швидкістю води, що створює загрозу виникнення надзвичайної ситуації (НС). Вражаючий чинник ГА – хвиля прориву гідротехнічної споруди. Основними

параметрами її дії є швидкість, висота і глибина хвилі прориву, температура води, час існування хвилі прориву.

За своєю фізичною сутністю хвиля прориву – рух потоку води, при якому глибина, ширина, ухил поверхні і швидкість течії змінюються в часі (рис. 1).

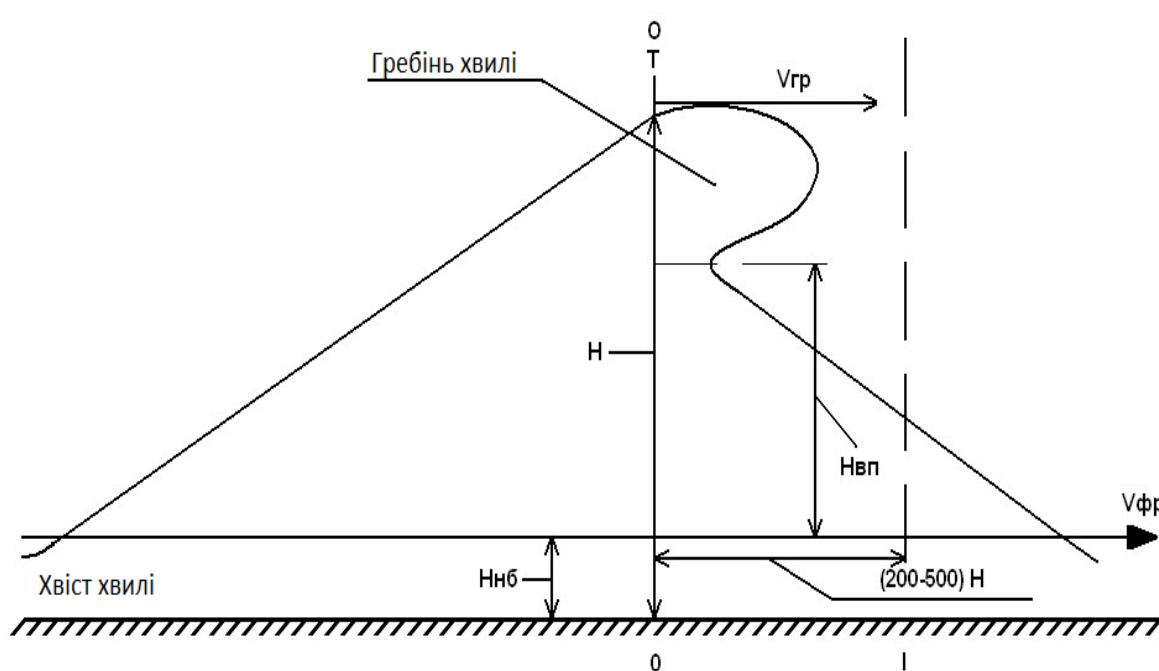


Рис. 1. Хвиля прориву та її сутність

Висота хвилі прориву та швидкість її поширення залежать від об'єму та глибини водосховища, площі дзеркала водного басейну, розмірів прорану, різниці рівнів води у верхньому та нижньому б'єфах, гідрологічних та топографічних умов русла річки та її заплави. У районі нульового створу (тіла греблі) висота хвилі прориву ($H_{вп}$) визначається за формулою (1):

$$H_{вп} = 0,6(H - H_{нб}) \quad (1)$$

де H – глибина водосховища у греблі, м;

$H_{нб}$ – висота нижнього б'єфу, м.

Відповідно, висота гребню хвилі прориву (рис. 2):

$$H_{гр} = 0,4(H - H_{нб}) \quad (2)$$

Висота хвилі прориву, як правило, знаходиться в межах 2-12 м і може досягати 10-30 м. Швидкість поширення хвилі прориву становить 3-25 км/год, а для гірських та передгірських районів – до 100 км/год. Швидкість руху хвилі прориву $V=2,5-5$ м/с приймається для зон катастрофічного затоплення та небезпечного затоплення, а ділянок можливого затоплення - $V=1,5-2,5$ м/с. При цьому статичний тиск потоку води не менше 20 кПа (0,2 кгс/см²) з тривалістю дії не менше 0,25 год.

Характер впливу на об'єкт вражаючого фактору визначається гідродинамічним тиском потоку води, висотою, глибиною та швидкістю потоку води, рівнем і часом затоплення, деформацією річкового русла, забрудненням гідросфери, ґрунтів, ґрунтів, розмиванням та перенесенням ґрунтів. Основним наслідком гідродинамічної аварії є катастрофічне затоплення місцевості.

Катастрофічне затоплення – це лихо через гідродинамічну аварію, що є результатом руйнування греблі і полягає в стрімкому затопленні хвилею прориву нижче розташованої місцевості та виникнення повені. Катастрофічне затоплення характеризується такими параметрами:

- максимально можливими висотою та швидкістю хвилі прориву;
- розрахунковим часом приходу хвилі прориву у відповідний стулок (місцевість);
- максимальною глибиною затоплення ділянки місцевості;
- тривалістю затоплення території;
- межами зони можливого затоплення.

Катастрофічне затоплення поширюється зі швидкістю хвилі прориву і приводить через деякий час після прориву греблі до затоплення великих територій шаром води 0,5-10 м. При цьому утворюються зони затоплення. Зоною затоплення при руйнуванні ГТС є частина прилеглої до річки (озеру, водосховищу) місцевості, що затоплюється водою. Залежно від наслідків впливу потоку води через руйнування ГТС біля можливого затоплення виділяють зону катастрофічного затоплення (ЗКЗ). Частина зони затоплення, в межах якої поширюється хвиля прориву, що викликає масові втрати людей, руйнування будівель та споруд, знищення інших матеріальних цінностей та називається зоною катастрофічного затоплення. На її зовнішніх межах висота гребня хвилі прориву ($H_{вп}$) перевищує 1 м (рис. 1), а швидкість її руху – понад 10 м/с. Час, протягом якого затоплені території можуть бути під водою, коливається від 4 год до кількох діб. Параметри зони затоплення залежать від розмірів водосховища, напору води та інших параметрів конкретного гідровузла, також від гідрологічних і топографічних особливостей місцевості.

Основні фактори катастрофічного затоплення – руйнівна хвиля прориву, водний потік і спокійні води, що затопили територію суші та об'єкта. Вплив хвилі прориву на людей багато в чому аналогічний до дії ударної хвилі ядерного вибуху. Істотними відмінностями цих факторів є набагато менша швидкість і більш висока щільність речовини у хвилі прориву.

Вихідні дані для розрахунків:

- обсяг водосховища – W , м³;
- глибина води перед греблею (глибина прорану) – H , м;
- ширина прорану або ділянки переливу води через гребінь греблі – B_3 м;
- середня швидкість руху хвилі прориву (попуску) – V , м/с;
- відстань від греблі (водойми) до створу – R , км.

При цьому визначаються параметри хвилі прориву (попуску) на задану відстань R від греблі (рис. 2) у разі її руйнування.

Нижче наведено послідовність розрахунків.

Знаходиться час підходу хвилі прориву (попуску) на задану відстань R (до створу):

$$t_{np} = \frac{R}{3600 \cdot V}, \text{ год} \quad (3)$$

Значення $V=2,5-5$ м/с приймаються для зон надзвичайно небезпечного та небезпечного затоплення; для ділянок можливого затоплення - $V = 15-24$ м / с.

Визначається висота хвилі прориву (попуску) h на відстані R до об'єкта:

$$h = mH_{np}, \text{ м} \quad (4)$$

де m – коефіцієнт, що залежить від відстані ГТС до об'єкта.

Час спорожнення водосховища знаходиться за формулою

$$T = \frac{W}{3600 \cdot NB_3}, \text{ год} \quad (5)$$

де N – максимальна витрата води на 1м ширини прорану (дільниці переливу води через гребінь греблі).

Розраховується тривалість (час) проходження хвилі прориву (попуску) t на заданій відстані до об'єкта R

$$t = m_1 T, \text{ год}, \quad (6)$$

де m_1 – коефіцієнт, що залежить від відстані до греблі (водойми).

Вода витікатиме з водосховища до того часу, поки весь обсяг води не витече. Прийmemo об'єм води при нормальному стані русла незмінним, оскільки вода в річці тече постійно і не може повністю витекти. Таким чином, розрахунок будемо проводити лише для обсягу водосховища. Вода з водосховища, спрямована в проран у вигляді хвилі прориву, пройде через площину за розрахований час t (6). Для визначення витрати води (об'єму в одиницю часу [м³/с]) використовуємо формулу:

$$Q = \frac{W}{t} \quad (7)$$

З іншого боку

$$Q = \omega \cdot V \quad (8)$$

де ω – площа поперечного перерізу русла.

Визначаємо площу перерізу русла в даному створі:

$$\omega = \frac{W}{t \cdot V}. \quad (9)$$

Для каналів трапецеїдального перерізу (рис. 2) геометричні елементи визначаються за такими формулами:

- площа поперечного перерізу (площа трапеції)

$$\omega = (b + mh)h, \quad (10)$$

де m - коефіцієнт укосу, рівний відношенню закладення укосу до висоти, $m=a/h$ (рис. 2);

- змочений периметр

$$\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}. \quad (11)$$

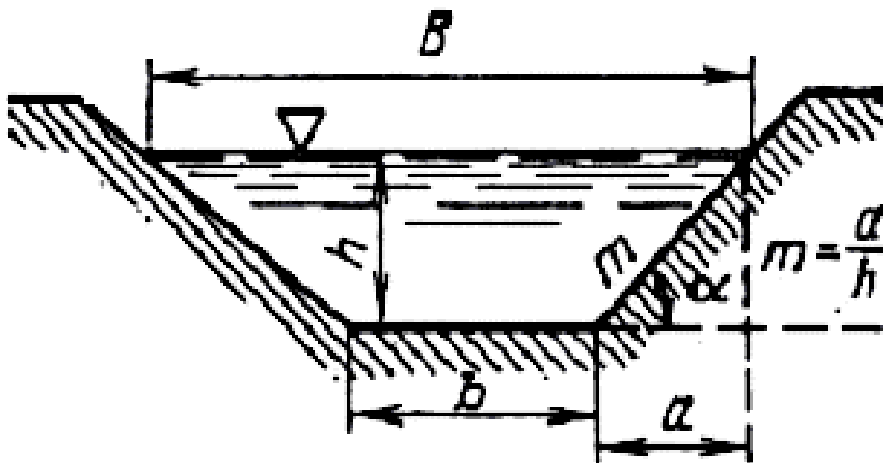


Рис. 2. Параметри трапецеїдального русла

Апроксимуємо перетин русла до трапеції, нижньою основою якої є нормальний рівень води в річці, який визначається за топографічною картою. Як верхня основа – сума відстаней від осі річки до відповідних горизонталей по берегах. Знаючи позначку висоти горизонталі та урізання води за нормальних умов, обчислюємо площу трапеції, що утворюється хвилею прориву і порівнюємо її з аналітично розрахованою. Якщо вона менша за отриману з рівняння витрати, то обчислюємо площу щодо наступної позначки горизонталі. Далі методом половинного поділу (обмеживши кількість ітерацій до 10) знаходимо площу перерізу, що відповідає аналітично розрахованій. З площі перерізу знаходимо рівень підйому води (рис. 3).

Результатом процесу імітаційного моделювання зони затоплення м. Акосомбо при виникненні надзвичайних ситуацій на ГЕС «ГеП Акосомбо» з

використанням методів розрахунку висоти хвилі прориву та половинного ділення площі перерізу русла ріки є побудована 3D-модель (рис. 4).

Наукова новизна полягає в розробці імітаційної моделі процесу затоплення при виникненні надзвичайних ситуацій на ГЕС «ГеП Акосомбо» з урахуванням параметрів хвилі прориву і розрахунку створів (перетинів) у разі прориву гідроелектростанції або підвищення рівня води.

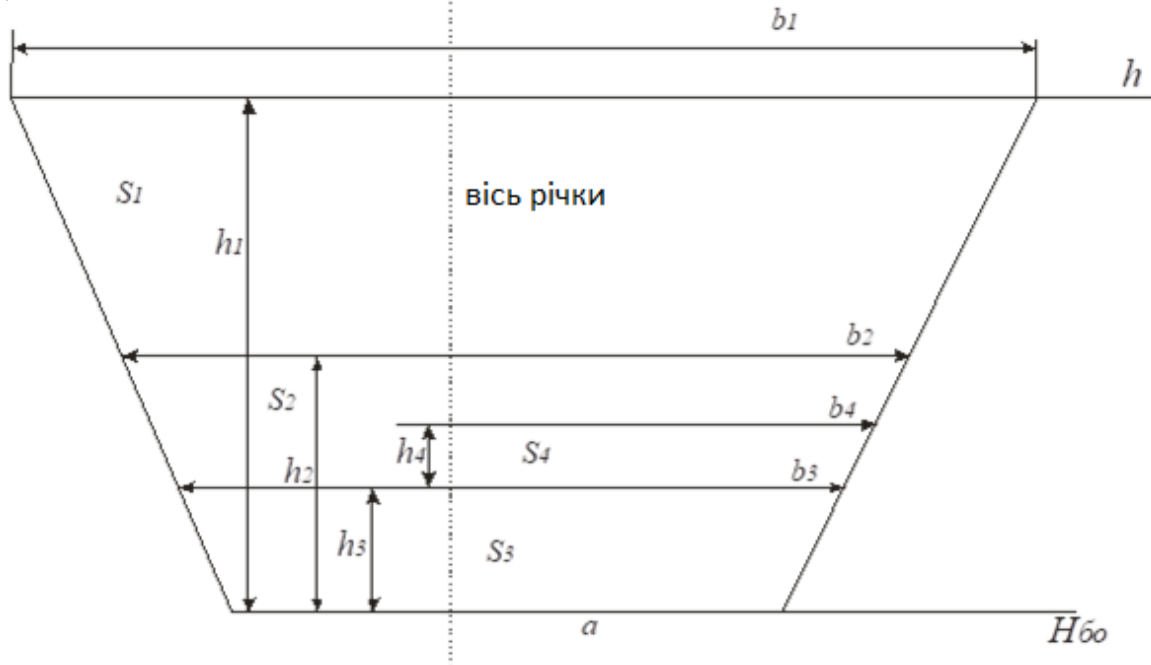


Рис. 3. Знаходження висоти трапецеїдального перерізу методом половинного поділу

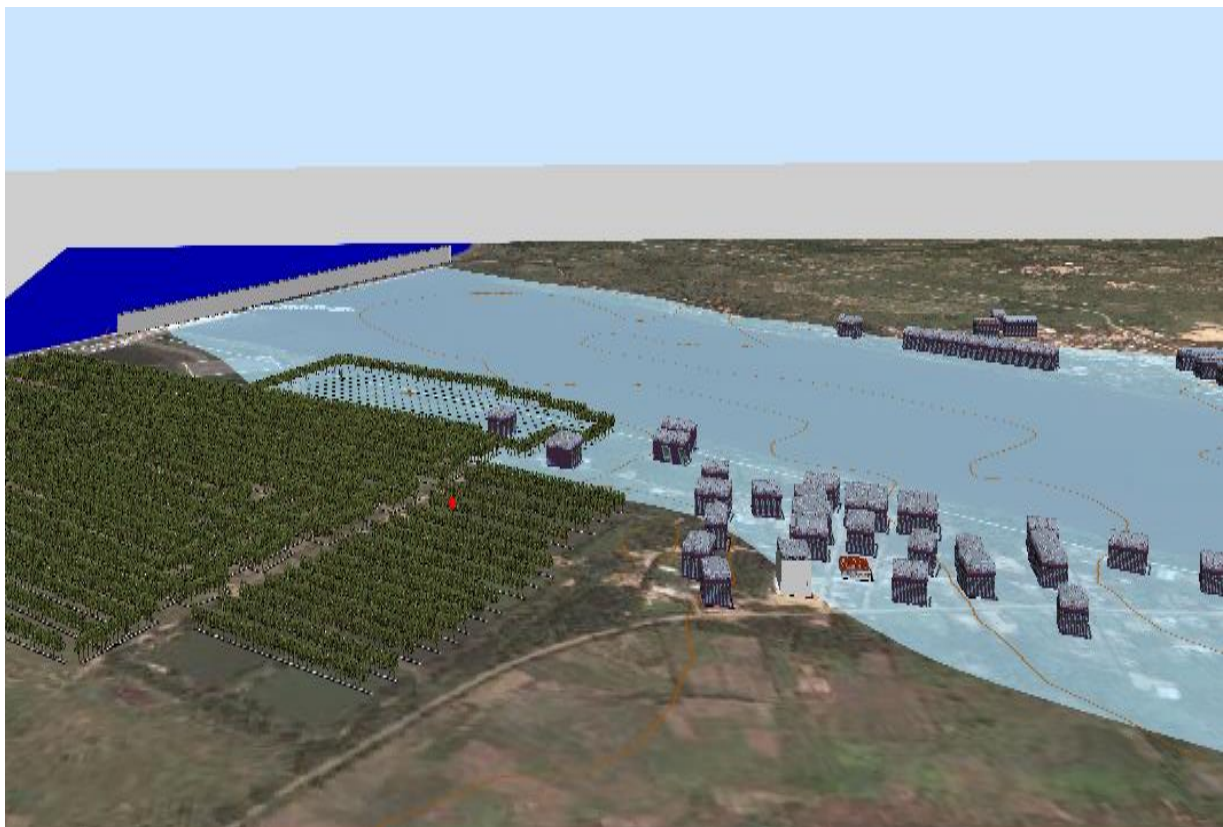


Рис. 4. Відображення тривимірної моделі зони затоплення

Висновки. В результаті проведених досліджень було розроблено комплексний алгоритм розрахунку глибини та ширини затопленої території для ГЕС «ГеП Акосомбо» та м. Акосомбо. Розраховано рівень затоплення території, заснований на гідродинамічних розрахунках хвилі прориву, рівняння витрати, рівнянь розрахунків відкритих русл і каналів, методу половинного поділу перебування глибини затоплення створу. Було розроблено програму розрахунку необхідних параметрів, результати чого використано при візуальному моделюванні зон затоплення. Побудовано 3D-модель місцевості.

Розроблене технічне рішення може бути корисним для моделювання затоплення територій, що знаходяться в безпосередній близькості до небезпечних гідротехнічних об'єктів, таких як дамби, греблі та ін. Прогнозування територій, що затоплюються, має значення при розрахунку і будівництві дренажних і захисних споруд.

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Карпець К. М. Застосування методів ГІС-аналізу для моделювання зони повені та витрат води під час паводка з метою запобігання виникнення надзвичайних ситуацій. Проблеми надзвичайних ситуацій. 2014. Вип. 20. С. 82–86.
2. Ковальчук І., Михнович А. Моделювання паводків у долині верхнього Дністра. Праці Наукового товариства ім. Шевченка. Львів. XXIII: Екологічний збірник. Дослідження біотичного й ландшафтного розмаїття та його збереження. 293–312.
3. Gharbi M., Soualmia A., Dartus D., Masbernat L. & J. Mater. Comparison of 1D and 2D Hydraulic Models for Floods Simulation on the Medjerda River in Tunisia. *Journal of Materials and Environmental Science*. №7 (8), 3017–3026.
4. Khaleghi Somaiyeh, Mahmoodi Mehran & Karimzadeh Sorayya. Integrated application of HEC-RAS and GIS and RS for flood risk assessment in Lighvan Chai River. *International Journal of Engineering Science Invention*. Volume 4 Issue 4, 38–45.
5. Зацерковний В.І., Бурачек В. Г., Железняк О.О., Терещенко А.О. Геоінформаційні системи і бази даних : монографія. – Кн. 2 / В.І. Зацерковний, В.Г. Бурачек, О.О. Железняк, А.О. Терещенко.– Ніжин: НДУ ім. М. Гоголя, 2017. – 237 с.
6. Burshtynska Kh., Babushka A., Tretyak S. & Halochkin M. Monitoring of the riverbed of river Dniester using remote sensing data and GIS technologies. 25th Anniversary Conference Geographic Information Systems Conference and Exhibition “GIS ODYSSEY 2018”. p. 64–73.