ГЕОФІЗИКА

УДК 551.466.66+550.348.432

П. В. АНАХОВ

Національна енергетична компанія "Укренерго", вул. С. Петлюри, 25, Київ, 01032, Україна, тел. +38(050)3857841, ел. пошта: anakhov@i.ua

https://doi.org/10.23939/jgd2019.02.048

ТРИВИМІРНА МОДЕЛЬ ДЕФОРМАЦІЙ КОТЛОВИНИ БАСЕЙНУ МЕРІАНА СТОЯЧИМИ ХВИЛЯМИ

Мета. Аналіз дії стоячих хвиль на ложе водного басейну. **Методика**. При "стоянні" хвилі водні маси здійснюють обертально-поступальні переміщення, за яких у вертикальному розрізі басейну відбуваються синхронні реверсивні рухи води, з найбільшими значеннями у вертикальному, в пучностях, і горизонтальному, у вузлах, напрямках. Мікросейсми сейшового походження створюють поле деформацій у вертикальному розрізі басейну, з максимумами на лініях проекцій пучностей на дні водойми, і також на боковій грані. **Результати**. Виходячи з того, що характерною особливістю коливань є обумовленість їх періоду лінійними розмірами характерної сторони і співіснування вертикальних стоячих хвиль із горизонтальними рухами течій, при розрахунках розглядаються усі три сторони модельного прямокутного басейну постійної глибини. Показано, що за наявності "вертикальних" сейш створюється загроза резонансного збудження сейш внутрішньою збуджувальною силою – іншими сейшами цього ж басейну. За мокрої ліквідації шахт, яка супроводжується заповненням виробленого простору водою, замість пошарово розташованих водоносних горизонтів, розділених водоупорами, утворюється тріщино-колекторний масив, який працює як єдина тріщинувата зона. Власні коливання водних мас здатні сприяти підвищенню сейсмічності створеної депресійної зони. Але, з іншого боку – у гірничих виробках можливе розміщення підземних басейнів ГАЕС. Привабливість використання відпрацьованих гірничих виробок полягає в скороченні або виключенні прохідницьких робіт при зведенні підземних енергетичних об'єктів. **Наукова новизна**. Розроблена модифікована формула Меріана розрахунку періоду сейш у прямокутному басейні постійної глибини, яка враховує наявність двох горизонтальних і однієї вертикальної мод. Показано, що за наявності "вертикальних" сейш створюється загроза резонансного збудження сейш внутрішньою збуджувальною силою – іншими сейшами цього ж басейну. Визначено небезпеку резонансної взаємодії однонаправлених із горизонтальними пар "хвиля горизонтальної моди – течія вертикальної моди" і "хвиля вертикальної моди – течія горизонтальної моди". Виявлено гідрологічну небезпеку, яка обумовлюється можливим резонансом власних коливань, а також їх резонансом із зовнішньою збуджувальною силою. **Практична значущість**. Виявлено водні об'єкти, аналіз яких потребує врахування вертикальної моди власних коливань. Це – ліквідовані гірничі виробки, вертикальний розмір яких порівняний із горизонтальними, або перевищує їх.

Ключові слова: гідроакумулююча електростанція; вертикальна мода сейш; мікросейсми; мокра ліквідація шахти; сейші; сейшова течія; сейшова хвиля; тягун.

Вступ

Одним з найпотужніших джерел створюваних літосферних деформацій є тиск стоячих хвиль, сейш і тягуну (див., наприклад, [Чехов и др., 1994; Нестеров, 1996; Анахов, 2016]). Як правило, розглядаються деформації дна, створювані горизонтальними поздовжньою і поперечною хвилями.

Проте, наявна інформація щодо тиску стоячих хвиль також на вертикальні поверхні водойм (підводний береговий схил). На рис. 1 показано епюри тиску стоячих хвиль на вертикальну стіну з боку відкритої акваторії.

Мета

Метою дослідження є аналіз дії стоячих хвиль на ложе берегового схилу.

Методика

Поле деформацій у вертикальному розрізі басейну створюється мікросейсмами сейшового походження, з максимумами на лініях проекцій пучностей на дні водойми [Анахов, 2016], і, також, на боковій грані (див. рис. 1).

Водні маси здійснюють обертально-поступальні рухи, як це показано на рис. 2.

У вертикальному поздовжньому (L) розрізі прямокутного басейну постійної глибини

 © *Анахов П. В.*

відбуваються синхронні реверсивні переміщення, з максимумами у вертикальному (в пучностях, зі швидкістю $\vec{u}$) і горизонтальному (у вузлах, зі швидкістю $\vec{v}$) напрямках. Періоди мод розраховуються за формулою Меріана: $T_l = 2Ll^{-1}(gD)^{-1/2}$, де l – індекси, які позначають кількість стоячих півхвиль поля, що укладаються уздовж сторони L водойми; g – прискорення вільного падіння (g=9,81 м/с^2).

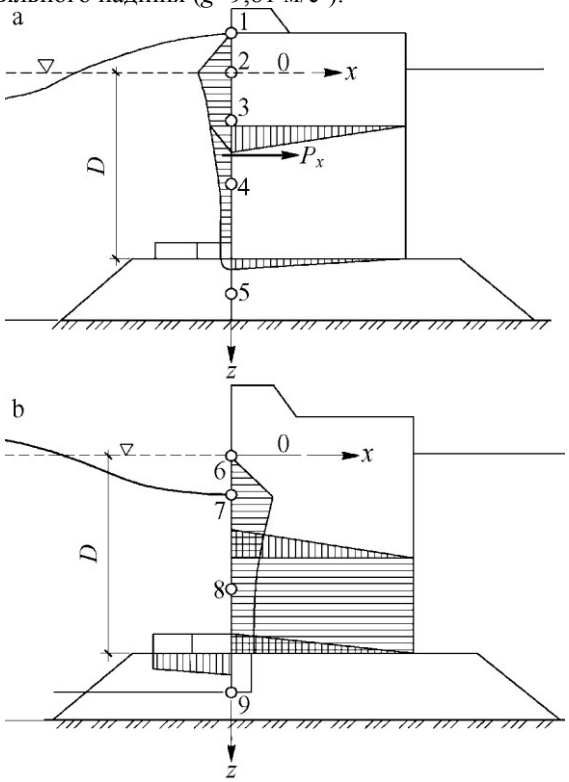

Рис. 1. Епюри тиску стоячих хвиль на вертикальну стіну з боку відкритої акваторії при гребені (а) і підошві (b) хвилі; P_x – горизонтальне лінійне навантаження [ТКП, 2011]

У перпендикулярному до вертикального поперечному (W) розрізі басейну відбуваються такі ж рухи. Періоди мод розраховуються за формулою: $T_w = 2Ww^{-1}(gD)^{-1/2}$.

Виходячи з того, що характерною особливістю коливань стоячих хвиль є, по-перше: обумовленість їх періоду лінійними розмірами характерної сторони, по-друге: співіснування вертикальних стоячих хвиль із горизонтальними рухами течій; виявляється логічним припущення щодо існування пари хвиля/течія з періодом, який визначає глибина води: $T_d = 2Dd^{-1}(gD)^{-1/2}$.

Періоди вільних коливань в обмеженому тривимірному просторі обумовлюються усіма його лінійними розмірами [Кнудсен, 1934].

Враховуючи це, перепишемо формулу Меріана у наступному вигляді:

$$T_{lwd} = 2/\sqrt{gD}\sqrt{(L/l)^2 + (W/w)^2 + (D/d)^2}\ . \qquad (1)$$

Напруження в земній корі, яке створюється статичним навантаженням, складає [Анахов, 2016]

$$\sigma = \rho g\overline{D}\,, \qquad (2)$$

де ρ – густина води ($\rho \approx 10^3$ кг/м^3).

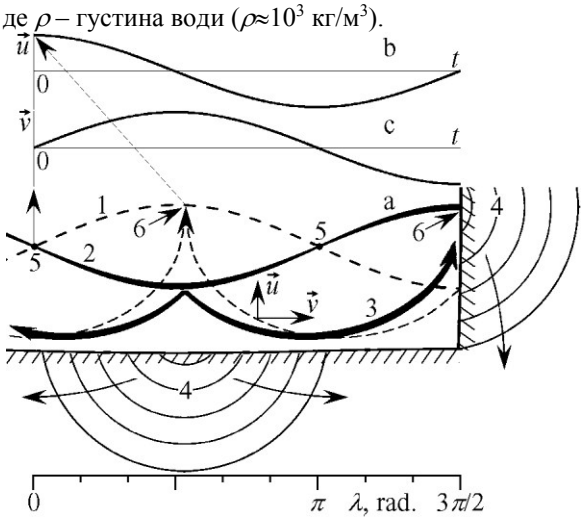

Рис. 2. Коливання стоячої хвилі і поле деформацій ложа водойми:

а – профіль стоячої хвилі у характерні моменти циклу коливань: 1, 2 – амплітуди хвилі в моменти часу t=0+2πk (v=0, u=max), t=π+2πk (v=0, u=min), k=1,2,…,k; 3 – напрямок течії безпосередньо перед досягненням хвилею оптимального значення ($t \to \pi$); 4 – поле деформацій в момент часу $t \to \pi$; 5, 6 – вузли та пучності (з [Анахов, 2018], змінений); b – зміни швидкості нарощування рівня (води) в пучності, починаючи з моменту часу t=0+2πk; c – зміни швидкості течії у вузлі, починаючи з моменту часу t=0+2πk

Літосферні деформації від тиску сейшової хвилі утворюють решітку з ліній пучностей. Максимальний тиск на дно в моменти часу t=0+2πk (див. рис. 2) можна розрахувати за формулою [Анахов, 2016]:

$$\sigma_{an} = \rho g A\,. \qquad (3)$$

Гідростатичний тиск на самий верх підводного берегового схилу дорівнює нулю, а біля її нижнього краю він становить P_{max}=ρgD.

Горизонтальне лінійне навантаження P_x від хвиль, що розбиваються, необхідно приймати рівним площі епюри бокового хвильового тиску, при цьому максимальне значення p для значення ординати D, (див. рис. 1), слід обчислювати за формулою [ТКП, 2011]:

$$p = \frac{2\rho g A}{\mathrm{ch}kD}\,, \qquad (4)$$

де k=2π/λ – хвильове число; λ – довжина хвилі.

Результати

Із закономірностей поверхневих морських хвиль відомо, що варіації тиску повинні з

глибиною затухати за експоненційним законом, і практично не можуть позначатися на глибинах, рівних декільком довжинам хвиль. M. Miche (1944) і M. Longuet-Higgins (1950) теоретично показали, що за дії стоячих хвиль виникає сила, яка не затухає зі зростанням глибини і передається дну за "нескінченної" глибини. Ця теорія була вдосконалена J. Hieblot and J. Rocard (1959), та узагальнена Л. Бреховських (1966) [Табулевич, 1986]. В. Табулевич розглянула дію мікросейсмічних коливань, що виникають одночасно зі стоячими водяними хвилями, які генеруються на акваторіях в тилових частинах атмосферних циклонів. Зокрема, такий "односторонній підхід" став причиною розгляду тиску хвилі лише на горизонтальну поверхню – дно водойми (див. [Roeloffs, 1988; Talwani, et al., 2007; Анахов, 2016]). Цьому є ще одне пояснення – беззаперечна перевага горизонтальних вимірів над вертикальним (табл. 1).

Результати дослідження дії стоячих хвиль, в порівнянні зі статичним тиском від глибини, представлено в табл. 2 (при розрахунках прийнята однакова для всіх водойм амплітуда хвилі A=1 м).

Таблиця 1

Відношення сторін трьох найглибших озер світу

Озеро	Довжина L, км	Ширина W, км	Глибина D, км	$L\times W\times D$, %
Каспійське море	1 030	360	0.208	100×35× ×0,02
Озеро Байкал	636	50	0.750	100×8× ×0,12
Озеро Танганьїка	673	49	0.574	100×7× ×0,09

Таблиця 2

Результати розрахунків деформацій котловин найглибших озер світу

Озеро	Результати спостережень		Результати розрахунків							
	T_{100}, хв.	T_{010}, хв.	T_{100}, хв.	T_{010}, хв.	T_{001}, хв.	σ, МПа	σ_{an}, кПа	p_{100}, кН/м	p_{010}, кН/м	p_{001}, кН/м
Каспійське море	750 [Герман, 1970]	282 [Герман, 1970]	760.06	265.65	0.15	2.040	9.810	47.163	47.163	47.158
Озеро Байкал	277 [Смирнов и др., 2014]	11 [Смирнов и др., 2014]	469.32	36.90	0.55	7.358	9.810	13.080	13.080	13.080
Озеро Танганьїка	270 [Kodomari, 1982]	Немає даних	496.62	36.16	0.42	5.631	9.810	17.091	17.091	17.090

Результати обчислень не показали помітної різниці між вертикальним тиском на дно і горизонтальним тиском на бокову грань. Навряд чи помітною буде взаємодія між хвилями, різниця між періодами яких складає три порядки ($\{L\wedge W\}>>D$; $\wedge$ – кон'юнкція).

Сучасний і перспективний розвиток енергетики передбачає спорудження ємностей нижніх басейнів гідроакумулюючих електростанцій (ГАЕС) на великих глибинах. Причому, очікується, що підземне компонування енергооб'єктів буде в 3–4 рази (в умовних одиницях) краще за наземне компонування [Кокосадзе, 2017].

У світовому досвіді гірничорудної промисловості відомі зверхглибокі шахти: Тау-Тона (близько 5 км), Вітватерсранд (більше 4,5 км), Західна шахта глибокого залягання (3,9 км), Мпопенг (близько 5 км), всі – в ПАР. Найглибші шахти України розташовані в Донецькій області – Шахтарська (м. Шахтарськ, 1,546 км), Прогрес (м. Торез, 1,34 км), імені О. О. Скочинського (м. Донецьк, 1,2 км), імені В. М. Бажанова (м. Макіївка, 1,2 км) [Найбільші, 2019].

У всіх перерахованих підземних спорудах можливе розміщення підземних басейнів ГАЕС. Привабливість використання відпрацьованих гірничих виробок полягає, по-перше, в скороченні або виключенні прохідницьких робіт при зведенні підземних енергетичних об'єктів. Виробки передбачається використовувати незакріпленими, допускаючими вивали породи з покрівлі або стін виробок, що може привести до незначного збільшення рівня води в басейні і не змінить гідравлічний режим роботи станції [Кокосадзе, 2017]. По-друге, виконується т.з. мокра ліквідація шахт, за якої вироблений об'єм заповнюється водою [Удалов, 2006]. По-третє, коливання стоячих хвиль, які створюють мікросейсми, можна використовувати ще і для сейсмічної розвідки надр [Анахов, 2018].

Однак, за мокрої ліквідації шахт замість пошарово розташованих водоносних горизонтів, розділених водоупорами, утворюється тріщино-колекторний масив, який працює як єдина тріщинувата зона [Удалов, 2006; Кокосадзе, 2017]. Власні коливання водних мас здатні сприяти підвищенню сейсмічності створеної депресійної зони [Анахов, 2018]. Відмітимо особливо, що глибина підводного басейну стає порівняною із горизонтальними розмірами ($\{L\wedge W\}\sim D$).

На думку академіка І. Курчатова, в гідрологічному житті всякого водного басейну можна знайти елементи того ж періоду, і вочевидь ці елементи завжди можуть слугувати збуджувальною силою для басейну. Причому особливої важливості набуває збіг частот власних коливань із зовнішніми силами [Курчатов, 1982].

Діапазони частот сейшових хвиль часто близькі або збігаються із місячно-сонячним припливом. Це є приводом очікувати збудження і розгойдування сейш припливною хвилею. В спектрі хвиль Кандалакшської затоки Білого моря (Росія) яскраво виражені коливання рівня з періодом 6 годин 12 хвилин. Академік В. Шулейкін визначив, що це явище викликане резонансом власних коливань води в затоці з першою гармонікою місячного припливу [Шулейкин, 1968].

За результатами аналізу Камчатського (1952 р.), Чилійського (1960 р.), Ніігатського (1964 р.), Монеронського (1971 р.) і Акітського (1983 р.) цунамі в спектрах коливань рівня води Холмської бухти виділений добре виражений пік з періодом близько 80 хвилин, що відповідає одновузловій поздовжній сейші. Він присутній у спокійну погоду, а в штормових ситуаціях його енергія зростає приблизно на порядок [Шевченко, 2006].

У ряді водойм океану спостерігається приплив подвійний висоти – на південному узбережжі Англії в протоці Солент і порту м. Саутгемптон, а також біля о. Портленд, який розташовується на відстані 90 км в західному напрямку від Саутгемптона; в порту Ден-Хелдер (Нідерланди); в затоці Баззардс (США). Умовою виникнення припливу подвійної висоти є додавання до основного тону місячного припливу коливання більш високої частоти – сейшової хвилі [Bowers et al., 2013].

В результаті аналізу матеріалів вимірювань хвильових процесів, отриманих у вересні–листопаді 2008 р. в бухті Алексєєва (о. Попова, Росія), підтверджена можливість багаторазового (в 8–10 разів) посилення висоти хвилі нульової моди (T=630 с). Генерування більш високочастотної першої моди (T=162 с) може бути пов'язане з інтенсивним вітровим хвилюванням. На це вказує значне, приблизно в 30 разів, збільшення рівня спектральної густини при посиленні хвилювання 17–18 листопада в порівнянні зі спокійними погодними умовами [Шевченко и др., 2010].

Вивчення частотно-виборчих властивостей конкретних акваторій дозволяє оцінити можливість посилення хвиль, що приходять і тривалість значних коливань рівня [Ковалев, 2015]. Помічено, що при резонансі з вільними коливаннями басейну виникають хвилі значної висоти. Тривалі спостереження довгоперіодних хвиль на шельфі Каліфорнії показали, що при проходженні сильних атмосферних збурень значення спектру океанських хвиль можуть зрости в 10 разів, а при проходженні цунамі – в 100–1 000 разів [Рабинович, 1993].

Для збудження сильних сейшових коливань необхідне виконання трьох умов: 1) високої добротності акваторії; 2) резонансної близькості параметрів коливань в акваторії із зовнішньою збуджувальною силою; 3) наявності досить сильного довгохвильового збурення у зовнішній області [Рабинович, 1993].

Відносна амплітуда збудженої зовнішніми силами сейшової хвилі розраховується за формулою [Rabinovich, 2009]:

$$A=\left[\left(1-\frac{T_{lwd}}{T_{out}}\right)^2+q^{-2}\left(\frac{T_{lwd}}{T_{out}}\right)^2\right]^{-1/2}, \qquad (5)$$

де q – добротність водойми, яка визначає втрати енергії в коливальній системі і ширину смуги частот резонансу; T_{out} – період збуджувальної зовнішньої хвилі.

Будь-які сейші – це резонансна реакція акваторії на зовнішній вплив, яка проявляється у вигляді коливань на власних ("резонансних") частотах [Рабинович, 1993].

За наявності "вертикальних" сейш створюється загроза резонансного збудження сейш внутрішньою збуджувальною силою – іншими сейшами цього ж басейну. Отже, з'являється можливість взаємодії однонаправлених із горизонтальними пар "хвиля горизонтальної моди – течія вертикальної моди" і "хвиля вертикальної моди – течія горизонтальної моди":

$$A=\left[\left(1-\frac{T_l\vee T_w}{T_d}\right)^2+q^{-2}\left(\frac{T_l\vee T_w}{T_d}\right)^2\right]^{-1/2}, \qquad (6)$$

де $\vee$ – диз'юнкція.

Наукова новизна

Виведена модифікована формула Меріана розрахунку періоду сейш у прямокутному басейні постійної глибини, яка враховує наявність двох горизонтальних і однієї вертикальної мод.

Показано, що за наявності "вертикальних" сейш створюється загроза резонансного збудження сейш внутрішньою збуджувальною силою – іншими сейшами цього ж басейну. З'являється можливість взаємодії однонаправлених із горизонтальними пар "хвиля горизонтальної моди – течія вертикальної моди" і "хвиля вертикальної моди – течія горизонтальної моди". Таким чином, виявляється гідрологічна небезпека, яка обумовлюється можливим резонансом власних коливань, а також їх резонансом із зовнішньою збуджувальною силою.

Практична значущість

Виявлено водні об'єкти, аналіз яких потребує урахування вертикальної моди власних коливань. Це – ліквідовані гірничі виробки, вертикальний розмір яких порівняний із горизонтальними, або перевищує їх. За мокрої ліквідації шахт, яка супроводжується заповненням виробленого простору водою, замість пошарово розташованих водоносних горизонтів, розділених водоупорами, утворюється тріщино-колекторний масив, що працює як єдина тріщинувата зона. Власні коливання водних мас здатні сприяти підвищенню

сейсмічності створеної депресійної зони. Але, з іншого боку – у гірничих виробках можливе розміщення підземних басейнів ГАЕС. Привабливість використання відпрацьованих гірничих виробок полягає в скороченні або виключенні прохідницьких робіт при зведенні підземних енергетичних об'єктів.

Висновки

При "стоянні" хвилі водні маси здійснюють обертально-поступальні переміщення, за яких у вертикальному розрізі басейну відбуваються синхронні реверсивні рухи води, з найбільшими значеннями у вертикальному, в пучностях, і горизонтальному, у вузлах, напрямках.

Виходячи з того, що характерною особливістю коливань є обумовленість їх періоду лінійними розмірами характерної сторони і співіснування вертикальних стоячих хвиль із горизонтальними рухами течій, розроблена модифікована формула Меріана розрахунку періоду сейш у прямокутному басейні постійної глибини. Мікросейсми сейшового походження створюють поле деформацій у вертикальному розрізі басейну, з максимумами на лініях проекцій пучностей на дні водойми, і також на боковій грані.

Сучасний і перспективний розвиток енергетики передбачає спорудження ємностей нижніх басейнів ГАЕС на великих глибинах. Привабливість використання для цього відпрацьованих гірничих виробок полягає в скороченні або виключенні прохідницьких робіт при зведенні підземних енергетичних об'єктів. При цьому виконується мокра ліквідація шахт, за якої вироблений об'єм заповнюється водою. Щоправда, за мокрої ліквідації шахт замість пошарово розташованих водоносних горизонтів, розділених водоупорами, утворюється тріщино-колекторний масив, який працює як єдина тріщинувата зона. Власні коливання водних мас здатні сприяти підвищенню сейсмічності створеної депресійної зони.

Обговорено випадки резонансного збудження стоячих хвиль, для чого необхідне виконання трьох умов: 1) високої добротності акваторії; 2) резонансної близькості параметрів коливань в акваторії із зовнішньою збуджувальною силою; 3) наявності досить сильного довгохвильового збурення у зовнішній області. Показано, що за наявності "вертикальних" сейш створюється загроза резонансного збудження сейш внутрішньою збуджувальною силою – іншими сейшами цього ж басейну. З'являється можливість взаємодії однонаправлених із горизонтальними пар "хвиля горизонтальної моди – течія вертикальної моди" і "хвиля вертикальної моди – течія горизонтальної моди". Таким чином, виявляється гідрологічна небезпека, яка обумовлюється можливим резонансом власних коливань, а також їх резонансом із зовнішньою збуджувальною силою.

Список літератури

Анахов П. В. Збудження землетрусів у літосфері Азово-Чорноморського басейну сейшовим деформуванням дна. *Геодинаміка*, 2016. №1 (20). С. 155–161. https://doi.org/10.23939/jgd2016.01.155.

Анахов П. В. Комплексне використання стоячих хвиль водойм. *Гідроенергетика України*, 2018. №1–2. С. 49–51.

Герман В. Х. Спектральный анализ колебаний уровня Азовского, Черного и Каспийского морей в диапазоне частот от одного цикла за несколько часов до одного цикла за несколько суток. *Труды Государственного океанографического института.* М.: Гидрометеоиздат, 1970. Вып. 103. С. 52–73.

Кнудсен В. О. Поглощение звука. *Успехи физических наук*, 1934. Т. 14. Вып. 3. С. 298–301.

Ковалев Д. П. *Натурные эксперименты и мониторинг инфрагравитационных волн для диагностики опасных морских явлений в прибрежной зоне на примере акваторий Сахалино-Курильского региона:* автореф. дис. … д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29 "физика атмосферы и гидросферы". Южно-Сахалинск, 2015. 43 с.

Кокосадзе А. Э. Литосфера для подземной атомной и гидроэнергетики. *Горный информационно-аналитический бюллетень,* 2017. № 4. С. 200–204.

Курчатов И. В. Сейши в Черном и Азовском морях. *Избранные труды,* Т. 1. М.: Наука, 1982. С. 382–391.

Найбільші шахти в світі. Режим доступу: https://bestfacts.com.ua/najtsikavishe/najbilshi-shahti-v-sviti.html.

Нестеров В. В. *Исследования литосферных деформаций средствами большебазовой лазерной интерферометрии*: автореф. дис. … д-ра ф.-м. наук. Симферополь: Симферопольский государственный университет, 1996. 29 с.

Рабинович А. Б. *Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение*. С.-Пб: Гидрометеоиздат, 1993. 325 с.

Смирнов С. В., Кучер К. М., Гранин Н. Г., Стурова И. В. Сейшевые колебания Байкала. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана,* 2014. Т. 50, №1. С. 105–116. DOI: 10.7868/S0002351513050040.

Табулевич В. Н. *Комплексные исследования микросейсмических колебаний*. Новосибирск: Наука, 1986. 151 с.

ТКП 45-3.04-170-2009 (02250). Технический кодекс установившейся практики. Гидротехнические сооружения. Правила определения нагрузок и воздействий (волновых, ледовых и от судов). Минск: Минстройархитектуры, 2011. 73 с.

Удалов И. В. Активизация миграции газов при закрытии угольных шахт (на примере шахты Пролетарская Луганской области). *Збірник*

наукових праць "Вісник НТУ "ХПІ": Хімія, хімічна технологія та екологія, 2006. №12. С. 156–161.

Чехов В. Н., Нестеров В. В., Иванов Ю. Б, Насонкин В. А. Сверхдлиннопериодные литосферные деформации, возбуждаемые сейшевыми колебаниями. *Доклады РАН*, 1994. Т. 336, №3. С. 391–393.

Шевченко Г. В. *Динамические процессы на шельфе и прогноз морских опасных явлений (на примере о. Сахалин):* автореф. ... дис. д-ра физ.-мат. наук: 25.00.29 "физика атмосферы и гидросферы". Южно-Сахалинск, 2006. 34 с.

Шевченко Г. В., Чернов А. Г., Ковалев П. Д., Горин И. И. Резонансные колебания в заливах и бухтах: натурные эксперименты и численное моделирование. *Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р. Е. Алексеева*, 2010. №1(80). С. 52–62.

Шулейкин В. В. *Физика моря*. Изд. 4-е, перераб. и доп. М.: Наука, 1968. 1083 с.

Bowers D. G., Macdonald R. G., McKee D., Nimmo-Smith W. A. M., Graham G. W. On the formation of tide-produced seiches and double high waters in coastal seas. *Estuarine, Coastal and Shelf Science.* 2013. Vol. 134. P. 108–116. http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2013.09.014.

Hieblot, J., & Rocard, Y. (1959). Contribution à la théorie des microséismes. In *Annales de Géophysique* (Vol. 15, p. 539).

Kodomari S. On the Studies of the Periodic Motions in a Lake (2): Effect of the Lake Basin Shape on the Periodic Motion. *Journal of the Faculty of Science, Hokkaido University, Series 7 (Geophysics).* 1982. Vol. 7, No. 2. P. 185–226.

Longuet-Higgins, M. S. A theory of the origin of microseisms. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1950, *243*(857), 1-35.

Miche, M. Mouvements ondulatoires de la mer en profondeur constante ou décroissante. *Annales de Ponts et Chaussées,* 1944, pp (1) 26-78,(2) 270-292,(3) 369-406.

Rabinovich A. B. Seiches and Harbor Oscillations. *Handbook of Coastal and Ocean Engineering* (ed. by Y. C. Kim). Singapoure: World Scientific Publ., 2009. P. 193–236.

Roeloffs E. A. Fault stability changes induced beneath a reservoir with cyclic variations in water level. *Journal of Geophysical Research*: Solid Earth. 1988. Vol. 93 (B3). P. 2107–2124. doi: 10.1029/JB093iB03p02107.

Talwani P., Chen L., & Gahalaut K. Seismogenic permeability, ks. *Journal of Geophysical Research*: Solid Earth. 2007. Vol. 112, Iss. B7. 18 p. doi: 10.1029/2006JB004665.

P. V. ANAKHOV

SE "National power company "Ukrenergo", 25, Symona Petliury str., Kyiv, Ukraine, 01032, tel. +38(050)3857841, e-mail: anakhov@i.ua

THREE-DIMENTIONAL MODEL OF THE DEFORMATION OF STRUCTURAL MERIAN BASIN BY STANDING WAVES

Purpose of the study. Analysis of the effect of standing waves on the bed of the water basin. **The research methodology**. When "standing" wave, the water masses carry out rotary-translational displacement. In the vertical cross section of the basin there are synchronous reversible water movements. Their greatest values are in the antinodes, in the vertical direction, and in the nodes, in the horizontal direction. Microseisms of seiche origin create a field of deformation in a vertical section of the basin, with maxima on the lines of projections of the antinodes at the bottom of the reservoir, and also on the lateral face. **Results**. Proceeding from the fact, that the characteristic feature of oscillations is the conditionality of their period with the linear dimensions of the characteristic side and the coexistence of vertical standing waves with horizontal flow of currents, in the calculations all three dimentions of the model rectangular basin with constant depth are considered. It is shown that in the presence of a "vertical" seiches, the threat of resonance excitation of the seiches is caused by the internal excitatory force – other seiches of the same basin. In the wet liquidation of mines, which are accompanied by the filling of the produced space with water, instead of layered aquifers, separated by water supply, a crack-collecting array is formed, which acts as the only cracked zone. Normal fluctuations of water masses can contribute to increasing the seismicity of the created depression zone. But, on the other hand – in mines it is possible to accommodate the underground pools of the pumped-storage power stations. The attractiveness of exhausted mines is to reduce or exclude excavation works when erecting underground energy objects. **Scientific novelty**. A modified Merian formula for calculating the seiche period in a rectangular basin of constant depth, which takes into account the presence of two horizontal and one vertical modes. It is shown that in the presence of a "vertical" seiches, the threat of resonance stimulation of the seiches is caused by the internal excitatory force – other seiches of the same water body. The danger of the resonance interaction of the unidirectional horizontal pairs of the "wave of horizontal mode – the current of the vertical mode" and "the wave of the vertical mode – the current of the horizontal mode" is determined. The hydrological danger, which is caused by possible resonance of the proper oscillations, as well as their resonance with the external excitatory force, is revealed. **Practical value**. Water objects have been discovered, the analysis of which requires taking into account the vertical mode of its normal oscillations. These are – minings with a vertical dimension, which are comparable to the horizontal ones.

Key words: hydroelectric pump storage power station, vertical mode of seiches, microseisms, wet liquidation of mine, seiches, seiche current, seiche wave, surf beat.

Надійшла 27.03.2019 р.