

Конечно-элементное моделирование напряженно-деформированного состояния заанкеренного больверка

П.П. Гайджуров, Ю.С. Данько, Н.В. Касакова, Ю.С. Фаурян

Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону

Аннотация: Выполнен конечно-элементный анализ напряженно-деформированного состояния берегоукрепительного сооружения типа заанкеренный больверк при различных видах внешнего силового воздействия. Установлено, что принятые геометрические параметры сооружения обеспечивают требуемый запас прочности и гарантируют устойчивую работу объекта во всем диапазоне проектных нагрузений. Сформулированы практические рекомендации по корректировке конструкционной схемы кнехта (битенга).

Ключевые слова: метод конечных элементов, напряженно-деформированное состояние, AnsysMechanical, берегоукрепительное сооружение типа заанкеренный больверк, кнехт.

Несмотря на то, что за последнее десятилетие произошли значительные положительные изменения в развитии автомобильного сообщения на территории Российской Федерации и Южного Федерального округа, в частности, тем не менее возникают значительные проблемы, связанные с перегруженностью главных автомагистралей страны. В этой связи основной альтернативой автомобильным перевозкам становится речной транспорт. Однако для реализации данной альтернативы необходимо существенно усовершенствовать логистические центры вдоль главных речных «артерий». В этой связи актуальным направлением является создание искусственных внутренних гаваней, оборудованных причальными стенками в сочетании с соответствующими берегоукрепительными сооружениями [1-7].

В настоящей статье в качестве объекта исследования рассматривается берегоукрепительное (причальное) сооружение, состоящее из шпунтовой стенки протяженностью более 140 м, усиленной анкерными связями, регулярно расположенными с шагом 2,1 м. С учетом конструктивных особенностей данного сооружения в качестве основной расчетной схемы принимаем поперечное сечение больверка, проходящее через анкерную связь (рис. 1). Временные нагрузки, действующие на сооружение, представлены следую-

щими составляющими: давление от груза складского помещения – q_1 ; давление от пригрузки подъездного участка – q_2 ; нагрузка от подъёмно-транспортного средства – $P_{кр}$; нагрузка от навала пришвартованного судна – $P_{пр}$; гидростатическое давление на шпунт – $q_{г}$ (h – уровень воды у стенки). Собственный вес материала грунтового основания и конструктивных элементов шпунтовой стенки не учитываем, т.к. эта нагрузка является постоянной и соответствующие деформации на момент приложения временных силовых воздействий должны удовлетворять проектному решению.

Грунтовое основание причального сооружения неоднородно-слоистое и образовано из следующих материалов (рис. 1):

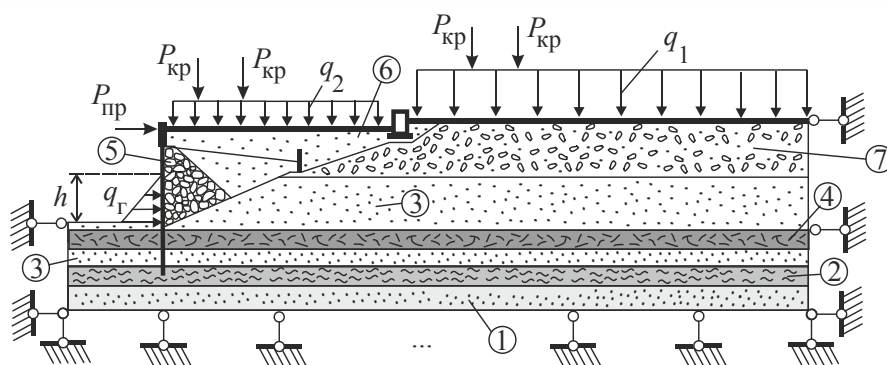


Рис. 1. – Основная расчетная схема

А) Естественное основание:

- 1 – песок средней крупности плотный однородный насыщенный водой;
- 2 – суглинок тяжелый пылеватый текучий;
- 3 – песок мелкий плотный неоднородный насыщенный водой;
- 4 – суглинок тяжелый пылеватый мягкопластичный;

Б) Искусственное (насыпное) основание:

- 5 – дренажная призма (каменная наброска);
- 6 – песок мелкий;
- 7 – слой, состоящий из смеси песка, ракушечника и обломков бетона.

Механические константы основания приведены в табл. 1.

Таблица 1

Механические константы основания

Материал	Модуль деформации, МПа	Коэффициент Пуассона
Песок (1)	38,8	0,3
Суглинок (2)	3,1	0,35
Песок (3)	31,5	0,3
Суглинок (4)	6,2	0,35
Дренажная призма (5)	$41 \cdot 10^3$	0
Песок (6)	30	0,3
Насыпной слой (7)	30	0,3

Шпунтовая стенка выполнена из стальных труб с внешним диаметром 72 см и толщиной стенки 9 мм. Анкерные тяги представляют собой металлические стержни круглого поперечного сечения диаметром 6 см. Геометрические характеристики трубы и анкерной тяги приведены в табл. 2. Механические постоянные шпунта и анкера: модуль упругости $E=2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\nu=0,28$.

Таблица 2

Геометрические характеристики трубы и анкерной тяги

Элемент конструкции	Площадь поперечного сечения, м ²	Осевой момент инерции сечения, м ²
Шпунт	0,0201	0,00127
Анкер	0,00283	$6,36 \cdot 10^{-7}$

Ростверк и порогаобразующая подпорная стенка берегоукрепительного сооружения выполнены из бетона, имеющего механические характеристики: $E=2,1 \cdot 10^4$ МПа; $\nu=0,16$.

Величины прикладываемых усилий: $q_1=8$ т/м²; $q_2=6$ т/м²; $P_{кр}=8$ т; $P_{пр}=1,7$ т; $q_r = \rho h$, где плотность воды $\rho=1000$ кг/м³, высота погруженной в воду

части шпунта $h=[0...4,5 \text{ м}]$. Значения усилий $q_1, q_2, P_{кр}, P_{пр}$ приняты для экстремального режима эксплуатации объекта.

Размеры расчетной области сечения берегоукрепительного сооружения показаны на рис. 2.

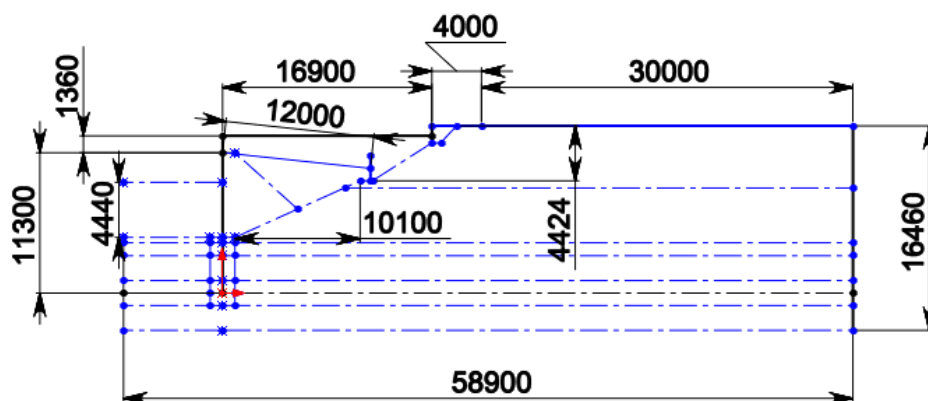


Рис. 2. – Размеры расчетной области сечения берегоукрепительного сооружения в мм

Моделирование больверка выполнялось с помощью программного комплекса ANSYS Mechanical [8-10]. Рассматривалась задача о плоской деформации. Конечно-элементная сетка для исследуемой области приведена на рис. 3.

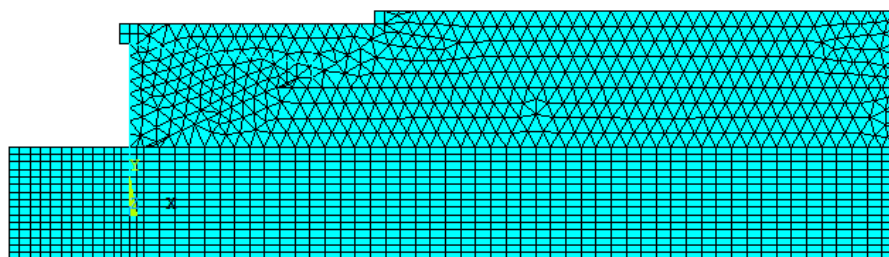


Рис. 3. – Конечно-элементная сетка

Для моделирования грунтового основания, ростверка и подпорной стенки использовались плоские 4-х и 3-х узловые конечные элементы. Шпунт, анкерная тяга и упорная анкерная плита представлены двумерными

стержневыми (балочными) конечными элементами. Ансамблирование выполнено таким образом, что анкерная тяга воспринимает только усилие, обусловленное смещением шпунта, и реакцию от анкерной плиты.

Для реалистичного моделирования взаимодействия шпунта и массива дренажной призмы использована процедура кооптирования, суть которой в данном случае состоял в объединении только горизонтальных перемещений смежных узлов, принадлежащих смежным стержневым и плоским конечным элементам.

С помощью модального анализа установлено, что наиболее активное развитие деформаций больверка будет происходить в горизонтальном (1-ая форма собственных колебаний) и вертикальном (2-ая форма собственных колебаний) направлениях, что связано с жесткостными характеристиками слоев грунтового основания. Последующие формы собственных колебаний не представляют опасности для несущей способности сооружения, т. к. не имеют физического смысла в рассматриваемом контексте работы объекта.

Результаты конечно-элементного моделирования в виде контрастно окрашенных (черно-белых) картин распределения полей вертикальных (осадка) u_y и горизонтальных u_x перемещений для наиболее нагруженного варианта работы сооружения приведены соответственно на рис. 4 и 5.

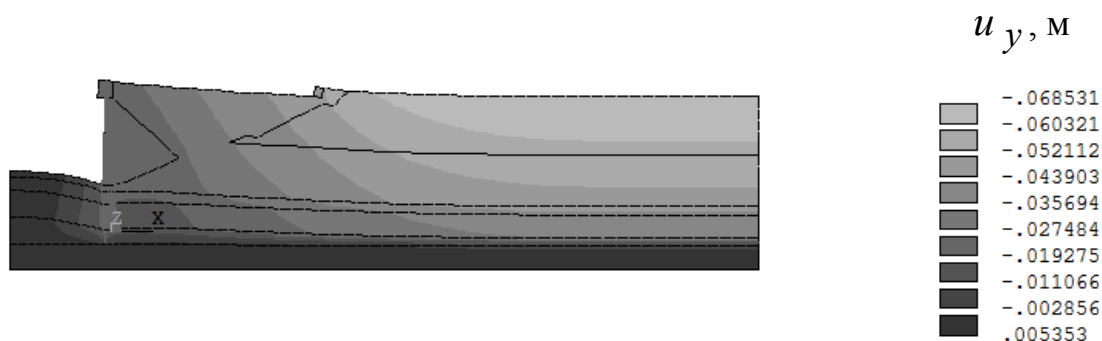


Рис. 4. – Вертикальные перемещения u_y

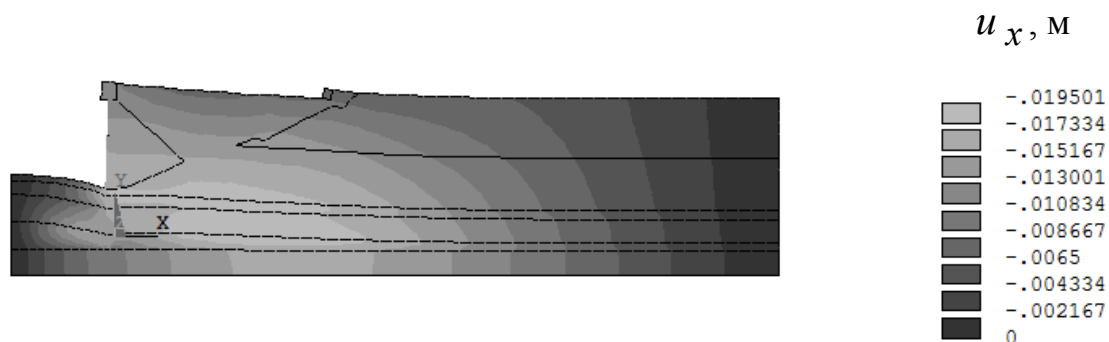


Рис. 5. –Горизонтальные перемещения u_x

Следует отметить, что полученное перемещение $u_{y,max}$ стоит рассматривать как технологическое, т. е. при повторном нагружении осадка уплотнившегося грунта будет меньше.

На рис. 6, 7 представлены соответственно эпюры изгибающих моментов M и продольных сил N , возникающих в стержневых конечных элементах.

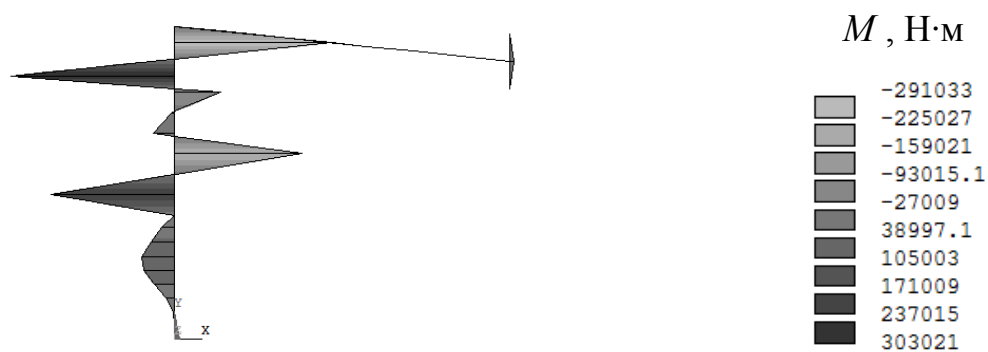


Рис. 6. – Эпюра изгибающих моментов

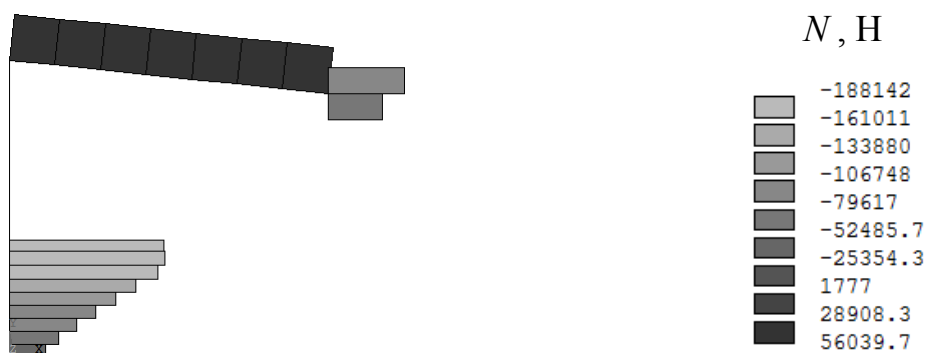


Рис. 7. – Эпюра продольных сил

На основании численного моделирования можно сделать следующие выводы:

- конструкция берегоукрепительного сооружения обладает необходимой несущей способностью по первой и второй группам предельных состояний, т. е. имеет необходимый запас прочности и жесткости;
- анализ возможных сценариев нагружения заанкеренного больверка показал, что данное сооружение является устойчивым, что исключает возможный поворот шпунта относительно точки крепления анкерной тяги, глубинный сдвиг шпунтовой стенки по круглоцилиндрической поверхности скольжения, проходящей ниже подошвы шпунтовой стенки, а также значительный сдвиг анкерной плиты в плоскости анкерной тяги;
- во всех расчетных вариантах нагружения больверка изгибающие моменты в анкерных тягах не возникают;
- Капитальное покрытие в зоне работы подъемно-транспортной техники следует выполнять после полной стабилизации осадок территории.
- требуется усилить консольную часть конструкции кнехта (битенга) путем закачивания внутрь его бетона. В месте заделки битенга в ростверк предусмотреть замоноличивание утолщенного стального

вкладыша, предотвращающего растрескивание бетона в зоне сопряжения этих элементов конструкции;

- в период эксплуатации берегоукрепительного сооружения следует обеспечить мониторинг несущих конструкций больверка в форме визуального контроля за отклонениями от первоначальной формы и раскрытием трещин.

Литература

1. Басов К.А. ANSYS: справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2012. – 640 с.
2. Волосухин В.А., Гайджуров П.П., Евтушенко С.И. и др. Инженерные конструкции: учебное пособие для студентов вузов – Новочеркасская гос. мелиор. академия; Юж.-Рос. гос. техн. ун-т (НПИ). – Новочеркасск: ЮРГТУ, 2007. – Ч.2. – 488 с.
3. Даревский В.Э. Сооружения, удерживающие грунтовые массивы (противооползневые и берегоукрепительные сооружения, подпорные стены и набережные). М.: Мастер, 2011. — 304 с.
4. Седрисев Д.Н., Рубинская А.В. Основы проектирования гидротехнических сооружений, лесных бирж и рейдов приплава. - М.: Издательство "Академия Естествознания", 2013. - 119 с.
5. Яковлев П. И., Тюрин А. П., Фортученко Ю. А. Портовые гидротехнические сооружения. – М.: Транспорт, 1989. — 320 с.
6. MaryKathrynThompson, JohnM. Thompson. ANSYSMechanicalAPDLforFiniteElementAnalysis, 2017. 245 p.
7. Прокопов А.Ю., Акопян В.Ф., Гаптлисламовна К.Н. Изучение напряженно-деформированного состояния грунтового массива и взаимного влияния подземных конструкций существующих и вновь возводимых сооружений в береговой зоне морского порта Тамань. // Инженерный вестник Дона, 2013,

№4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104.

8. Агаханов Э.К., Курачев Р.М. Напряженно-деформированное состояние радиационно-теплового экрана реактора АЭС. // Инженерный вестник Дона, 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215.

9. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Volume 2. Butterworth-Heinemann, Sixth Edition, 2005, 736 p.

10. Gao X., Zhang G., Roe C. A Study on the Effect of the Stress State on Ductile Fracture, 2010, 57 p.

References

1. Basov K.A. ANSYS: справочник пол'зователя [ANSYS: user reference]. M.: DMK Press, 2012. 640 p.

2. Volosukhin V.A., Gaidzhurov P.P., Evtushenko S.I. and others. Inzhenernye konstrukcii: uchebnoe posobie dlya studentov vuzov [Engineering structures: a manual for university students - Novocherkassk State. melior academy; South-Ros. state tech. un-t (NPI)]. Novocherkassk: SRSTU, 2007. Part 2. 488 p.

3. Darevsky V. E. Sooruzheniya-uderzhivayushchie-gruntovye-massivy-protivoopolznevye-i-beregoukrepitelnye-sooruzheniya-podpornye-steny-i-naberezhnye [Structures that hold soil massifs (landslide and shore protection structures, retaining walls and embankments)]. M: Max, 2011. 304 p.

4. Sadriev D. N., Rubinskaya A. V. Osnovy-proektirovaniya-gidrotekhnicheskikh-sooruzhenij-lesnyh-birzh-i-rejdov-priprava [Principles of design of hydraulic structures, timber exchanges and raids of priprava]. Moscow: Publishing House "Academy Of Natural Sciences", 2013. 119 p.

5. Yakovlev P. I., Tyurin A. P., Fortuchenko YU. A. Portovye gidrotekhnicheskie sooruzheniya [Port hydraulic engineering constructions]. M.: Transport, 1989. 320 p.

6. Mary Kathryn Thompson, John M. Thompson. ANSYS Mechanical APDL



for Finite Element Analysis, 2017. 245 p.

7. Prokopov A.Yu., Akopyan V.F., Gaptlislamovna K.N. Inzhenernyj vestnik-Dona (Rus), 2013, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2013/2104.

8. Agakhanov E.K., Kurachev R.M. Inzhenernyj vestnik Dona (Rus), 2018, №4. URL: ivdon.ru/ru/magazine/archive/n4y2018/5215.

9. Zienkiewicz O.C., Taylor R.L. The Finite Element Method for Solid and Structural Mechanics. Volume 2. Butterworth-Heinemann, Sixth Edition, 2005, 736 p.

10. Gao X., Zhang G., Roe C. A Study on the Effect of the Stress State on Ductile Fracture, 2010, 57 p.