

УДК 624.154

К.Ю. Федорова

ДОСЛІДЖЕННЯ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМАЦІЙНОГО СТАНУ  
БЕРЕГОУКРІПНИХ СПОРУД

*В статье рассматриваются вопросы, позволяющие выполнить совместный расчет оградительных сооружений и окружающей грунтовой среды. При этом предложено использовать упруго-пластическую модель, благодаря чему появляется возможность выявить дополнительные резервы несущей способности берегоукрепительных сооружений. Предложено этот метод расчета использовать как при проектировании, так и при реконструкции последних.*

**Ключевые слова:** волна, волновые нагрузки, грунтовая среда, буны, волнозащитные стены, береговой уклон, пластическая зона, эпюра.

*У статті розглядаються питання, що дозволяють виконати сумісний розрахунок огорожувальних споруд та навколишнього грунтового середовища. При цьому запропоновано використати пружно-пластичну модель, завдяки чому з'являється можливість виявити додаткові резерви несучої здатності берегоукріпних споруд. Запропоновано цей метод розрахунку використовувати як при проектуванні, так і при реконструкції останніх.*

**Ключові слова:** хвиля, хвильове навантаження, ґрунтове середовище, буни, хвилезахисні стіни, береговий уклін, пластична зона, епюра.

*The article deals with questions to perform the calculation of the joint protection structures and the surrounding soil environment. At the same time it proposed to use an elastic-plastic model, whereby it is possible to identify additional reserves of the bearing capacity of shore protection structures. It is proposed that the calculation method used in both the design and renovation of the latter.*

**Keywords:** wave, wave loads, soil ground, groins, Spray walls, coastal slope, plastic zone, diagram

Морські береги, береги рік та водосховищ України потребують захисту від розливу та затоплення, що викликає необхідність зведення нових берегоукріпних споруд, реконструкції та підсилення вже збудованих, особливо тих, які схильні до руйнівних дій штормових хвиль. Помилки у проектуванні та розрахунку таких споруд призводять до значних перевитрат та різкому збільшенню трудових витрат, а у протилежному випадку – до передчасної їх руйнації.

© Федорова К.Ю., 2016

Більш точне урахування хвильових навантажень на ці споруди та їх дійсної сумісної роботи з оточуючим ґрунтовим середовищем дозволяє при проектуванні створити надійні та оптимальні конструкції, які здатні впевнено протистояти зовнішнім впливам.

Нами розроблено програмний комплекс, який орієнтований на розв'язання такого класу задач. У даній статті наведено результати дослідження основних типів огорожувальних споруд та зроблено аналіз їх роботи. Розглядаються напружено-деформований стан таких берегоукріпних споруд: плити кріплення берегових укосів, буни, хвилезахисні стіни, підводний хвилелом. Погоджено методику, яка дозволяє виконувати розрахунки систем, що містять як саму конструкцію, так і ґрунтові укоси, які контактують з нею, фільтрові підготовки та водне середовище.

Розрахункова схема покриття укосу наскрізними плитами показана на рис. 1 (а). Розрахунок кріплення укосу виконується у два прийоми. Спочатку визначається товщина плити розрахунком на стійкість від зважуючого тиску води при відкаті хвилі та її власної ваги. Потім виконується розрахунок напруженого стану від нахату хвилі та власної ваги плити. На рис. 1 наведена схема утворення пластичних зон в системі (б) та епюра переміщень  $u_2$  нижньої границі плити (в). При відкаті хвилі пластичні зони у фільтровій підготовці та ґрунтовому масиві зменшуються. При наступних циклах нахат-відкат хвилі відбувається зміна форми областей пластичних зон, зростання переміщень плит та поступове збільшення залишкових деформацій в системі. Оскільки під час шторму дія хвиль на кріплення укосу повторюється багаторазово, то, враховуючи повторюваність штормів, робимо висновок, що плити поступово переміщуються вниз по укосі, при цьому їх осадка збільшується.

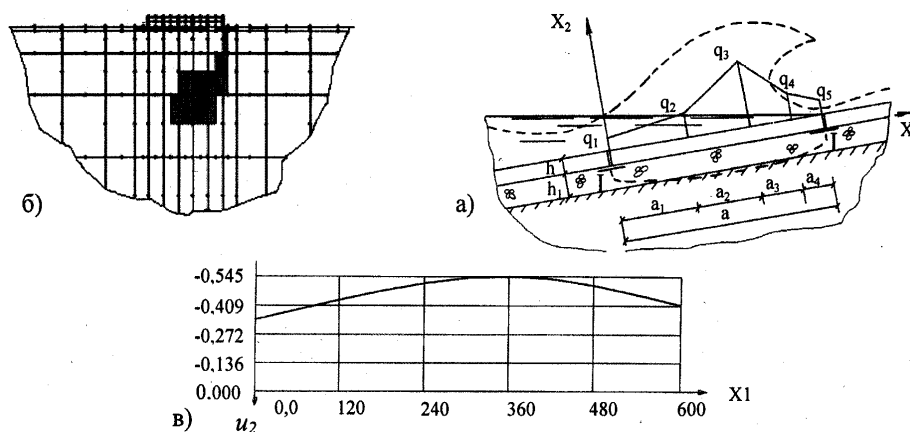
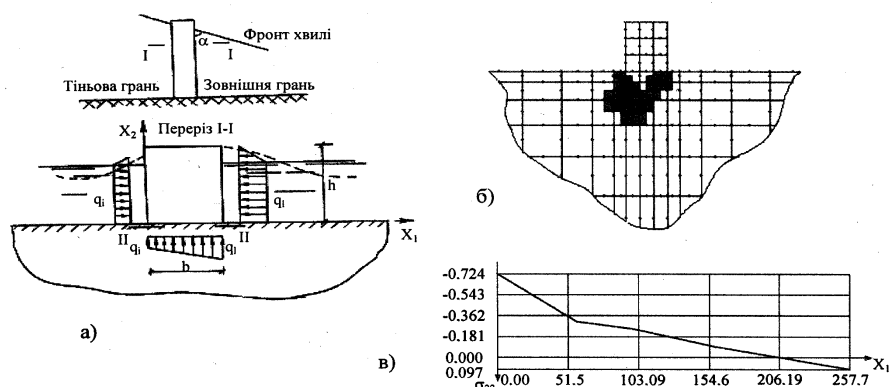


Рис. 1. Розрахункова схема покриття укосу наскрізними плитами

Для випадків, коли максимум хвильового впливу припадає на стик двох плит, або відбулось вимивання ґрунту під одним чи двома краями плити, результати показують, що руйнування укісних споруд починається з дефектів, пов'язаних з деформаціями підґрунтя під плитами. В існуючих методах розрахунку покриттів укосів за другим граничним станом використовуються пружні моделі укосів. Це не дозволяє прогнозувати можливі наслідки, викликані, наприклад, нерівномірними осадками чи залишковими деформаціями, що може привести до руйнування укісної споруди. Запропонована методика дає можливість визначити такі деформації, виявляти та своєчасно попереджувати можливі негативні наслідки таких небезпечних явищ.

Досліджувалась робота збірних залізобетонних та пальових бун. Звичайно хвиля підходить до бокових поздовжніх граней буни під деяким кутом, тому хвильові тиски прикладені як з навітряного, так і з підвітряного боку буни. Результатуюча цих тисків намагається зсунути масив буни. Розрахункова схема системи при дії бокового та зважуючого хвильового тисків наведена на рис. 2 (а).

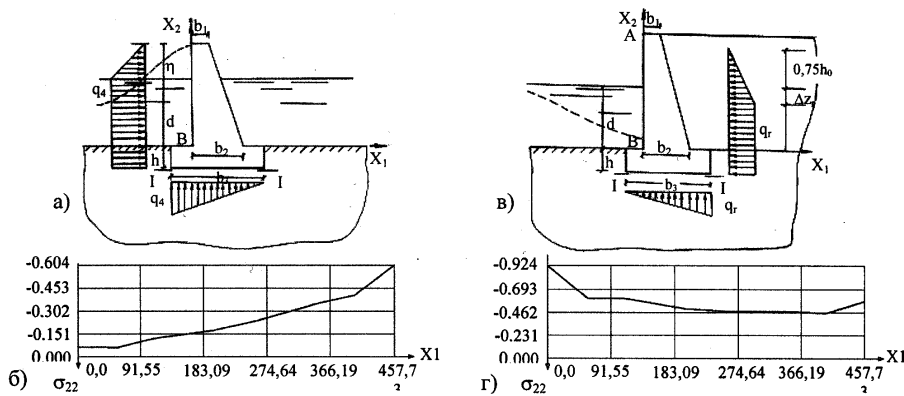


*Рис. 2. Розрахункова схема системи при дії бокового та зважуючого хвильового тисків*

На цьому ж рисунку показана схема утворення пластичних зон (б) та еюра контактних напружень  $\sigma_{22}$  по перерізу II-II (в). Очевидно, що виникаючі залишкові деформації при багаторазовому накаті хвиль можуть привести до значних переміщень буни протягом її експлуатаційного періоду. Пальові буни застосовуються на ґрунтах, що допускають забивання паль. Вони слабо реагують на нерівномірну осадку підґрунтя и не змінюють свого положення в результаті його розмивання. Буни відносяться до активних намулозатримуючих споруд. З плином часу з боку намулів буна може бути повністю замулена.

Досліджувався напружено-деформований стан як замулених, так і вільних систем під дією хвильового навантаження, власної ваги палів та засипки. Виконані розрахунки при циклічному навантаженні (накат – відкат хвилі) показали, що повторне навантаження, а потім розвантаження незначно змінюють початковий напружено-деформований стан системи. Залишкові деформації, що виникають на початку хвильового впливу, малі, швидко затухають і суттєво не впливають на загальний стан системи.

Хвилезахисні стіни звичайно застосовуються сумісно з раніше побудованими бумами та підводними хвилеломами. Були досліджені два основних типа стін: гравітаційні та шпунтові. Розрахунки виконувались для періоду будівництва стінки (коли засипки ґрунту за стінкою немає і на неї діють хвилі, які розбиваються, та зважуючий хвильовий тиск) і під час її експлуатації (коли за стінкою мається засипка і на неї діють боковий та зважуючий тиски при відкоті хвилі). Обидві розрахункові схеми показані на рис. 3 (а, в).



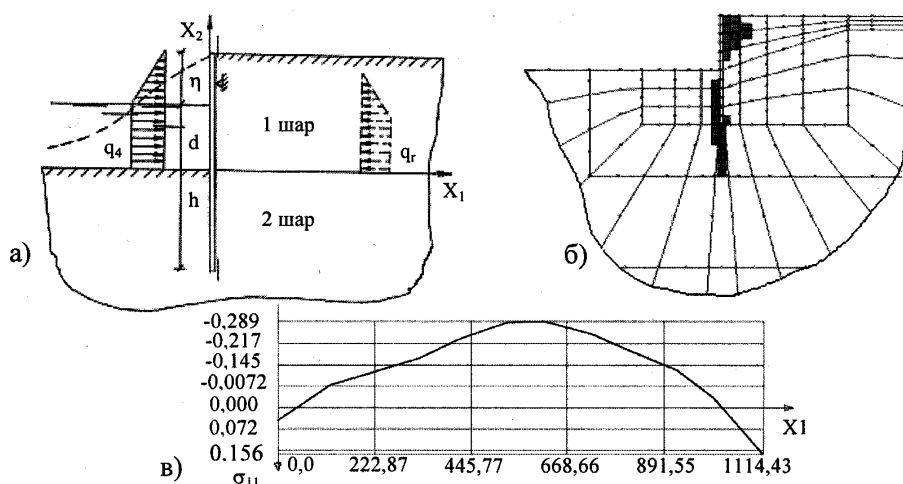
*Рис. 3. Розрахункові схеми систем для будівельного та експлуатаційного випадків*

На цьому ж рисунку наведені епюри контактних напружень  $\sigma_{22}$  по перерізу I-I для обох випадків (б, г). Результати розрахунків показали, що найбільш несприятливим випадком є експлуатаційний. Цікаво зазначити, що у гравітаційних стін у ґрунті під їх нижніми і раями пластичні зони були відсутні або незначні. Це викликано зважуючою дією хвилі. При відсутності водного середовища під такими спорудами в ґрунті утворюються обширні пластичні зони з пружним ядром.

Шпунтові стіни є досить перспективними хвилезахисними спорудами завдяки відносній дешевизні та швидкості побудови. На рис. 4 подані розрахункова схема системи (а), схема утворення пластичних зон (б) та епюра тисків ґрунту  $\sigma_{11}$  на стінку по перерізу I-I від дії її власної ваги та хвильового навантаження (в).

Система працює за умов складного напруженого стану Дія хвиль під час нахату та відкату викликає невелику, проте стабільну осадку шпунта яка під час багаторазового впливу штормових хвиль може досягати істотних величин.

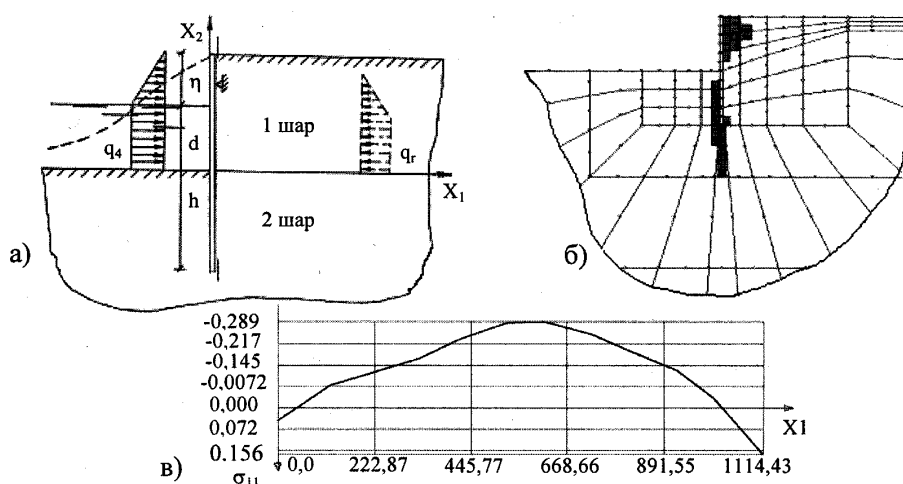
Досліджувались підводні хвилеломи, основна мета яких гасити енергію набігаючої хвилі та сприяти накопиченню намулів між берегом та хвилеломом. Розрахункова схема системи показана на рис. 5 (а). Були розглянуті два види хвильових впливів: коли гребінь хвилі знаходиться над похилою гранню хвилелому та коли над похилою гранню розташована западина хвилі. Діюче хвильове навантаження визначалось за результатами теорії визначення силового впливу набігаючої хвилі кінцевої амплітуди на занурений підводний хвилелом з приблизним вирішенням за допомогою метода граничних елементів. На рис. 5 зображена схема утворення пластичних зон (б) та епюра контактних напружень  $\sigma_{22}$  у ґрунті від першого виду навантаження (в).



*Рис. 4. Розрахункова схема системи*

Розрахунки показали, що після кожного циклу накат-відкат хвилі у підґрунті утворювались залишкові деформації, які поступово затухали. Під час дії другого виду навантаження пластичні зони у підґрунті, як і контактні напруження, зменшилися. Горизонтальні переміщення хвилелому спрямовані у бік моря.

Результати, отримані для конкретного розрахунку при теоретичному визначенні хвильового навантаження, підтверджуються експериментальними даними ЧНДІП. Таким чином, запропонована методика та програмний комплекс дозволяють оцінити напружено-деформований стан в цілому усіх елементів системи «хвилелом-ґрунтове середовище» при дії хвильового навантаження та знайти найбільш економічне та надійне конструктивне рішення для підводного хвилелому.



*Рис. 5. Розрахункова схема системи*

У результаті проведених робіт можна дійти наступних висновків.

У зв'язку з тим, що берегоукріпні споруди у реальних умовах експлуатації працюють у складному напружено-деформованому стані, методика розрахунку таких споруд з врахуванням пружнопластичних властивостей їх матеріалів дозволяє з єдиної позиції реалізувати запропонований у СНП підхід до проектування за двома паралельними станами: за міцністю та деформаціям.

Сумісний розрахунок огорожувальних споруд та оточуючого ґрунтового середовища з використанням пружно-пластичної моделі останньої дозволяє виявити резерви несучої спроможності споруд при їх проектуванні та реконструкції.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Гришин А.В. *Нелинейная динамика оградительных сооружений* / А.В. Гришин, Е.Ю. Федорова. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 239 с.
2. Гришин А.В. *Нелинейные динамические задачи расчета портовых гидротехнических сооружений* / А.В. Гришин, Е.Ю. Федорова. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 125 с.
3. Федорова Е.Ю. *Приближенная гидродинамическая теория прогрессивных волн конечной амплитуды* / Е.Ю. Федорова // *Вісник ОДМУ*. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 1998. – № 1. – С. 57-61.
4. Федорова Е.Ю. *Развитие методов решения задачи о прогрессивных волнах конечной амплитуды* / Е.Ю. Федорова // *Вісник ОДМУ*. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 1998. – № 1. – С. 62-66.

5. Дубровський М.П. Несуча здатність паль з розширом, які сприймають розтягуюче навантаження / М.П. Дубровський, К.Ю. Федорова // Міжвідомчий науково-технічний збірник «Основи і фундаменти». – К.: КНУБА, 1999. – С. 14-19.
6. Гришин А.В. Совместный расчет подпорной стенки и деформируемой среды при сложном статическом нагружении / Гришин А.В., Федорова Е.Ю. // Вісник ОДМУ. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 2001. – № 7. – С. 127-130.
7. Федорова Е.Ю. Давление волн на подводный трубопровод, лежащий на грунтовом основании / Е.Ю. Федорова // Вісник ОДМУ. – Одеса: Вид-во ОДМУ. – 2001. – № 6. – С. 90-96.

*Стаття надійшла до редакції 25.10.2016*

**Рецензенти:**

доктор технічних наук, професор, академік УВ МАНЕБ, завідувач лабораторії Дослідження конструкцій гідротехнічних споруд (ДКГС) ДП «ЧОРНОМОРНДПРОЕКТ» **М.Б. Пойзнер**

кандидат технічних наук, доцент кафедри «Інженерні конструкції та водні дослідження» Одеського національного морського університету **М.В. Адамчук**