

УДК 532.5

**В.А. ВОСКОБІЙНИК, В.В. ХОМИЦЬКИЙ, О.А. ВОСКОБОЙНИК,  
А.В. ВОСКОБІЙНИК, І.А. ХИЖА**

### **ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТЕЧІЇ ПОБЛИЗУ ГНУЧКОЇ СТРУМЕНЕНАПРАВЛЯЮЧОЇ ЗАВІСИ**

***Анотація.** Наведено результати експериментальних досліджень кінематичних характеристик течії поблизу полотнища гнучкої завіси моделі струмененаправляючої споруди, спроектованої для акваторії Ташлицького водосховища-охолоджувача Південно-Української АЕС. Візуальні дослідження та вимірювання полів швидкості показали, що поблизу тупикової частини споруди генеруються великомасштабна циркуляційна структура та дрібно-масштабні коловороти. В області звуження потоку формується інтенсивна струменева течія у широкому діапазоні чисел Фруда.*

***Ключові слова:** струмененаправляюча споруда, полотнище гнучкої завіси, поле швидкості, циркуляційна течія, струменева течія.*

**Вступ.** Відомо [1], що у енергозабезпеченні народногосподарського комплексу України провідну роль відіграють атомні електростанції, на частку яких припадає близько 50% електроенергії, що виробляється електростанціями України. Одна з найважливіших умов надійної експлуатації АЕС – безперебійне водозабезпечення, джерелами якого слугують ріки, водосховища та водойми-охолоджувачі. Серед основних гідрологічних чинників, що визначають умови функціонування екосистем водойм-охолоджувачів атомних електростанцій України, важливе місце посідають водообмін, гідродинаміка водосховища і тепловий (термічний) режим водних мас. Сучасні досягнення в галузі дослідження турбулентної дифузії у водних об'єктах дають змогу оцінювати процеси вертикального перемішування, в тому числі у водоймах-охолоджувачах енергетичних об'єктів. Нехтування цими процесами вже призвело до порушень в експлуатації деяких водойм-охолоджувачів. Так, на водоймі-охолоджувачу Чорнобильської АЕС значна частина об'єму води (нижче 7–9-метрової ізобати) брала слабку участь в охолодженні підігрітих вод, що скидаються станцією. Те саме стосується і Ташлицької водойми [1].

Ташлицьке водосховище-охолоджувач Південно-Української АЕС працює у важких умовах термічного режиму. Його охолоджувальної спроможності недостатньо для ефективної роботи трьох енергоблоків станції. Це призвело до необхідності проведення детальних досліджень можливостей поліпшення термічного режиму водосховища-охолоджувача. Як показано у роботі [2], схема компоновки водозабірних і водовипускних споруд Ташлицького водоймища-охолоджувача відноситься до так званого сумісного типу, коли розділення потоків відбувається за рахунок вертикальної стратифікації температури води. Недоліком такої схеми є залучення теплих вод верхнього шару потоку у нижні його шари. У роботі [3] запропоновано зменшити цей ефект застосуванням струмененаправляючої завіси, яка спроможна розділити теплі води, що скидаються у водоймище, від вод нижнього шару водоймища, які потрапляють у водозабірні споруди.

Будівництво струмененаправляючої завіси має вирішити дві задачі, а саме, по-перше, направити потік теплої води на водозабір бризкальних басейнів, для підвищення їх ефективності та, по-друге, зменшити частину теплих вод верхнього шару у потік, що направлено до водозабору атомної електростанції. Це дозволяє розділити потік не тільки по вертикалі, а й по горизонталі. Як показали розрахунки [4], струмененаправляюча споруда, що досягає дна водосховища, розділяє потоки води на водоскиді та водозабір, поліпшуючи таким чином тепловий режим роботи Ташлицького водосховища-охолоджувача. За таких умов різниця температур на водоскиді і водозабір досягає декілька градусів [4]. Зі зміною температурного режиму верхніх шарів водосховища, котрі прилягають до струмененаправляючої споруди, змінюються у часі гідрологічні, термодинамічні, гідрохімічні та продукційно-деструкційні процеси, що визначають формування якості води та розвиток певних біоперешкод у роботі технологічних систем водозабезпечення. Адже температурний чинник є визначальним у формуванні структури угруповань гідробіонтів і значною мірою впливає на розвиток інвазивного процесу [1]. Під впливом теплових водоскидів у водоймах-охолоджувачах виникають активні гідродинамічні зони направленої руху теплої та холодної води, утворюються циркуляційні течії або коловороти. Наявність такої складної гідродинамічної структури обумовлює багато важливих для водосховищ-охолоджувачів особливостей, а саме, формування і рух водних мас, термічний, газовий та біогенний режими, пересування та осідання мінеральних і органічних суспензій, процеси самоочищення води, які створюють умови існування флори та фауни. Так, у водосховищах-охолоджувачах зареєстровано десятки видів водоростей, безхребетних і риб, не характерних для флори і фауни України [1].

Враховуючи важливість будівництва струмененаправляючої споруди в акваторії Ташлицького водосховища-охолоджувача з точки зору підвищення видобутку електроенергії та поліпшення екологічної безпеки, виникає нагальна потреба у проведенні науково-дослідних робіт з визначення теплофізичних і гідродинамічних характеристик течії поблизу споруди та впливу її на конструктивні елементи споруди і навколишнє середовище [5, 6].

**Мета роботи** – визначення особливостей формування і кінематичних характеристик струменевих і циркуляційних течій поблизу полотнища гнучкої завіси моделі струмененаправляючої споруди, яку спроектовано для акваторії Ташлицького водосховища-охолоджувача Південно-Української АЕС. Роботу виконано методами фізичного моделювання з використанням візуалізації течії та вимірювання поля швидкості термоанемометрами, датчиками швидкісного напору та визначенням швидкості руху мічених частинок і контрастних речовин.

**Експериментальний стенд і методика дослідження.** Експериментальні дослідження проведено у спеціально збудованому гідродинамічному каналі (рис. 1), де було виготовлено модель струмененаправляючої споруди з рельєфом дна, що відповідає місцю розташування споруди у Ташлицькому водосховищі-охолоджувачі. Гідродинамічний канал довжиною 14 м, шириною 1,5 м і глибиною 0,7 м мав відкриту поверхню води. У вхідній частині каналу було виготовлено нішу довжиною 4,2 м, шириною 0,8 м і глибиною 0,7 м, де потік води за допомогою направляючих конструкцій, показаних ліворуч на

рис. 1, направлявся перпендикулярно поздовжній осі каналу. Модель струмененаправляючої споруди було виготовлено у горизонтальній площині масштабом 1:100 і у вертикальній площині – масштабом 1:25 відносно натурі.



Рис. 1 – Модель струмененаправляючої споруди у гідродинамічному каналі

Модель гнучкої завіси довжиною майже 9 м і шириною 0,6 м було виготовлено з армованої поліестерової тканини «Sealtex 650» товщиною  $0.7 \cdot 10^{-3}$  м. Верхня частина полотнища, яку кріпили до пінопластових понтонів, була підгорнута і проклеєна для надання їй більшої міцності. У нижній частині полотнища встановлювалися люверси, через які полотнище завіси кріпилося до рельєфного дна каналу. Понтони за допомогою якірної системи також кріпилися до дна каналу у відповідності до схеми, яку спроектовано для натурної споруди.

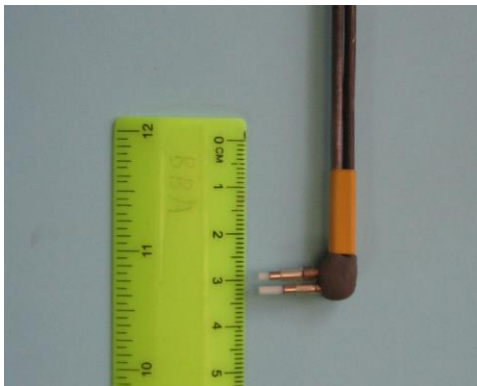
Згідно з розробленою програмою та методикою проведення фізичного моделювання спочатку проводилися візуальні дослідження, визначалися характерні області формування циркуляційної та струменевої течії, а згодом у цих місцях проводилися інструментальні вимірювання з метою визначення кінематичних характеристик потоку.

Під час проведення візуальних досліджень у якості контрастної речовини використовувалися кольорові чорнила і барвники, а також поплавці, пінопластові кульки, деревинна тирса і зважені частинки діаметром близько 1 мм нейтральної або близької до нейтральної плавучості. Кольорові чорнила або

барвники вводилися у потік мініатюрними трубками, які закріплювалися у державках координатних пристроїв. В залежності від швидкості набігаючого потоку витрати барвників регулювалися, а координатні пристрої давали можливість розташувати струмінець барвника у те місце, де необхідно було провести візуалізацію течії.

Реєстрацію картин візуалізації гідродинамічних процесів було проведено за допомогою відео- та фотоапаратури, з подальшою роздруківкою знімків і аналізом отриманих відеоматеріалів. Найбільш інформативні кадри та картини процесів переводилися у «цифру» і заносилися у персональний комп'ютер для обробки та аналізу результатів за допомогою спеціальних програм і методик [7, 8]. Результати візуальних досліджень оброблялися на спеціально створених графічних станціях, де проводилося прискорене та загальмоване відтворення відеозаписів або покадровий аналіз даних. Графічні станції на базі двоядерних або чотириядерних процесорних комп'ютерів, які мали велику пам'ять та швидкодію, дали можливість спостерігати контрастні речовини і мічені частинки у складному вихровому полі. Роздільна здатність на рівні одиниць пікселів дозволила досить точно визначити траєкторії руху мічених частинок і вектори швидкостей їх переносу у вихровому потоці.

Під час вимірювань поля швидкості використовувалися плівкові одно- або двокомпонентні термоанемометри фірми «Disa» (Данія), а також спеціально розроблені та виготовлені п'єзокерамічні й п'єзорезистивні датчики швидкісного напору або динамічного тиску, які було виготовлено у вигляді трубки Піто (діаметр чутливої поверхні змінювався від  $0.8 \cdot 10^{-3}$  м до  $1.2 \cdot 10^{-3}$  м, в залежності від конструкції датчика) (рис. 2а) або трубки Піто подвійного напору, коли отвір однієї трубки розташовувався назустріч потоку, а отвір другої трубки – у протилежному напрямку, і ці трубки з'єднувалися з диференційним п'єзорезистивним датчиком тиску (рис. 2б).



а)



б)

Рис. 2 – П'єзокерамічні (а) та п'єзорезистивні (б) датчики швидкісного напору або динамічного тиску

Електричні сигнали датчиків надходили на комплект термоанемометричної апаратури фірми “Disa”, яка забезпечувала роботу термоанемометрів у режимі сталої температури, а згодом потрапляли на багатоканальні аналогово-цифрові перетворювачі (АЦП) і далі на комп'ютери. Паралельно цьому аналогові сигнали з виходу блоку підсилення та лінеаризатору типів 55M01

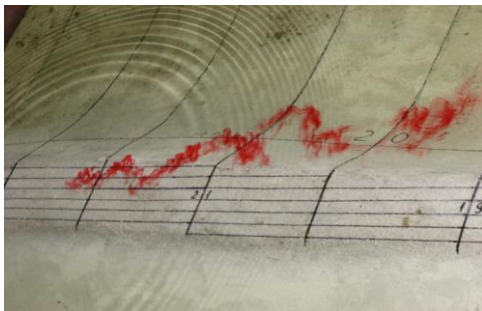
і 55D25 фірми «Disa» реєструвалися на чотириканальні вимірювальні магнітофони типу 7005 фірми «Briel & Kjaer» (Данія). Зокрема, на магнітофон записувалися сигнали віброакселерометрів, які було закріплено на державках датчиків, на полотнищі гнучкої завіси, на стінках гідродинамічного каналу для врахування й компенсації вібраційних завад на результати досліджень.

Згідно з розробленою програмою експериментів, дослідження проводилися за допомогою групи датчиків швидкісного напору, термоанемометрів і вібродатчиків, сигнали з яких оцифровувались восьми- або шістнадцятиканальними АЦП і реєструвалися на комп'ютерах. В дослідженнях використовувалися перетворювачі фірми «L-Card» (12-бітове АЦП «L-154» і 14-бітове АЦП «E-14-440»), які було забезпечено пакетами прикладних програм математичного моделювання для вирішення задач технічних розрахунків, обробки та аналізу експериментальних даних.

Під час досліджень глибина потоку над моделлю водорозподільної дамби ( $H$ ) залишалася сталою й дорівнювала 0,06 м, а швидкість течії над нею ( $U$ ) і витрати у гідродинамічному каналі ( $V$ ) змінювалися від 0,06 м/с до 0,21 м/с і від 0,004 м<sup>3</sup>/с до 0,2 м<sup>3</sup>/с, відповідно. Для цих гідродинамічних параметрів числа Фруда  $Fr = U / \sqrt{gH}$  змінювалися від 0,08 до 0,27, а числа Рейнольдса  $Re_H = UH / \nu$  – від 3600 до 12600.

Перед проведенням досліджень і під час їх проведення проводилися тестування та контроль вимірювального тракту з використанням абсолютних і відносних методів тестування. Визначалися рівні акустичних, гідродинамічних, вібраційних і електромагнітних завад на результати вимірювань, вносилися поправки і компенсації за відповідними методиками. Внаслідок цього розраховувалася похибка отриманих результатів, яка для осереднених значень поля швидкості не перевищувала 3% для вимірювань термоанемометрами, 5% – для вимірювань швидкості переносу мічених частинок та 8% – для вимірювань трубками Піто з довірчою ймовірністю 0,95 або  $2\sigma$ .

**Результати досліджень.** Візуальні дослідження за допомогою кольорових барвників і чорнил, які подавалися у приповерхневий і придонний шар потоку, показали, що переміщення контрастної речовини прискорювалося над поверхнею дамби. При цьому швидкість переносу барвників збільшувалася з віддаленням від тупикової (початкової) частини струмененаправляючої споруди. За дамбою приповерхневий шар потоку прямував до полотнища завіси (рис. 3а), а згодом вздовж полотнища пересувався до виходу зі споруди.



а)



б)

Рис. 3 – Візуалізація течії кольоровими чорнилами (а) та контрастними речовинами позитивної плавучості (б)

Зі збільшенням швидкості течії контрастні речовини, які мали позитивну плавучість, не досягали полотнища завіси, особливо у середній частині споруди, як показано на рис. 3б, через інтенсивний потік вздовж полотнища завіси. На поверхні води плавучі частинки, потрапляючи у декілька дрібномасштабних коловоротів, які змінювали своє місце розташування у тупиковій частині споруди, здійснювали нестійкий циркуляційний рух. Коли потік води досягав завіси, то він прямував до дна каналу, а далі частина його пересувалася вздовж дна назустріч до дамби, утворюючи великомасштабну циркуляційну структуру, а інша частина вздовж полотнища завіси – на вихід з моделі споруди. Вісь цієї циркуляційної течії було спрямовано вздовж полотнища завіси і спостерігалася вона найбільш виразно в області максимальних глибин поблизу завіси.

Поля швидкості, які розраховувалися по швидкості переносу кольорових речовин та вимірювалися термоанемометрами і датчиками швидкісного напору, показано на рис. 4 та рис. 5. Результати отримано для швидкості течії над дамбою 0,09 м/с або для натурної швидкості 0,44 м/с, яка відповідає

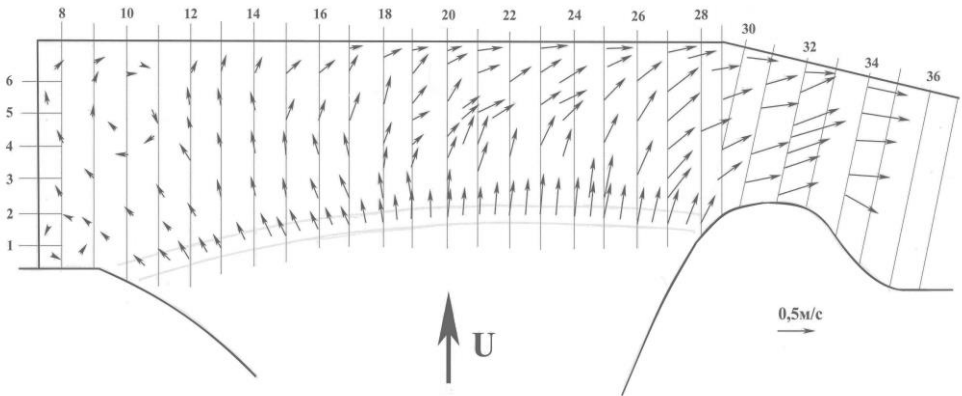


Рис. 4 – Поле швидкості у приповерхневому шарі потоку поблизу струмененаправляючої споруди

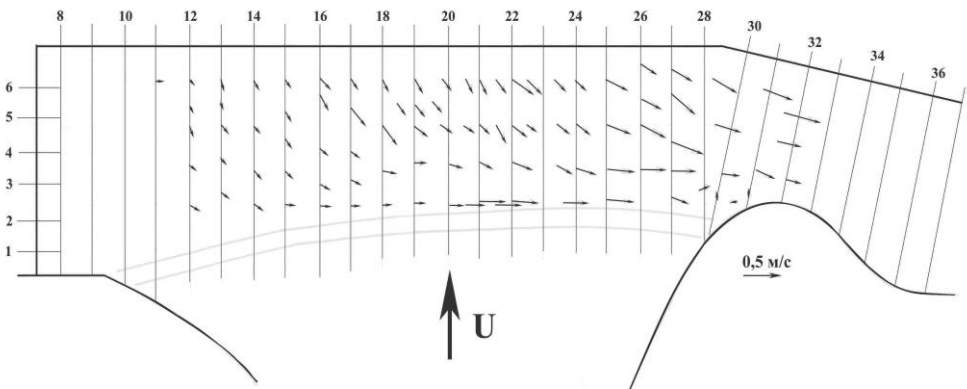


Рис. 5 – Поле швидкості у придонному шарі потоку поблизу струмененаправляючої споруди

максимальній витраті  $147,7 \text{ м}^3/\text{с}$  через водорозподільну дамбу теплого відсіку АЕС. Для цих швидкостей число Фруда, яке розраховано за глибиною потоку для лабораторних або натурних умов, складає  $0,12$ .

На рис. 4 наведено результати вимірювань поля швидкості у приповерхневому шарі потоку на глибині ( $1 \dots 1,2$ ) м для натурних умов. Визначено, що над дамбою швидкість збільшується з наближенням до вихідної частини струмененаправляючої споруди. У тупиковій частині споруди (створи 8–12) швидкість у приповерхневому шарі зменшується, як над дамбою, так і поблизу полотнища завіси. У цій частині споруди спостерігаються області циркуляційної течії та коловороти. В області підйому дна водосховища (створи 19–21) перед полотнищем завіси потік прискорюється і відносно різко змінює свій напрямок, прямує на вихід зі споруди. У місці вигину завіси (створи 30–32) потік з великою швидкістю натікає на завісу, примушуючи її вигинатися й генеруючи великі навантаження на якірну систему. Установлено, що в натурних умовах максимальна швидкість у приповерхневому шарі потоку на глибині близькій до  $1$  м спостерігається в області звуження потоку і досягає значення порядку ( $0,65 \dots 0,75$ ) м/с.

Для придонної області досліджуваної моделі струмененаправляючої споруди поле швидкості на відстані близько  $0,02$  м від дна ( $0,5$  м для природи) представлено на рис. 5. У цій частині потоку поле швидкості значно відрізняється від того, що виміряне у приповерхневому шарі. Поблизу дна, особливо у тупиковій області та області найбільших глибин перед полотнищем завіси, зареєстрована обернена течія, яка має напрямок від завіси до водорозподільної дамби, що також спостерігалось під час візуалізації течії. Біля верхівки дамби зі сторони струмененаправляючої завіси має місце відносно великошвидкісна течія, яка спрямована від тупикової частини споруди до виходу з неї. При цьому швидкість цієї течії зростає з наближенням до виходу зі споруди, але перед берегом, який виступає у водосховище (звуження потоку), зафіксовано низькошвидкісну обернену течію. В області звуження потоку швидкість придонної течії збільшується подібно течії у приповерхневому шарі потоку.

Таким чином, результати вимірювання поля швидкості у приповерхневому шарі потоку та у його придонній області для максимальних витрат у натурних умовах показали, що у потоці поблизу полотнища струмененаправляючої завіси існує інтенсивна поперечна циркуляційна течія, вісь якої направлена вздовж полотнища завіси. Як показали візуальні дослідження, найбільш виразно циркуляційна течія спостерігається в області максимальних глибин поблизу полотнища завіси.

Дослідження, проведені для менших швидкостей потоку, показали, що зі зменшенням швидкості циркуляційна течія вироджується і вектори швидкості повільно змінюють свій напрямок від перпендикулярного до паралельного відносно завіси. Для максимальних швидкостей потоку, для яких проводилися експерименти, характерні області формування циркуляційної та струменевої течії спостерігалися більш виразно. Але відношення мінімальних і максимальних швидкостей, як у приповерхневому, так і у придонному шарах потоку залишалися такими ж, як для результатів наведених на рис. 4 і на рис. 5. А саме, максимальні швидкості оберненої течії у придонній частині потоку

складала (0,05...0,1) U, а максимальні швидкості придонної течії, що спостерігалися в області звуження потоку і вектор яких був спрямований на вихід зі споруд, складала (0,6...0,8) U.

**Висновки.** Результати фізичного моделювання течії поблизу моделі струмененаправляючої споруди, що проектується для акваторії Ташлицького водосховища-охолоджувача Південно-Української АЕС, дали можливість зробити наступні висновки:

1. Установлено, що в залежності від швидкості течії або числа Фруда поблизу полотнища струмененаправляючої гнучкої завіси формувалася великомасштабна циркуляційна течія, дрібномасштабні коловороти та струменевий потік, який з прискоренням прямував від тупикової частини споруди до виходу з нього.

2. Візуальні дослідження показали, що швидкість переносу контрастних речовин зменшувалася над тією частиною водорозподільчої дамби, яка знаходилася поблизу тупикової частини струмененаправляючої споруди. За дамбою барвники у приповерхневому шарі потоку прямували до полотнища гнучкої завіси, а згодом вздовж полотнища переносилися у сторону відкритого водосховища. Поблизу полотнища підфарбована рідина конвектувала від приповерхневого шару потоку до його придонної частини, а далі, протилежно напрямку потоку, вздовж дна каналу повільно пересувалася до дамби, утворюючи циркуляційну великомасштабну структуру, вісь якої спрямована вздовж полотнища завіси. Така циркуляційна течія особливо виразно спостерігалася у тупиковій частині споруди там, де мали місце найглибші області потоку поблизу завіси. Визначено, що зі збільшенням швидкості течії плавучі частинки у серединній частині полотнища завіси наближалися на меншу відстань від нього через інтенсивну течію вздовж завіси.

3. Результати вимірювання полів швидкості показали, що над дамбою швидкість росте з наближенням до вихідної частини струмененаправляючої споруди, і це обумовлено гальмуючою дією тупикової частини споруди на потік. У приповерхневому шарі тупикової частини спостерігалися великомасштабні циркуляційні області, дрібномасштабні коловороти та області загальмованої течії. Вздовж полотнища завіси течія спрямована паралельно полотнищу й прискорювалася з віддаленням від тупикової частини споруди. Над областю підйому дна водосховища перед полотнищем завіси у приповерхневому шарі потоку спостерігалася прискорення течії та відносно різка зміна напрямку її руху до виходу із споруди. В області вигину полотнища гнучкої завіси потік з високою швидкістю натікав на полотнище завіси.

4. Визначено, що в натурних умовах максимальна швидкість у приповерхневому шарі потоку на глибині біля 1 м буде спостерігатися в області звуження потоку і досягне значень (0,65...0,75) м/с або (1,5...1,7)U. Установлено, що на глибині 0,5 м над дном водосховища, особливо у тупиковій області споруди та області найбільших глибин перед полотнищем завіси, буде спостерігатися обернена течія, яка має напрямок від завіси до дамби. Максимальна швидкість оберненої течії складатиме (0,05...0,1) середньовитратної швидкості над дамбою. Біля верхівки дамби зі сторони струмененаправляючої завіси буде спостерігатися відносно великошвидкісна течія, спрямована від тупикової частини споруди в сторону її виходу до водосховища-охолоджувача. Швидкість цієї течії збільшуватиметься з наближенням до виходу споруди, але перед берегом, що виступає у водосховище (звуження



поток), буде спостерігатися обернена течія зі швидкістю порядку 0,05 м/с. В області звуження потоку швидкість придонної течії збільшуватиметься подібно течії у приповерхневому шарі потоку.

5. Рекомендовано, враховуючи отримані кінематичні характеристики течії поблизу полотнища струмененаправляючої гнучкої завіси, провести дорожку проектної документації та віднести зону вигину завіси за область звуження потоку. Таким чином, буде зменшена швидкість течії поблизу завіси у цій області та зменшаться динамічні навантаження, як на саме полотнище гнучкої завіси, так і на якірну систему струмененаправляючої споруди. Перенесення зони вигину полотнища гнучкої завіси у конфузорну частину струмененаправляючої споруди зменшить гідравлічний опір споруди та збільшить швидкість течії на виході з неї. Це призведе до підвищення температури води поблизу струмененаправляючої споруди та викличе екологічні зміни в цій зоні водосховища, ступінь яких треба буде визначити в подальших науково-дослідних роботах.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Романенко В.Д. Гідроекологічна безпека атомної енергетики в Україні / В.Д. Романенко, М.І. Кузьменко, С.О. Афанасьєв, Д.І. Гудков [и др.] // Вісник НАН України. – 2012. – № 6. – С. 41–51.
2. Доманов В.Н. Процессы теплообмена водоемов–охладителей с атмосферой / В.Н. Доманов, А.Г. Костин, Е.И. Никифорович. К.: НПП «Издательство Наукова думка НАН Украины», 2011. – 319 с.
3. Антонова Л.Н. Назначение и особенности условий работы водоемов-охладителей тепловых и атомных электростанций / Л.Н. Антонова, Г.И. Канюк, Т.Е. Погонина, Д.М. Михайский [и др.] // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2012. – Т. 2, № 10(56). – С.56–63.
4. Омельченко М.П. Вопросы рациональных компоновочных решений гидротехнических сооружений на водоемах-охладителях ТЭС и АЭС / М.П. Омельченко, Л.Н. Антонова [и др.]. – Харьков: ХУПС, 2009. – 239 с.
5. Расчеты гидротермических показателей Ташлыкского водоема-охладителя методами трехмерного моделирования для обоснования решений, разрабатываемых в рамках ТЭР по улучшению охлаждающей способности ТВО с учетом расширения Южно-Украинского энергокомплекса. Отчет по договору № 3-Ю/08 от 28.01.2009. – К.: УЦЭВП, 2009. – 202 с.
6. Модельные исследования напряженно-деформированного состояния полотна завесы и динамических нагрузок на якорную систему струмененаправляющего сооружения в акватории Ташлыкского водохранилища-охладителя Южно-Украинской АЭС. Отчет по договору № 2-2014 от 25.06.2014. – К.: ИГМ НАНУ, 2014. – 143 с.
7. Faure T.M. Visualizations of the flow inside an open cavity at medium range Reynolds numbers / T.M. Faure, P. Adrianos, F. Lusseyran, L. Pastur // Exp. Fluids. – 2007. – Vol. 42. – P. 169–184.
8. Воскобойник В.А. Визуализация вихревого течения внутри и вблизи поперечно обтекаемой овальной лунки на плоской поверхности / В.А. Воскобойник, А.А. Воскобойник, А.В. Воскобойник // Промышленная теплотехника. – 2014. – Т. 36, № 3. – С. 13–21.

*Стаття надійшла до редакції 24.02.2015*