

*А.В. Гришин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
А.А. Сипливец, соискатель*

Одесская государственная академия строительства и архитектуры

РАСЧЕТ БЕРЕГОЗАЩИТНОГО СООРУЖЕНИЯ ОТ ВОЛНОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

Рассмотрена связанная система, состоящая из берегозащитного сооружения, основания и водной среды с учетом влияния водной среды на колебания сооружения. Исследованы волновые процессы, возникающие в системе от действия прибойных и разбивающихся волн. Учтены упругопластические свойства материалов.

Ключевые слова: берегозащитное сооружение, основание, водная среда, колебания, упругопластические свойства.

*А.В. Гришин, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой
О.О. Сипливец, здобувач*

Одеська державна академія будівництва та архітектури

РОЗРАХУНОК БЕРЕГОЗАХИСНОГО СПОРУДЖЕННЯ ВІД ХВИЛЬОВОГО ВПЛИВУ

Розглянуто зв'язану систему, що складається з берегозахисного спорудження, основи і водного середовища з урахуванням впливу водного середовища на коливання споруди. Досліджено хвильові процеси, що виникають у системі від дії прибойних хвиль та хвиль, що розбиваються. Ураховано пружно-пластичні властивості матеріалів.

Ключові слова: берегозахисна споруда, основа, водне середовище, коливання, пружно-пластичні властивості.

A.V. Grishin Ph.D., Professor, Head of Department

A.A. Siplivets competitor of scientific degree

Odessa State Academy of civil engineering and architecture

CALCULATION OF COAST-PROTECTING STRUCTURE FROM WAVE INFLUENCE

The connected system consisting of a coast-protecting structure, the basis and the water environment is considered. Influence of the water environment on fluctuations of a structure is taken into account. The wave processes arising in a construction and the basis from action beating and breaking of waves are investigated. Are taken into account elasto-plastic properties of materials.

Keywords: coast-protecting structure, basis, water environment, fluctuations, elasto-plastic properties.

Постановка проблемы в общем виде и ее связь с важными практическими задачами. При расчете берегозащитных сооружений в нормативном документе [1] рекомендуется динамические волновые воздействия заменять статической нагрузкой, что в какой-то мере оправдано для стоячих волн. Но в случае разбивающихся и прибойных волн, под действием которых обычно находятся рассматриваемые сооружения, необходимо пользоваться динамическими методами расчета.

Берегозащитное сооружение совместно с грунтовым массивом образует связанную систему, которая представляет собой инерционную упругопластическую модель, учитывающую возникающие в ней волновые процессы. Используется теория пластического течения с упрочнением, базирующаяся на принципе максимума Мизеса [2]. Для гибкого или жесткого сооружения в качестве функции нагружения применяется условие Гениева [3], а для грунта – условие Кулона-Мора [4].

Обзор последних источников исследований и публикаций, в которых начато решение этой проблемы. Методика решения упругопластических задач при динамическом нагружении в указанной выше постановке изложена в работе [5], поэтому здесь приведем только основные уравнения.

Уравнение движения системы в момент времени t находится из соотношения принципа виртуальной работы, которое имеет следующий вид:

$$\int_{\Omega} [\delta \varepsilon]^T \sigma d\Omega + \int_{\Omega} [\delta u]^T (\rho \ddot{u} + c \dot{u} - Q) d\Omega - \int_{S_q} [\delta u]^T q ds = 0. \quad (1)$$

Полагается, что деформации системы происходят при малых удлинениях, сдвигах и углах поворота. Поэтому зависимость между приращениями перемещений и деформаций определяется линейными соотношениями Коши

$$d\varepsilon_{ks} = \frac{1}{2} (du_{k,s} + du_{s,k}). \quad (2)$$

В этом случае также имеет место постулат суммирования приращений упругой и пластической деформации

$$d\varepsilon_{ks} = d\varepsilon_{ks}^{(e)} + d\varepsilon_{ks}^{(p)}. \quad (3)$$

Компоненты тензора приращений упругой деформации связаны с компонентами тензора приращений напряжений законом Гука

$$d\varepsilon_{ks}^{(e)} = C_{ksmn}^{(e)} d\sigma_{mn}. \quad (4)$$

Приращения пластических деформаций определяются как

$$d\varepsilon_{ks}^{(p)} = d\lambda f_{,\sigma_{ks}}, \quad d\lambda = const > 0. \quad (5)$$

Условие Гениева в инвариантной форме имеет вид

$$f = 3(\sigma_c - \sigma_p)\sigma_o + 3\sigma_i^2 - \sigma_p\sigma_c = 0. \quad (6)$$

Условие Кулона-Мора записывается в виде

$$f = (\sigma_o - \frac{\sigma_i}{\sqrt{3}} \sin \psi) \sin \varphi + \sigma_i \cos \psi - c \cos \varphi = 0. \quad (7)$$

где σ_o, σ_i, ψ – инварианты тензора напряжений; σ_p, σ_c – пределы пластичности при растяжении и сжатии; φ, c – угол внутреннего трения и сцепление.

Производные от функции нагружения приведены в [5]. Преобразовывая уравнения (3)÷(7), находим уравнения состояния

$$\begin{aligned} d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(e)} d\varepsilon_{mn}, \quad \text{при } f = 0, \quad d'f \leq 0 \quad \text{или } f < 0; \\ d\sigma_{ks} &= D_{ksmn}^{(ep)} d\varepsilon_{mn}, \quad \text{при } f = 0, \quad d'f > 0. \end{aligned} \quad (8)$$

Выделение не решенных ранее задач общей проблемы. Приведенные выше исходные уравнения имеют сложный вид и могут быть решены только численными методами. В данной работе используются прямые шаговые процедуры. Для их реализации необходимо выполнить два основных этапа: дискретизацию исходных уравнений как по времени, так и по области, занимаемой системой; построение итерационного процесса для определения решения с наперед заданной точностью.

Для первой дискретизации заданный отрезок времени $[0, T]$, на котором определяется решение, разбивается на N временных интервалов длиной Δt , и в каждые дискретные моменты времени t_n рассматриваются исходные уравнения. Для второй дискретизации область системы разбивается ЭВМ по специальной программе на конечные, а по бесконечной границе грунтового массива на бесконечные изопараметрические элементы. Если массив ограничить конечной областью, то отраженные от её границы волны могут исказить результаты решения. После дискретизации в момент времени t_n получается следующее матричное уравнение

$$M\ddot{\delta}_n + C\dot{\delta}_n + K(\delta)\delta_n = Q_n, \quad (9)$$

где M – матрица распределенных масс системы; C – матрица демпфирования; $K(\delta)$ – нелинейная матрица жесткости; Q_n – вектор узловых нагрузок; $\delta_n, \dot{\delta}_n, \ddot{\delta}_n$ – соответственно узловые перемещения, скорости и ускорения.

Для определения решения строится итерационный процесс, который реализуется по неявному модифицированному методу Ньюмарка. Он является безусловно устойчивым, что позволяет увеличивать длину временного шага Δt . Модификация метода вызвана нелинейностью упругопластических задач и подробно описана в работе [5].

Поэтому **целью статьи** является создание методики, позволяющей производить расчет берегозащитных сооружений от совместного действия статических и динамических нагрузок с учетом возникновения пластических зон как в конструкции, так и в грунтовом массиве.

Основной материал и результаты. На основании предложенной методики в системе Delphi был разработан программный комплекс, который позволяет численно реализовывать различные динамические задачи. Обычно до приложения к системе динамической нагрузки на неё действует статическая нагрузка, от которой в некоторых областях образуются пластические зоны. Поэтому не представляется возможным, как это делается при упругом расчете, раздельно производить статический и динамический расчеты и суммировать результаты, так как принцип суперпозиции здесь неприменим. Необходимо выполнить совместный расчет системы от действия как статических, так и динамических нагрузок. Программный комплекс позволяет производить такой расчет.

Рассмотрим решение задачи, расчетная схема которой показана на рис. 1. Берегоукрепительная стенка уголкового типа находится под действием разбивающихся волн.

В расчете использовались следующие геометрические размеры конструкции: $h_1=9,5$ м; $h_2=0,5$ м; $l_1=1,0$ м; $l_2=4,0$ м. Волновая нагрузка: $q_1=0,075$ МПа; $q_2=0,017$ МПа. Характеристики бетона стенки: $E_c=300000$ МПа; $\mu=0,2$; $\sigma_p=1,8$ МПа; $\sigma_c=18$ МПа. Свойства грунта: $E_0=40$ МПа; $\mu=0,3$; $c=0,01$ МПа; $\varphi=26^\circ$. Длина временного шага $\Delta t=0,001$ с, время действия нагрузки – 0,1 с. Решение определяется на отрезке времени $T=3$ с.

Вначале выполняется статический расчет от действия собственного веса стенки и засыпки. От этой нагрузки точка A , показанная на рис. 1, получает перемещения $u_1=-1,242$ см, $u_2=-4,456$ см. В грунтовом массиве образуются пластические зоны. Затем с учетом напряженно-деформированного состояния, определенного от действия собственного веса, был выполнен динамический расчет от действия волновой нагрузки. На рис. 2 показаны пластические зоны, которые образовались в грунтовом массиве от

обеих нагрузок в момент времени $t=0,48$ с. На экране дисплея в процессе колебания системы можно наблюдать образование новых пластических зон и закрытие возникших ранее, причем в упругую стадию переходят пластические области, которые образовались после статического расчета. Следовательно, система находится в условиях сложного нагружения, поэтому к таким задачам применять деформационные теории пластичности нельзя.

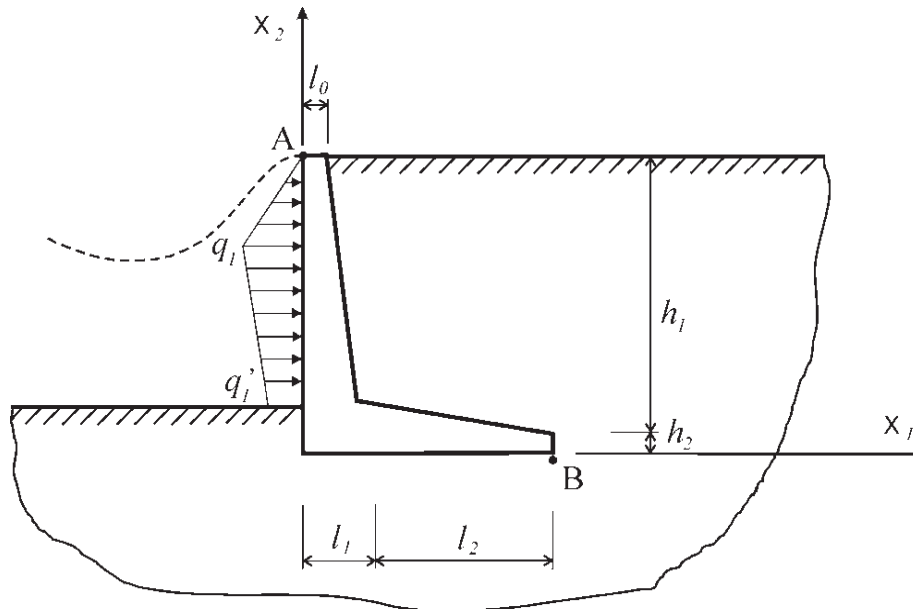


Рисунок 1 – Расчетная схема системы

На рис. 3 приведена эпюра изменения во времени напряжений σ_{22} в точке B, показанной на рис. 1. В этой точке от действия статической нагрузки возникает напряжение равно $-0,072$ МПа. На отрезке времени $T=[0,3]$ с происходит нагружение, которое длится $0,1$ с и свободные колебания, занимающие остальное время. Во время нагружения сжимающие напряжения σ_{22} изменяются до $-0,078$ МПа. Затем на этапе свободных колебаний возникают нестабильные колебания напряжений в течение $0,45$ с, которые далее стабилизируются и затухают.

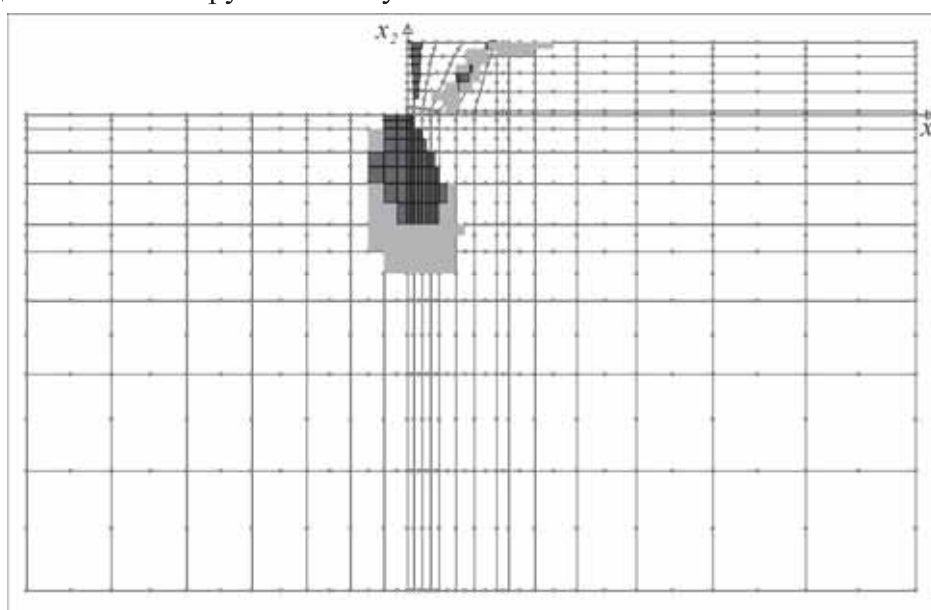


Рисунок 2 – Образование пластических зон в системе в момент времени $t=0,48$ сек.

На рис. 4 и рис. 5 приведены эпюры горизонтальных и вертикальных колебаний точки *A*. После действия статической нагрузки горизонтальные перемещения происходят резким скачком в направлении действия волновой нагрузки и при $t=0,16$ с достигают величины 0,979 см. Затем наблюдается перемещение этой точки в противоположном направлении и далее она колеблется около положения, равного – 1,5 см. Следует отметить, что такие колебания совершаются не около положения статического равновесия, равного – 1,242 см, а произошло смещение этого положения, вызванное образованием пластических деформаций. Такая же картина наблюдается и для вертикальных колебаний. В начальный период свободных колебаний точка *A* перемещается вверх до $u_2=-4,1$ см, затем происходят её колебания около положения, равного $u_2=-4,54$ см, которое не равно статическому $u_2=-4,456$ см.

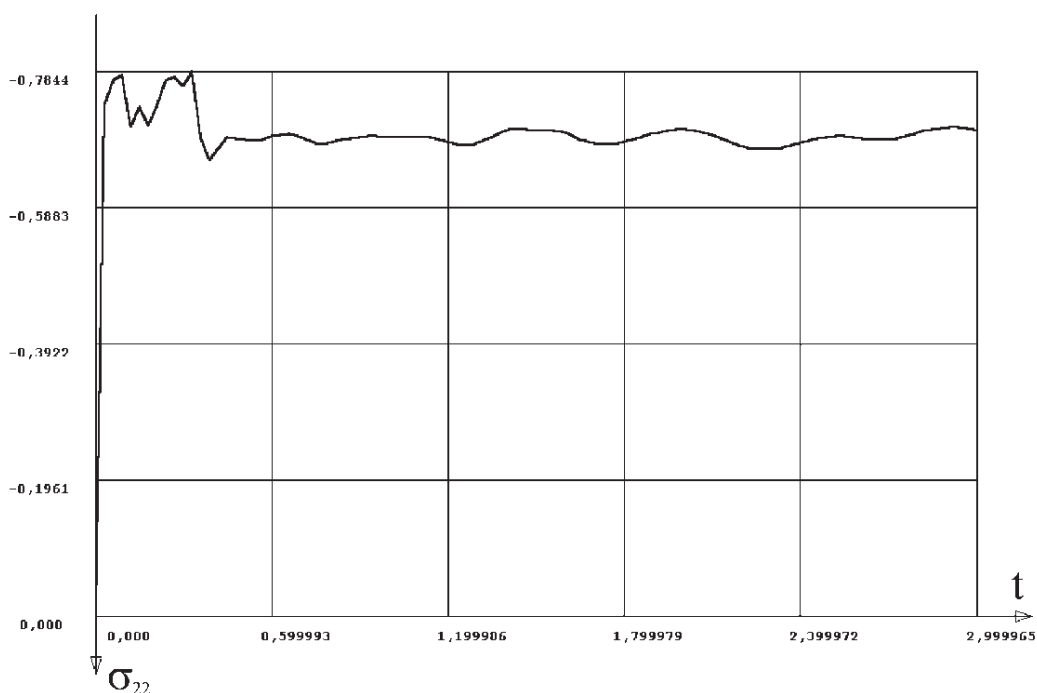


Рисунок 3 – Эпюра напряжений σ_{22} в точке *B* (в 10 МПа)

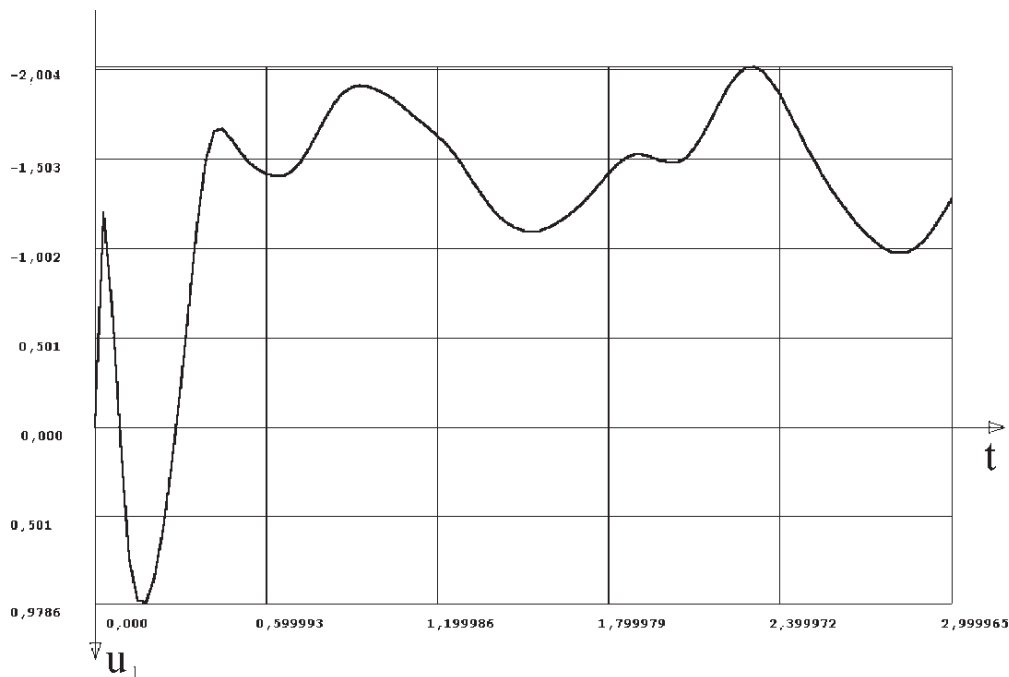


Рисунок 4 – Эпюра горизонтальных колебаний точки А (в см)

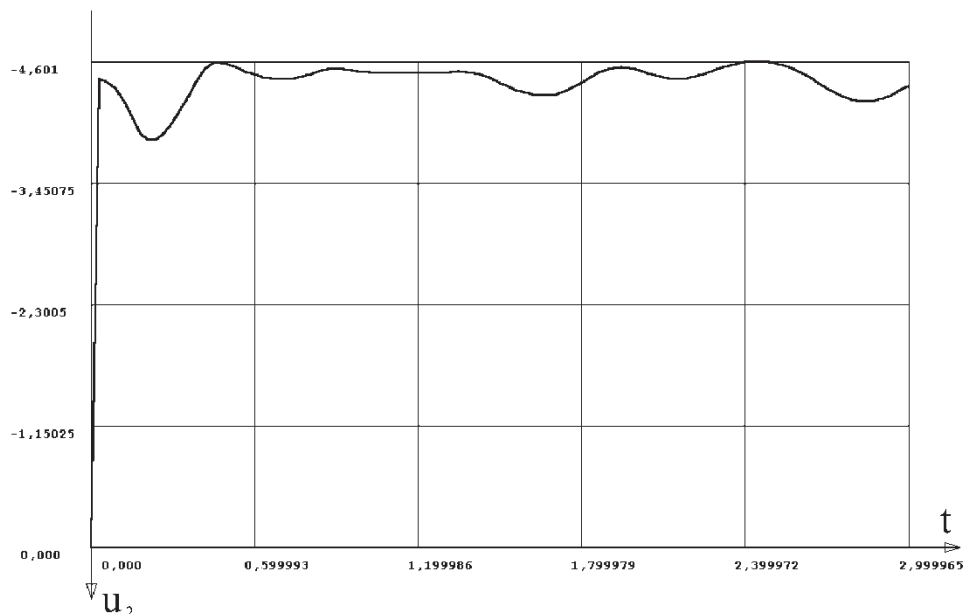


Рисунок 5 – Эпюра вертикальных колебаний точки А (в см)

Выводы. В заключение следует отметить, что предлагаемая методика и программный комплекс позволяют производить расчет берегозащитных сооружений от совместного действия статических и динамических нагрузок с учетом возникновения пластических зон как в конструкции, так и в грунтовом массиве. При решении динамических задач необходимо учитывать деформации и напряжения, полученные от статических нагрузок, так как они влияют на колебательный процесс, возникающий при динамическом нагружении системы. Кроме того, стенка и грунтовая среда взаимосвязаны между собой. Изменение во времени свойств одного элемента системы влияет на напряженно-деформированное состояние другого. Поэтому только их совместный расчет позволит получить правильные результаты.

Литература

1. СНиП 2.06.04-82*. *Нагрузки и воздействия на гидротехнические сооружения (волновые, ледовые и от судов)*. – М.: ЦИТП Госстроя СССР 1986. – 40 с.
2. *Ивлев, Д.Д. Теория упрочняющегося пластического тела / Д.Д. Ивлев, Г.И. Быковец*. – М.: Наука, 1971. – 231 с.
3. *Гениев, Г.А. Теория пластичности бетона и железобетона / Г.А. Гениев, В.Н. Киссюк, Г.А. Тюпин*. – М.: Стройиздат, 1974. – 316 с.
4. *Фадеев, А.Б. Метод конечных элементов в геомеханике / А.Б. Фадеев*. – М.: Недра, 1987. – 221 с.
5. *Гришин, А.В. Нелинейные динамические задачи расчета портовых гидротехнических сооружений / А.В. Гришин, Е.Ю. Федорова*. – Одесса, 2002. – 126 с.

*Надійшла до редакції 11.10.2012
А.В. Гришин, А.А. Сипливец*