

# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЗАДАЧИ РАСЧЕТА МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ШПУНТОВЫХ СТЕНОК ОТ ДЕЙСТВИЯ СТАТИЧЕСКИХ И ДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Гришин А.В.

Металлическая заанкерованная шпунтовая стенка совместно с грунтовой средой образуют единую связанную систему (рис. 1). На систему действуют как статические нагрузки (собственный вес стенки и грунтовой засыпки, складированные грузы), так и динамические (подходящие или ошвартованные суда, волны, лед, работающие механизмы). Обычно динамические нагрузки воздействуют на систему, когда она находится под действием статических нагрузок. В статье [1] рассматривались одноанкерные железобетонные стенки, здесь исследуем особенности напряженно-деформированного состояния системы, когда металлическая стенка закреплена двумя анкерами.

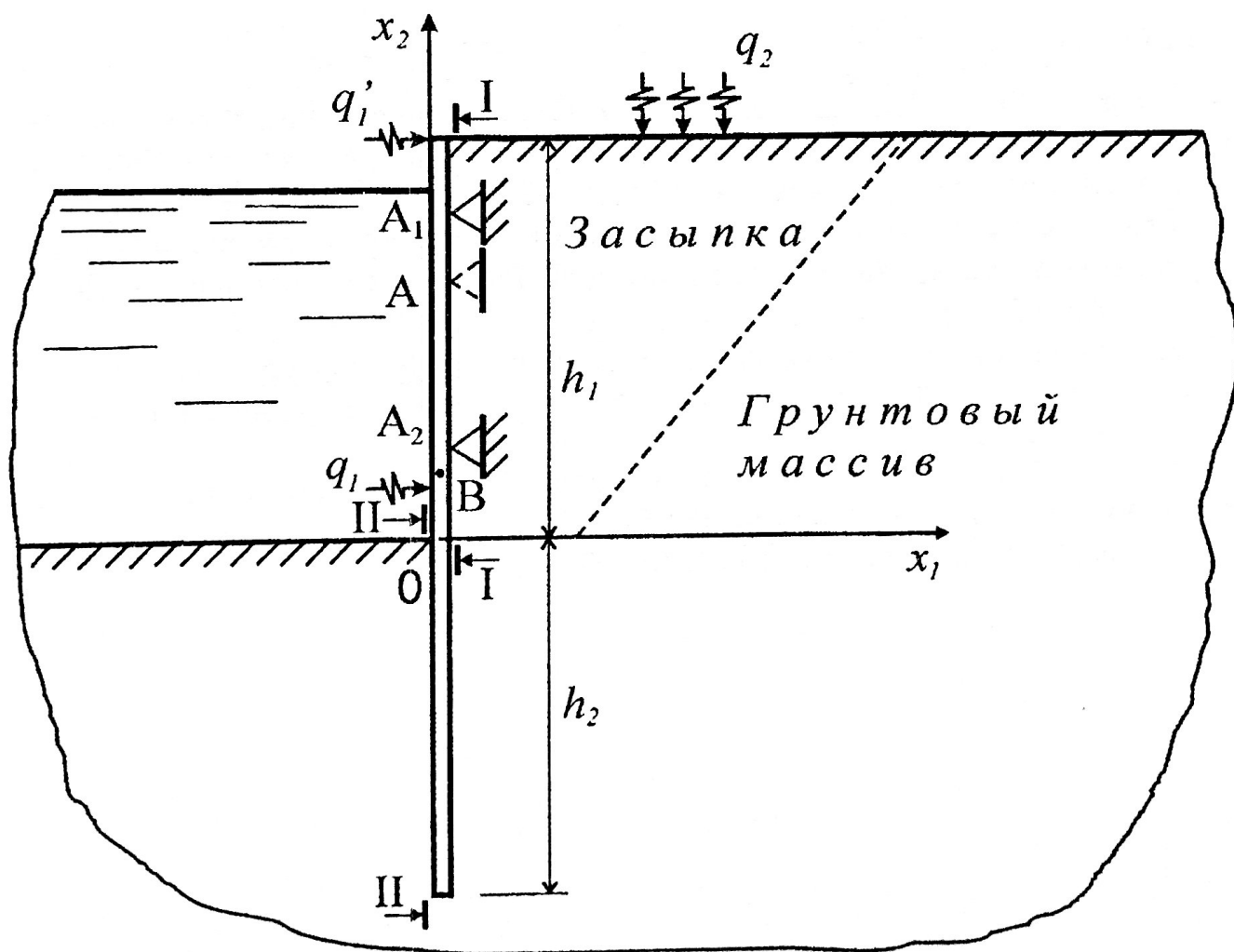


Рис. 1. Расчетная схема системы

При определении напряженно-деформированного состояния системы учитываются упругопластические свойства как шпунтовой стенки, так и грунтовой среды. Используется теория пластического течения с упрочнением, базирующаяся на принципе максимума Мизеса. В качестве функции нагружения для стенки применяется условие Мизеса, а для грунтовой среды – условие Кулона-Мора. Подробное описание применяемой модели изложено в [2].

При решении нелинейных задач от совместного действия статических и динамических нагрузок возникают серьезные трудности, вызванные неприменимостью принципа суперпозиции. Поэтому при решении динамической задачи необходимо учитывать деформации и напряжения, полученные от статических нагрузок, так как они влияют на колебательный процесс, возникающий при динамическом возбуждении 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 надежные результаты. Наконец, наиболее общие прямые шаговые методы, применяемые для исследования линейных задач [3], нуждаются в существенной модификации. Это вызвано тем, что при решении упругопластических задач матрица дискретизированных исходных уравнений изменяется при переходе от одного временного шага к другому.

Указанные выше факторы вызывают серьезные трудности при разработке алгоритма решения рассматриваемой нелинейной задачи. Они были преодолены в работе [2], где приведен вывод основных уравнений и изложена методика их численной реализации. Поэтому здесь теоретические исследования не приводятся, а рассматриваются только результаты решений и их анализ для конкретно поставленной задачи.

Численные результаты были определены при следующих исходных данных:  $h_1 = 13$  м;  $h_2 = 8$  м; стенка изготовлена из шпунта Ларсен-V. Характеристики грунтового массива:  $E = 20$  МПа;  $\mu = 0,41$ ;  $c = 0,02$  МПа;  $\varphi = 21^\circ$ . Характеристики засыпки:  $E_s = 28$  МПа;  $\mu_s = 0,3$ ;  $c_s = 0,012$  МПа;  $\varphi_s = 28^\circ$ . Анкера расположены от верха стенки на расстоянии 2,8 м и 7,4 м.

Вначале исследуем процесс изменения активного и пассивного давления засыпки на стенку в зависимости от количества анкеров. Ранее такая задача в упругопластической постановке не рассматривалась. Анкер  $A$  для одноанкерной стенки расположен на расстоянии 4,6 м от её верха и на рис. 1 показан пунктиром.

На рис. 2 – 4 соответственно показаны эпюры для одноанкерной шпунтовой стенки: перемещений  $u_1$  её вертикальной оси, начиная от низа и до её верха; активного давления  $\sigma_{11}$  по сечению I – I, построенной по точкам интегрирования метода Гаусса для каждого конечного элемента, начиная от дна моря до верха стенки; пассивного давления  $\sigma_{11}$  по сечению II – II, также построенной по точкам интегрирования метода Гаусса, начиная от низа стенки до дна моря. Все эпюры вычислены от действия засыпки. Для каждого элемента использовалось девять точек интегрирования, поэтому длина сечения I – I равна не 13,0 м, а только 12,58 м. Для сечения II – II длина составляет 7,64 м, а не 8,0 м. Наибольшее горизонтальное перемещение стенки, расположенное на расстоянии 12,0 м от её нижней части, равно 0,59 см. Нижний край стенки переместился влево на 0,14 см. Произошел сложный изгиб стенки, который невозможно разложить на её поступательное смещение и поворот. Эпюра активного давления засыпки, представленная на рис. 3, по форме совпадает с эпюрой, полученной из экспериментов [4]. Показанная на этом рисунке пунктирная линия, соответствует эпюре активного давления, определенной по теории Кулона. Экспериментальными данными доказано, что эта теория дает завышенные активные давления, поэтому применялись различные волевые решения по исправлению и приближению давления к реальным данным [4,5].

По предлагаемой методике расчета эпюра активного давления соответствует экспериментальным данным без всяких дополнительных уточнений. Такая же картина наблюдается и при определении пассивного давления. Здесь следует отметить, что эпюра пассивного давления, полученная по Кулону (пунктирная линия на рис. 4), резко отличается от экспериментальных данных и от эпюры, определенной по предлагаемой методике. Кроме того, необходимо заметить, что во всех экспериментальных данных не было получено пассивное давление в точке на уровне дна. Датчики ставились на некотором расстоянии в сторону грунта от этой точки, затем от замеренного давления проводилась линия к его нулевому значению, что вызывает сомнение. К сожалению, по предлагаемой методике пассивное давление определялось в точке Гаусса, расположенной от дна моря на расстоянии 18 см, поэтому вопрос о распределении давления на этом участке пока остается открытым.

На рис. 5 – 7 показаны те же, что и на предыдущих рисунках эпюры, но для двуханкерной шпунтовой стенки. Сравнивая их, можно отметить, что горизонтальные перемещения стенки  $u_1$  выровнялись и

уменьшились. Так, максимальное значение  $u_1$  уменьшилось в 5,9 раза, а у низа стенки – в 1,64 раза. Эпюры активного и пассивного давления, определенные по Кулону (пунктирные линии) ещё более резко отличаются от эпюр, полученных по предлагаемой методике. Здесь также наибольшие значения активного давления наблюдаются в местах крепления анкеров к стенке. Эпюра пассивного давления по форме не изменилась, но её максимальное значение уменьшилось в 1,6 раза.

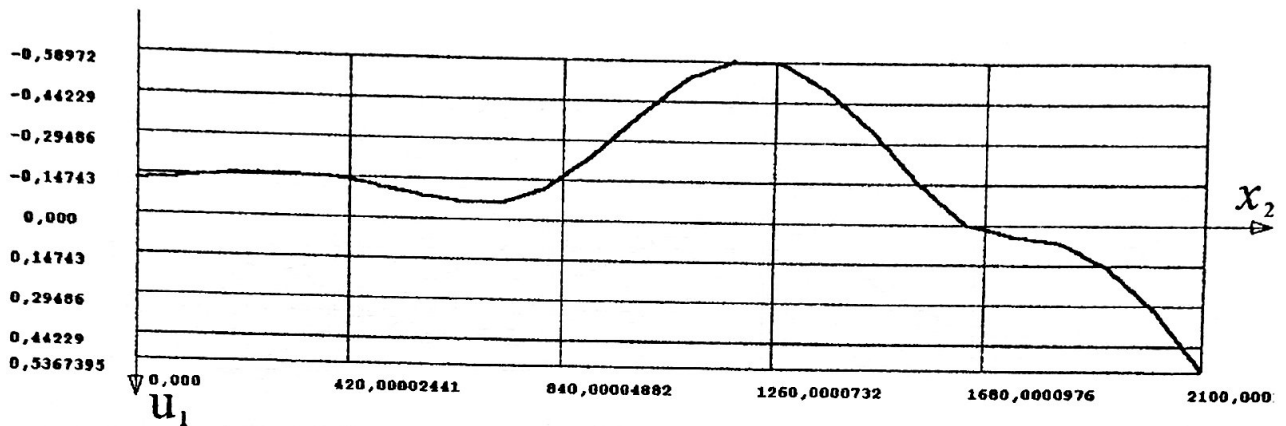


Рис. 2. Эпюра перемещений  $u_1$  одноанкерной стенки от действия собственного веса засыпки (в см)

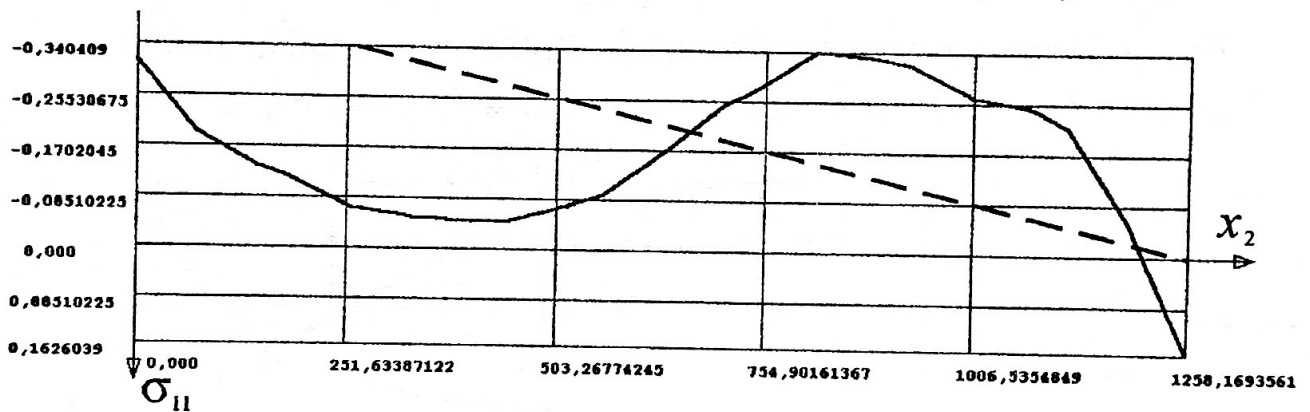


Рис. 3. Эпюра активного давления  $\sigma_{11}$  одноанкерной стенки по сечению I – I от действия собственного веса засыпки (в 10 МПа)

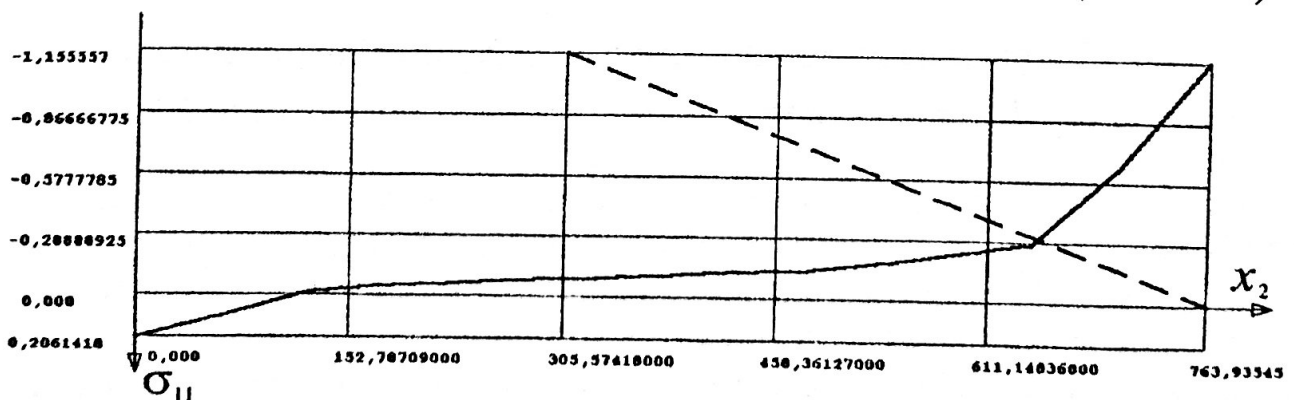


Рис. 4. Эпюра пассивного давления  $\sigma_{11}$  одноанкерной стенки по сечению II – II от действия собственного веса засыпки (в 10 МПа)

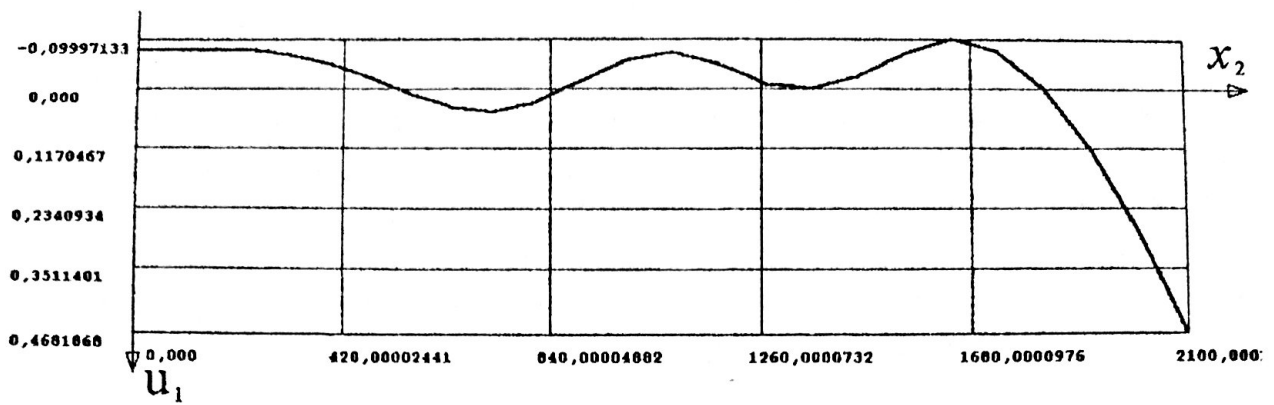


Рис. 5. Эюра перемещений  $u_1$  двуханкерной стенки от действия собственного веса засыпки (в см)

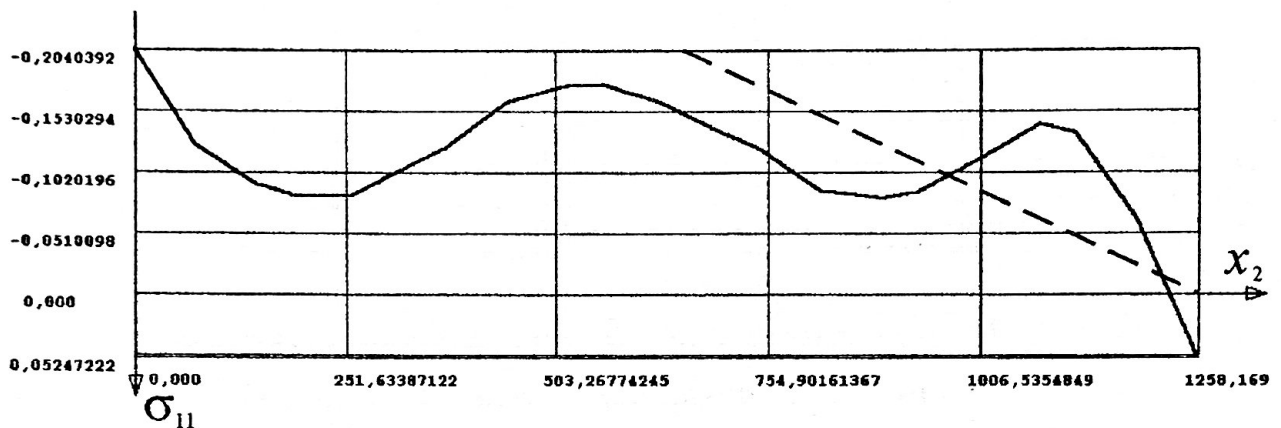


Рис. 6. Эюра активного давления  $\sigma_{11}$  двуханкерной стенки по сечению I – I от действия собственного веса засыпки (в 10 МПа)

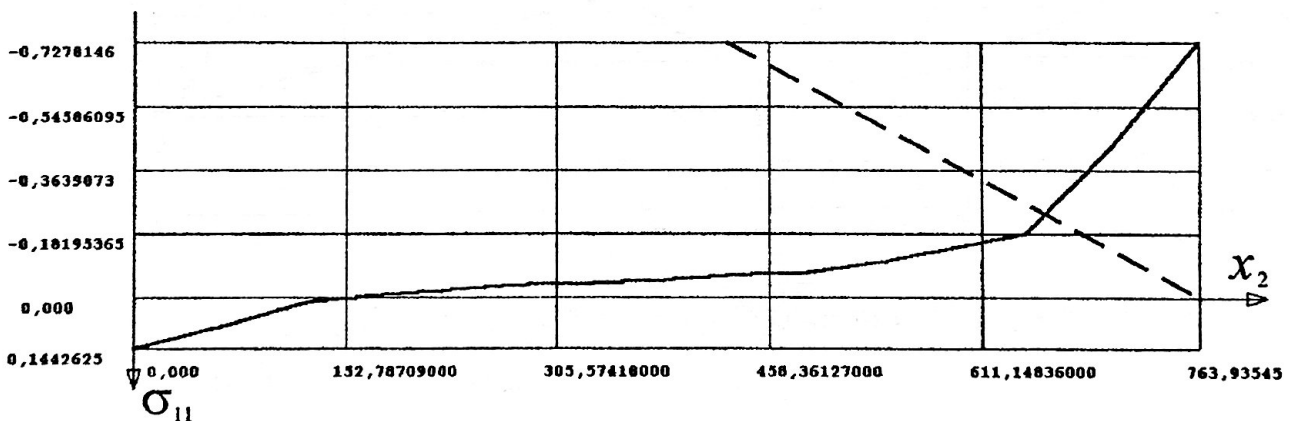
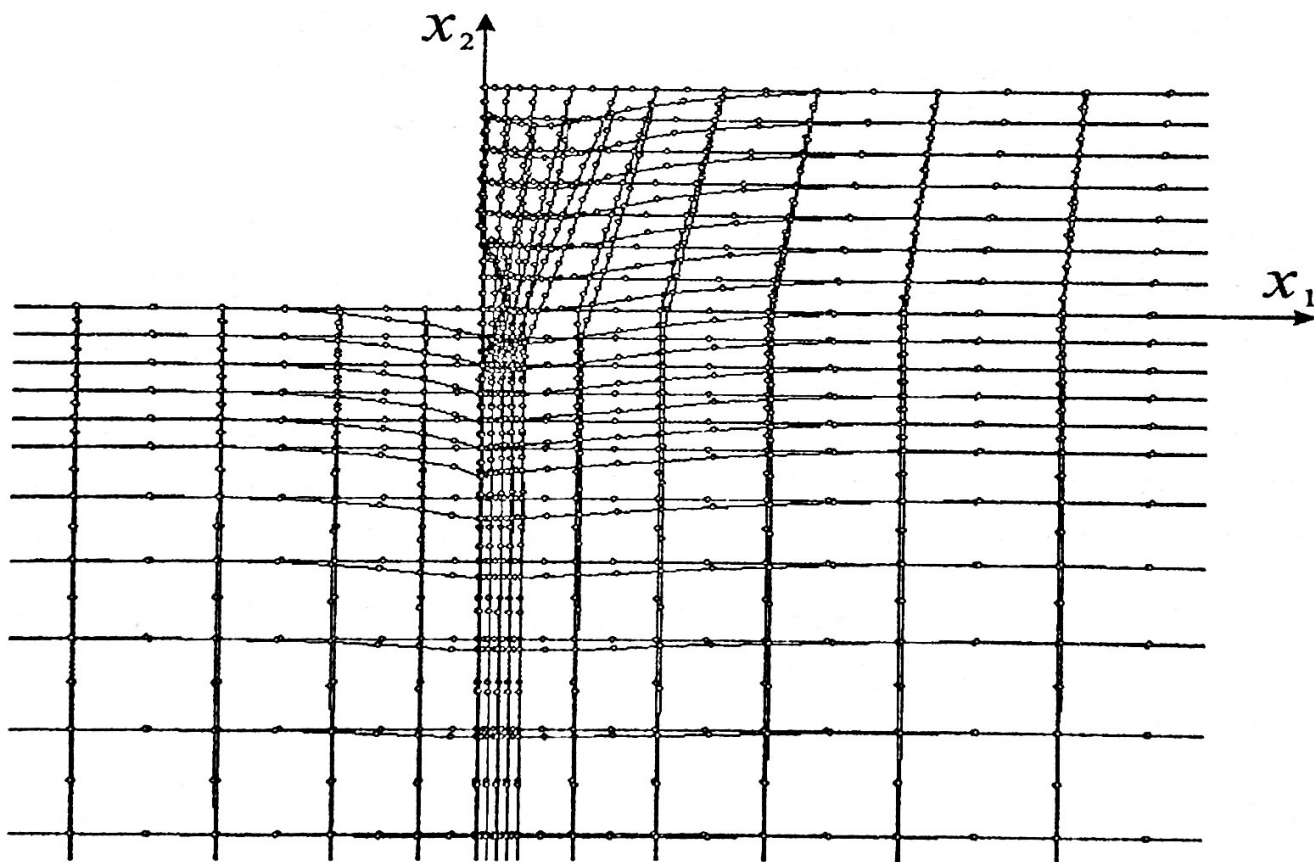


Рис. 7. Эюра пассивного давления  $\sigma_{11}$  двуханкерной стенки по сечению II – II от действия собственного веса засыпки (в 10 МПа)

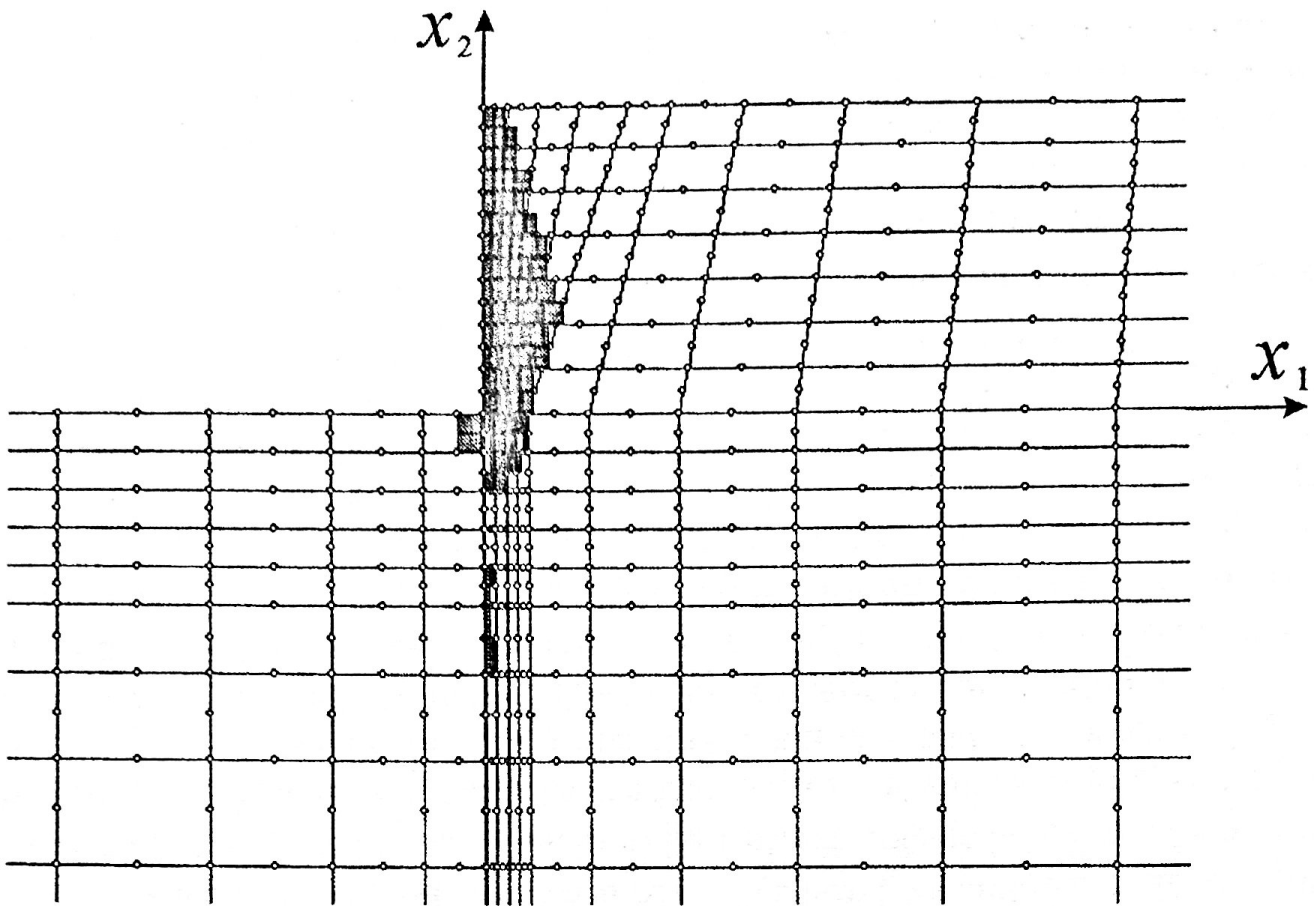
Анализируя приведенные эюры, следует обратить внимание на следующие обстоятельства. Во-первых, полученные значения перемещений стенки, активного и пассивного давления на неё засыпки более точно совпадают как качественно, так и количественно с экспериментальными данными. Это подтверждается проведенными сравнениями с опытными данными Лазебника Г. и Ренгача В.Н., которые будут опубликованы позже. Во-вторых, подтверждается, что результаты, полу-

ченные по теории Кулона, не соответствуют экспериментальным данным и данным, определенным по предлагаемой методике. В-третьих, постановка двух анкеров существенно уменьшает прогибы стенки, активное и пассивное давление на неё засыпки.

Пусть двуханкерная стенка, находящаяся под действием собственного веса засыпки, получила импульсное воздействие  $q_1$  от подходящего к причалу судна. Интенсивность динамической нагрузки равна 1,5 МПа, время её действия 0,01 сек. От воздействия указанных нагрузок система придет в колебательное движение. На рис. 8 в увеличенном масштабе показано перемещение системы в момент времени  $t = 0,03$  сек. В районе удара стенки судном образуется выемка, которая увеличивается до момента времени  $t = 0,038$  сек., затем она начинает уменьшаться и при  $t = 0,12$  сек. достигает наибольшего перемещения 0,14 см в обратную сторону (от засыпки). После удара судна в засыпке и грунтовом массиве начинает увеличиваться пластическая область и при  $t = 0,03$  сек. она достигает размеров, показанных на рис. 9. Затем она с течением времени начинает уменьшаться и при  $t > 0,3$  сек. принимает почти такие же размеры, которые она занимало до удара.



*Рис. 8. Перемещение системы от действия собственного веса засыпки и удара судна при подходе к причалу в момент времени  $t = 0,03$  сек.*



*Рис. 9. Образование в системе пластических зон от действия собственного веса засыпки и удара судна при подходе к причалу в момент времени  $t = 0,03$  сек.*

Рассмотрим горизонтальные колебания  $u_1$  точки  $B$  от действия на систему собственного веса засыпки и удара судна (рис. 10). При  $t = 0,038$  сек. происходит максимальное перемещение точки в направлении удара на  $0,9961$  см, затем при  $t = 0,12$  сек. она перемещается на  $0,1329$  см в обратную сторону и после  $0,23$  сек. её колебания почти прекращаются. Примерно такая же картина наблюдается с колебаниями напряжений  $\sigma_{22}$  в точке  $B$  (рис. 11). При  $t = 0,02$  сек. в этой точке возникает наибольшее напряжение  $\sigma_{22}$ , равное  $21,82$  МПа, которое затем почти сразу же затухает.

В заключение можно отметить, что предлагаемая методика и разработанный на её основе программный комплекс позволяют реализовать рекомендуемые в СНиПе два предельных состояния с единых расчетных позиций при одновременном действии как статических, так и динамических нагрузок.

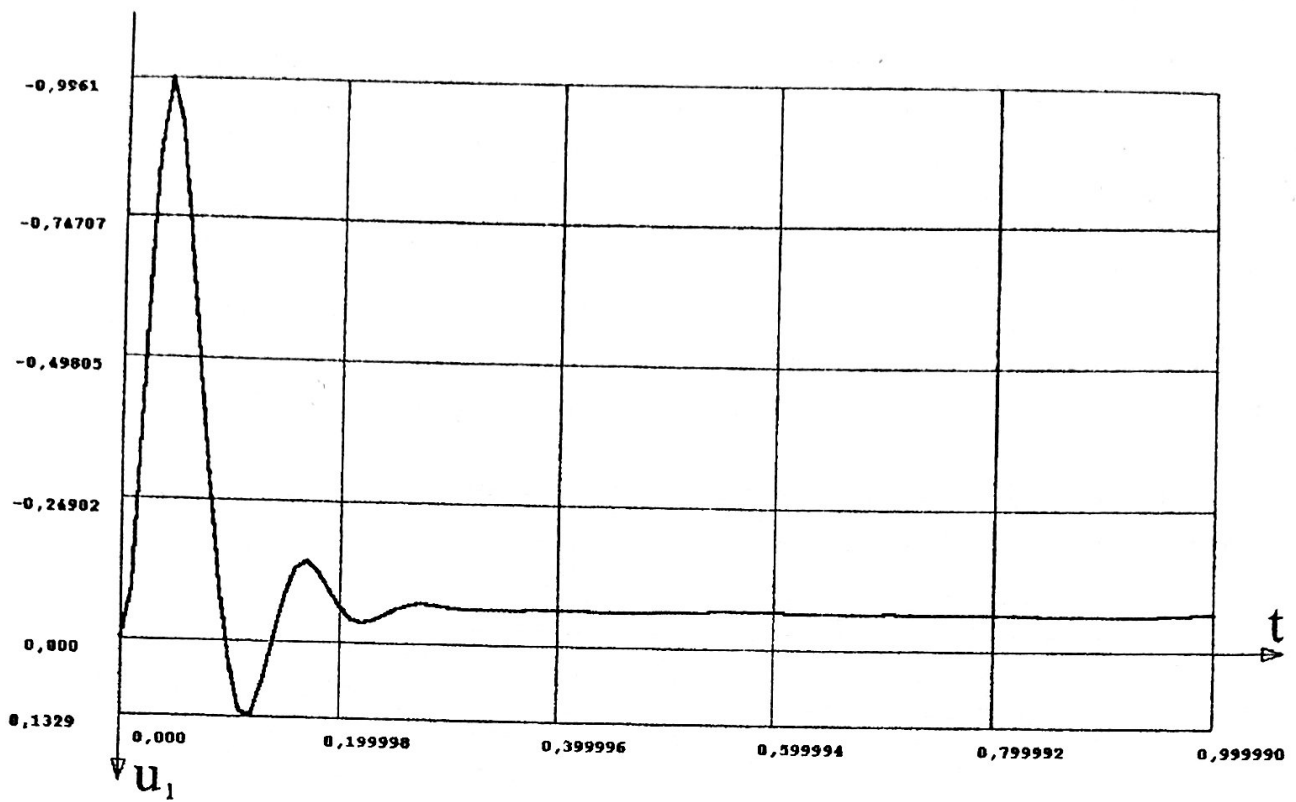


Рис. 10. Эюра горизонтальных колебаний  $u_1$  точки В от действия нагрузки  $q_1$  (в см)

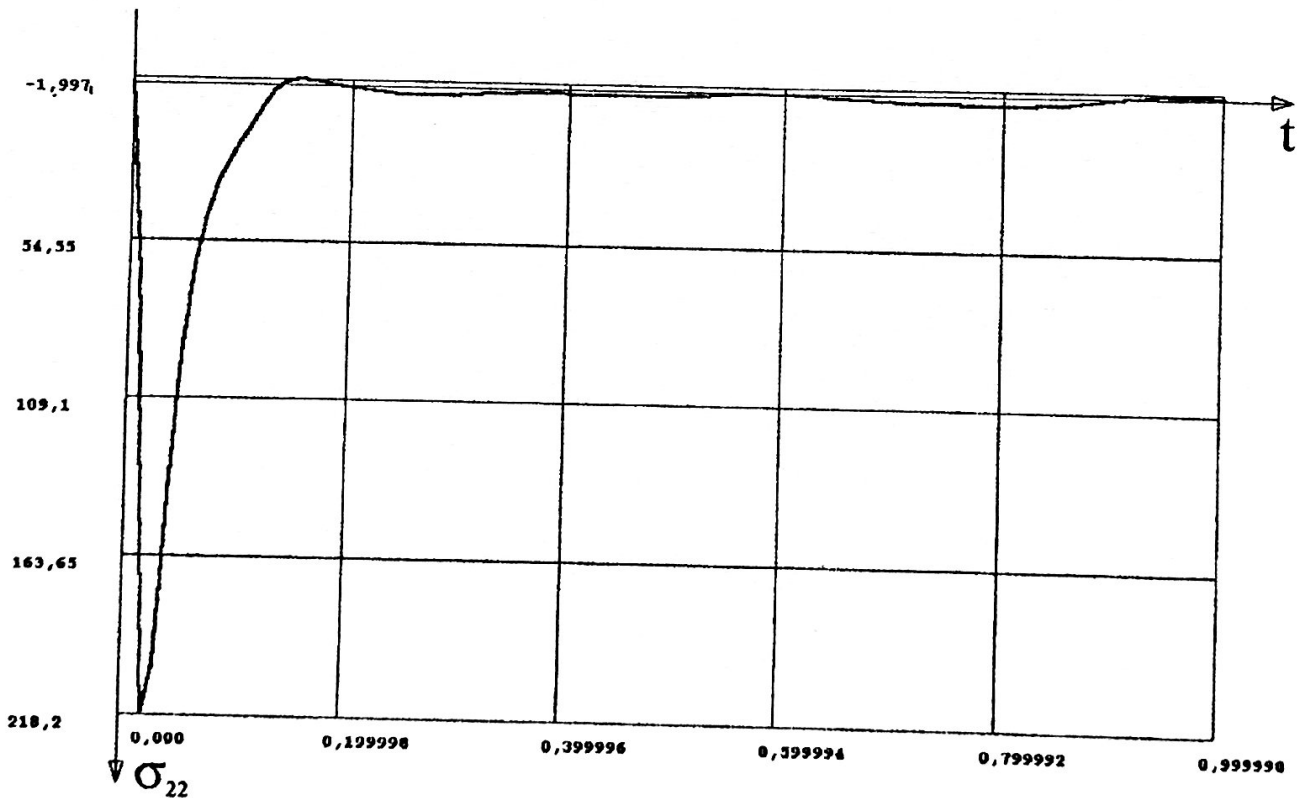


Рис. 11. Эюра колебания напряжений  $\sigma_{22}$  в точке В от действия нагрузки  $q_1$  (в 10 МПа)



## Литература

1. Гришин А.В. Динамический расчет тонкой железобетонной стенки, взаимодействующей с грунтовой и водной средой // Сталезалізобетонні конструкції: дослідження, проектування, будівництво, експлуатація. Зб. Наук. Статей. Вип. 5. – Кривий Ріг: КТУ, 2002. – с. 173-178.
2. Гришин А.В., Федорова Е.Ю. Нелинейная динамика ограждающих сооружений. – Одесса: ОНМУ, 2002. – 240 с.
3. Бате К., Вилсон Е. Численные методы анализа и метод конечных элементов. – М.: Стройиздат, 1982. – 447 с.
4. Смирнов Г.Н. и др. Порты и портовые сооружения. – М.: Стройиздат, 1993. – 636 с.
5. Ляхницкий В.Е. и др. Портовые гидротехнические сооружения. – М.: Морской транспорт, 1956. – 536 с.