

УДК 550.34:69.07:338.2

doi:10.31650/2707-3068-2020-24-11-18

**ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПУНТУ ДЛЯ РОЗРАХУНКІВ ДЕФОРМУВАННЯ ТОНКИХ СТІНОК У 2D ПОСТАНОВЦІ****Безушко Д.І.**, к.т.н., доцент,  
dibezushko@gmail.com ORCID 0000-0003-2215-1136*Одеський національний морський університет***Арсирій О.І.**, ст. викладач,  
[elena.arsiriy@gmail.com](mailto:elena.arsiriy@gmail.com) ORCID 0000-0001-8660-6916*Одеський національний морський університет***Іллічов В.Г.**, к. архітектури,[chigi1960@gmail.com](mailto:chigi1960@gmail.com)*Одеський національний морський університет*

**Анотація.** Однією з найбільш поширених конструктивних схем, що використовуються при будівництві та реконструкції причалів – є тонкі стінки (больверк). Ця система складається з лицьової стінки та анкерної системи, у яку входять тяж та анкерна стінка (або інший вид анкеруючого пристрою). Можливі деякі варіації конструктивної схеми, але в кожному з них входить лицьова стінка з шпунту. У роботі наведено варіанти визначення геометричних характеристик перерізів шпунту для використання у розрахунках плоскої деформації (плоска розрахункова модель). У стандартних сортаментах шпунту наведені лише загальні геометричні характеристики перерізу такі, як площа, момент інерції, момент опору, радіус інерції, але цього замало для використання в розрахунках методом скінчених елементів. Складна форма поперечного перерізу шпунту (зетовий, коритного, прямого, комбінованого та інших видів перерізу) призводить до розбіжностей у визначенні геометричних характеристик та їх інтерпретації у плоскій та просторовій постановці визначення напружено-деформованого стану. В роботі наведена методика визначення геометричних характеристик перерізу для стержню, що згинається для плоскої розрахункової моделі. Для розрахунків методом скінчених елементів використовується програний комплекс для геотехнічних розрахунків Midas GTS NX. Використання методу скінчених елементів при визначенні геометричних характеристик поперечного перетину шпунту дає відносну похибку до 5% по відношенню до даних наведених у сортаменті. Що є прийнятним для використання у подальших розрахунках причальних конструкцій. У роботі розглянуто два варіанти для одного метру погонного стінки: в 1 м входить 1 шпунт повністю 600 мм та другий частково 400 мм; в 1 м входять обидва шпунти по 500 мм. Найменше значення моменту інерції отримано для першого варіанту  $72511 \text{ см}^4$ , що співпадає з значенням з сортаменту на -0.26%. А для другого варіанту момент інерції більше на 12%. Тому при розрахунках слід приймати найбільш невідгідний варіант.

**Ключові слова:** тонка стінка, больверк, причал, метод скінчених елементів, геометричні характеристики перерізів.

**Вступ.** Однією з найбільш поширених конструктивних схем, що використовуються при будівництві та реконструкції причалів – є тонкі стінки (больверк). Ця система складається з лицьової стінки та анкерної системи, у яку входять тяж та анкерна стінка (або інший вид анкеруючого пристрою). Можливі деякі варіації конструктивної схеми, але в кожному з них входить лицьова стінка з шпунту.

**Аналіз досліджень та публікацій.** Шпунтова стінка та шпунтова паля працюють на згин, при цьому розрахункова схема всієї конструкції може розглядатися, як плоска деформація [8, 2] так і в тривимірній постановці. Для визначення напружено-деформованого стану та розрахунку використовують метод скінчених елементів [9] та його

сучасні інтерпретації [4]. Самі шпунтові палі мають достатньо складну форму поперечного перерізу (зетовий, коритний, прямий, комбінований та інші види перерізу) [6] тому їх інтерпретація у розрахунковій схемі, є достатньо творчою задачею і потребує математичного обґрунтування. У роботі наведено загальні принципи ідеалізації поперечного перетину шпунтових металевих палей для використання в плоских та просторових розрахункових схемах методу скінчених елементів у програмному комплексі для геотехнічних розрахунків Midas GTS NX. Це робить роботу **актуальною** та обумовлює її практичне використання у реальних розрахунках причальних конструкцій типу тонкі стінки з металевого шпунту.

**Метою дослідження** – є розробка алгоритму визначення геометричних характеристик металевого шпунту, для використання в розрахунках причалів типу «больверк» з використанням методу скінчених елементів у плоскій постановці.

Для досягнення мети дослідження потрібно було вирішити наступні **задачі**:

1. Побудувати алгоритм визначення геометричних характеристик металевого шпунту у MIDAS GTS NX;
2. Виконати порівняльний аналіз отриманих даних з характеристиками наведеними у сортаменті [6].

**Матеріали та методика дослідження. Ідеалізація шпунту при плоскій розрахунковій схемі 2D.**

Скінченні елементи, що використовуються при моделюванні 2D [4]:

1. Грунт моделюється елементами плоскої деформації Рис. 1.. Такі елементи використовуються для розрахунків споруд та їх основ, зокрема причалів, гребель і тунелів, коли типовий перетин споруди не змінюється на великій відстані в напрямку нормалі до площини даного перетину. Так як напруження в напрямку товщини елемента існують, напружений стан в таких елементах технічно не є двовимірним.

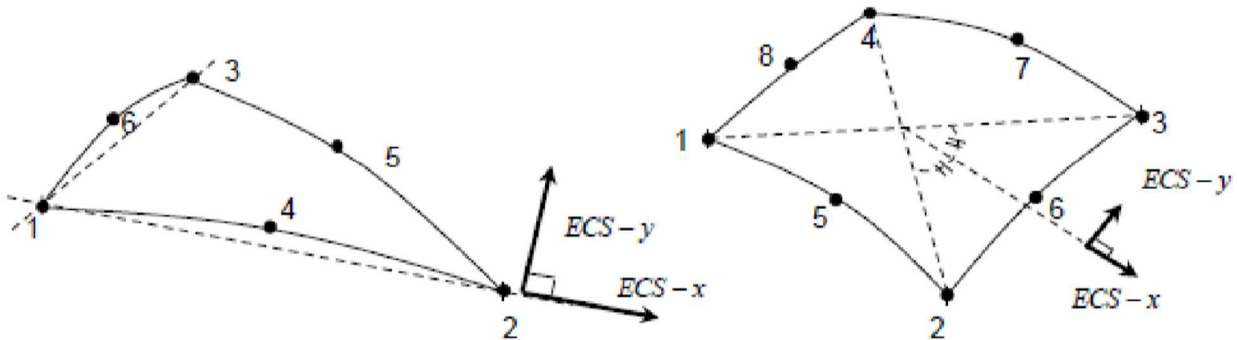


Рис. 1 Система координат елемента плоскої деформації

2. Стінка моделюється балочним елементом для визначення повздовжніх, поперечних сил та моменту, що згинає. На Рис. 2 наведено у графічному виді зусилля, деформації та система координат балочного елемента в загальному виді.

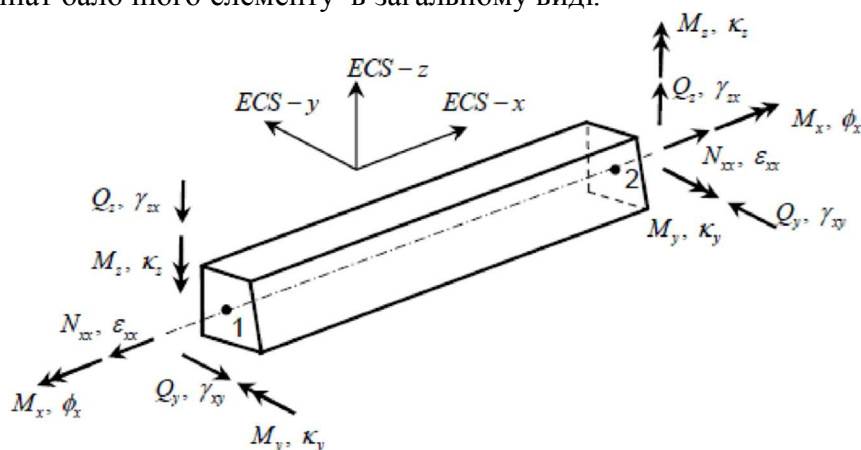


Рис.2. Зусилля, деформації та система координат балочного елемента

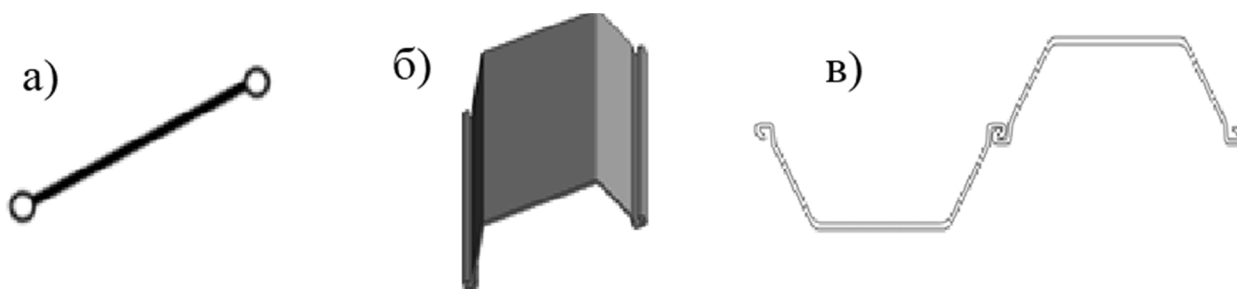


Рис. 3. Фізична та ідеалізована модель шпунту

а) ідеалізована модель, б) фізична модель, в) поперечний перетин стінки.

Сам скінченний елемент має два вузла, відстань між ними характеризує його довжину. Геометричні характеристики перерізу необхідно вводити додатково у форму Create/Modify 1D Property вкладенка Beam Рис.4.

	Section-i	Section-j	
Cross Sectional Area(A)	0.785398163	0.785398163	m <sup>2</sup>
Torsional Constant(I <sub>x</sub> )	0.0981747704	0.0981747704	m <sup>4</sup>
Torsional Stress Coeff.	0.5	0.5	m
Area Moment of Inertia(I <sub>y</sub> )	0.0490873852	0.0490873852	m <sup>4</sup>
Area Moment of Inertia(I <sub>z</sub> )	0.0490873852	0.0490873852	m <sup>4</sup>
Effective Shear Area(A <sub>y</sub> )	0.706858347	0.706858347	m <sup>2</sup>
Effective Shear Area(A <sub>z</sub> )	0.706858347	0.706858347	m <sup>2</sup>
Shear Stress Coefficient(G <sub>y</sub> )	1.04719755	1.04719755	1/m <sup>2</sup>
Shear Stress Coefficient(G <sub>z</sub> )	1.04719755	1.04719755	1/m <sup>2</sup>

Рис. 4. Форма Create/Modify 1D Property

**Cross sectional area (A)** (Площа поперечного перерізу).

**Torsional stiffness (I<sub>xx</sub>)** (Жорсткість при крученні)

Жорсткість при крученні - це характеристика опору крутному моменту, і обчислюється наступним чином

$$I_{xx} = \frac{T}{G\theta} \quad (1)$$

де,  $I_{xx}$  - жорсткість при крученні,  $T$  - крутний момент,  $\theta$  – кут скручування,  $G$  – модуль зсуву.

Жорсткість при крученні може бути обчислена з використанням принципу Сен-Венана. За умови визначення  $\omega$  – функції кручення, методом скінченних елементів, вираз (1) має наступний вигляд

$$I_{xx} = \int \left[ \left( \frac{\partial \omega}{\partial z} + y \right) y - \left( \frac{\partial \omega}{\partial y} - z \right) z \right] dA \quad (2)$$

### Effective shear area ( $A_{sy}, A_{sz}$ ) (Ефективна площа зрізу)

Величина ефективною площі зрізу необхідна для обчислення зсувної жорсткості, яка характеризує опір дії поперечної сили. Якщо ефективна площа зрізу по деякому напрямку не задана, то деформації зсуву по даному напрямку ігноруються.

$$A_{sy} = S_{ky} A \quad (4)$$

$$A_{sz} = S_{kz} A \quad (5)$$

де,  $S_{ky}$  та  $S_{kz}$  - коефіцієнт ефективною площі зрізу, що характеризує опір дії поперечної сили в напрямку вісі  $y$  та  $z$  системи координат елемента,  $A_{sy}, A_{sz}$  - ефективна площа зрізу, що характеризує опір дії поперечної сили в напрямку вісі  $y$  та  $z$  у системи координат елемента.

### Area moment of inertia ( $I_{yy}, I_{zz}$ ) (Момент інерції перерізу)

$$I_{yy} = \int z^2 dA \quad (6)$$

$$I_{zz} = \int y^2 dA \quad (7)$$

Усі геометричні характеристики можна визначити та вводити в ручну, а можна скористатися методом скінченних елементів, та визначити їх за допомогою вбудованого калькулятора геометричних характеристик в Midas GTS NX. Алгоритм дій для шпунту PU32 наведено нижче.

### Алгоритм визначення геометричних характеристик перерізу в Midas GTS NX:

1. Імпорт абрису поперечного перерізу. Для цього використовуємо електронну базу даних перерізів шпунту з сайту виробника у форматі dxf [7], або будуємо у ручну за допомогою геометричних примітивів.
2. Перевірка геометричних розмірів та масштабування моделі. У зв'язку з тим що поперечний перетин в dxf файлі виконано в міліметрах, а розміри моделі в GTS NX прийнято в метрах, нам необхідно масштабувати модель з коефіцієнтом масштабу 0.001.
3. Побудова поверхні по грані.
4. Введення характеристик матеріалу (модуль деформацій, коефіцієнт поперечних деформацій, питома вага).
5. Формування властивостей скінченного елемента, для формування поперечного перерізу. Будемо використовувати оболонкові скінченні елементи.
6. Формування мережі скінченних елементів.
7. Визначення геометричних характеристик поперечного перетину шпунту за допомогою вбудованого калькулятора в GTS NX Рис.5.

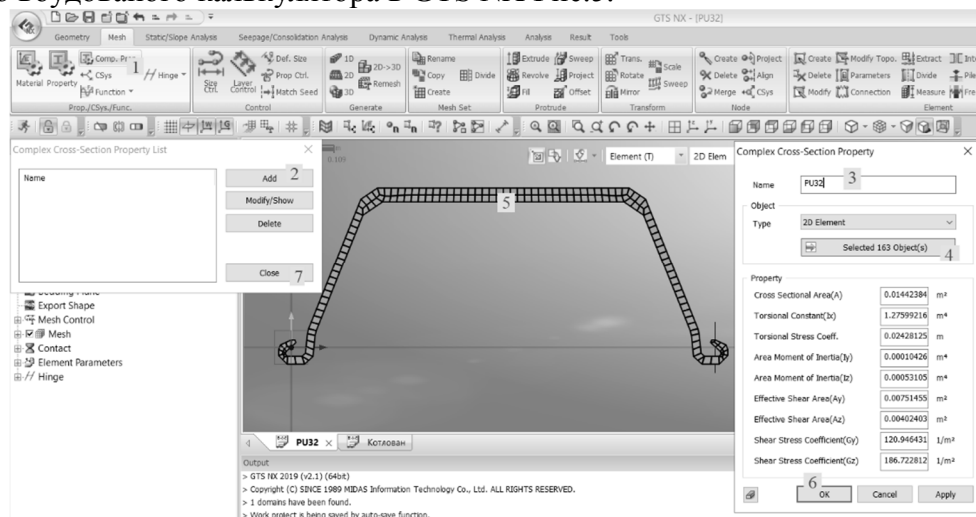


Рис. 5. Визначення геометричних характеристик поперечного перетину

## 9. Формування властивостей поперечного перетину для завдання параметрів скінченному елементу типу балка Рис.6.

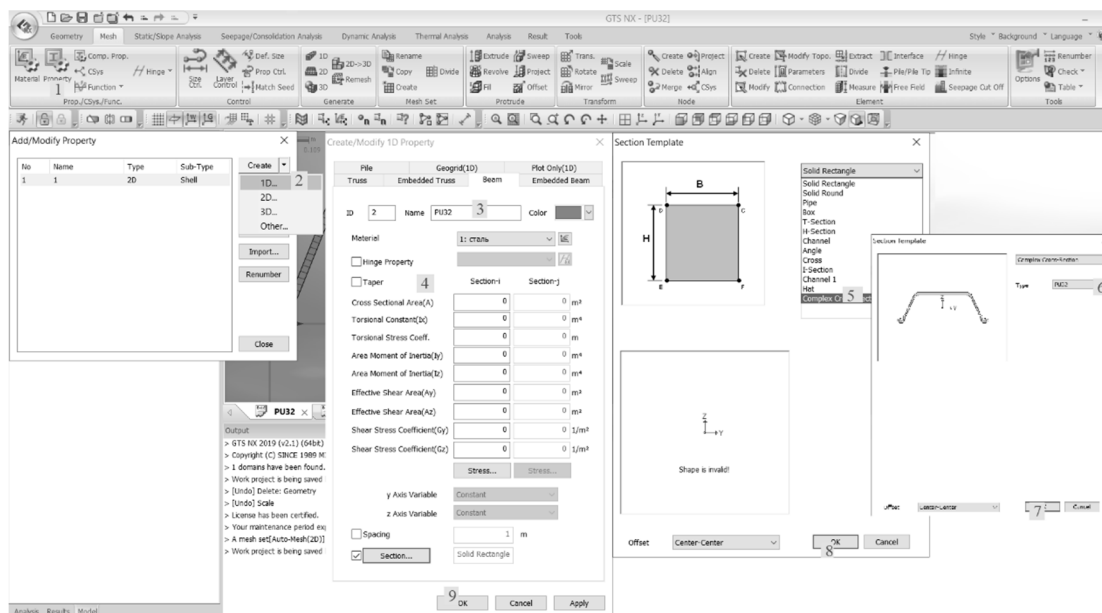


Рис. 6. Формування властивостей поперечного перетину для завдання параметрів скінченному елементу типу балка.

При використанні плоскої розрахункової схеми слід умовно вирізати 1 м.п. причалу, але який саме слід вирішувати інженеру. У роботі розглянуто два варіанти: в 1 м входить 1 шпунт повністю 600 мм та другий частково 400 мм Рис. 7 а; в 1 м входять обидва шпунти по 500 мм. Рис. 7 б.

### Аналіз отриманих результатів.

Для аналізу та можливості використання отриманих даних будемо порівнювати їх з даними, що наведені в сартаменті шпунту фірми ArcelorMittal [6]. Порівнювати будемо дві геометричні характеристики  $A$  (площу) та  $I$  (момент інерції) для чотирьох варіантів поперечного перерізу: один шпунт, два шпунти, 1метр стінки (як показано на Рис. 7 а) та 1метр стінки (як показано на Рис. 7 б).

Результати визначення геометричних характеристик перерізу та визначення відносних відхилень наведені у Таблиця 1.

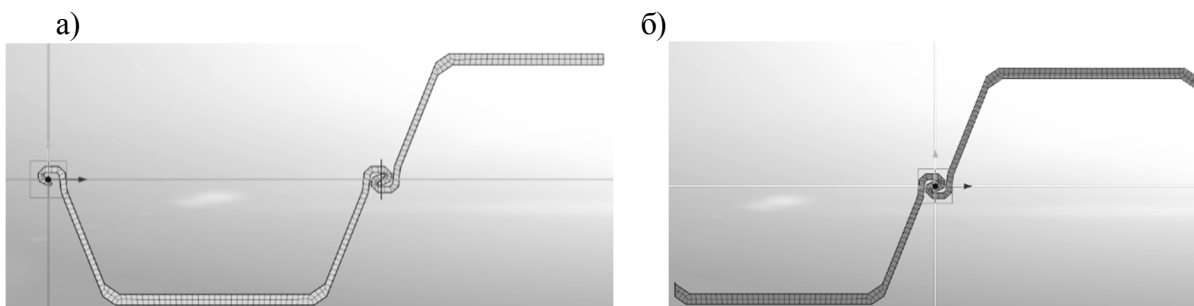


Рис. 7. Можливі вид поперечного перерізу на 1 м стінки

Таблиця 1

Порівняння отриманих результатів з даними сортаменту для PU32

Профіль	Відповідно до [6]		За результатами розрахунку		Відносне відхилення	
	Площа, см <sup>2</sup>	Момент інерції $I$ см <sup>4</sup>	Площа, см <sup>2</sup>	Момент інерції $I$ см <sup>4</sup>	%	%
для S	145.4	10950	144.2	10426	0.83	4.79
для D	290.8	86790	288.5	87059	0.79	-0.31
для 1 м стінки рис. 7 а	242.3	72320	234.9	72511	3.05	-0.26
для 1 м стінки рис. 7 б	242.3	72320	224.8	80773	7.22	-11.69

**Висновки.**

1. Використання методу скінчених елементів при визначенні геометричних характеристик поперечного перетину шпунту дає відносну похибку до 5% по відношенню до даних наведених у сортаменті. Що є прийнятним для використання у подальших розрахунках причальних конструкцій.

2. У роботі розглянуто два варіанти для одного метру погонного стінки: в 1 м входить 1 шпунт повністю 600 мм та другий частково 400 мм Рис. 14 а; в 1 м входять обидва шпунти по 500 мм. Найменше значення моменту інерції отримано для першого варіанту 72511 см<sup>4</sup>, що співпадає з значенням з сортаменту на -0.26%. А для другого варіанту момент інерції більше на 12%. Тому при розрахунках слід приймати найбільш не вигідний варіант.

**Список літератури**

1. Ворожцов Е. В. Разностные методы решения задач механики сплошных сред: Учеб. пособие. – Издательство НГТУ – Новосибирск, 1998. – 86с.
2. ДБН В.2.1-10-2009 Основи та фундаменти споруд. М.: Мінрегіонбуд України, 2009
3. Клованич, С. Ф., Безушко Д.И. Метод конечных элементов в нелинейных расчетах пространственных железобетонных конструкций. - Одесса: ОНМУ, 2009, 93с.
4. Пособие по расчетам GTS NX – електронне видання [Режим доступу: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65>].
5. Ренгач В.Н. Шпунтовые стенки. Расчет и проектирование. Издательство литературы по строительству: Ленинград, 1970, 106с.
6. Стальные шпунтовые сваи. Общий каталог 2018. – ArcelorMittal, 2018. – 64. [Режим доступу: [https://sheetpiling.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2017/10/AMCRPS\\_General\\_Catalogue\\_GB\\_2019\\_web.pdf](https://sheetpiling.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2017/10/AMCRPS_General_Catalogue_GB_2019_web.pdf)]
7. AutoCad files. The full range of ArcelorMittal's steel sheet piles 2019 [Режим доступу: <https://sheetpiling.arcelormittal.com/download-center/autocad-files/>]
8. Fedorovsky V.G., Kolesnikov Yu. M, Kurillo S.V., Levachev S.N. Piles in Hydrotechnical Engineering. - CRC Press, 2002. – 264р.
9. Zienkiewicz O. C. The finite element method. – Megrow-Hill Book Company (UK) Limited, 1986. – 787 p.

## References

1. Vorozhtsov Ye. V. Raznostnyye metody resheniya zadach mekhaniki sploshnykh sred: Ucheb. posobiye. – Izdatel'stvo NGTU – Novosibirsk, 1998. – 86s.
2. DBN V.2.1-10-2009 Osnovi ta fundamenti sporud. M.: Minregionbud Ukraїni, 2009
3. Klovanich, S. F., Bezushko D.I. Metod konechnykh elementov v nelineynykh raschetakh prostranstvennykh zhelezobonnykh konstruktsiy. - Odessa: ONMU, 2009, 93s.
4. Calculation Guide GTS NX - Electronic View [Access Mode: <http://ru.midasuser.com/web/page.php?no=65>].
5. Rengach V.N. Shpuntovyye stenki. Raschet i proyektirovaniye. Izdatel'stvo literatury po stroitel'stvu: Leningrad, 1970, 106s.
6. Steel sheet piles. General catalog 2018. - ArcelorMittal, 2018. - 64. [Access mode: [https://sheetpiling.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2017/10/AMCRPS\\_General\\_Catalogue\\_GB\\_2019\\_web.pdf](https://sheetpiling.arcelormittal.com/wp-content/uploads/2017/10/AMCRPS_General_Catalogue_GB_2019_web.pdf)].
7. AutoCad files. The full range of ArcelorMittal's steel sheet piles 2019 [Режим доступу: <https://sheetpiling.arcelormittal.com/download-center/autocad-files/>]
8. Fedorovsky V.G., Kolesnikov Yu. M, Kurillo S.V., Levachev S.N. Piles in Hydrotechnical Engineering. - CRC Press, 2002. – 264p.
9. Zienkiewicz O. C. The finite element method. – Megrow-Hill Book Company (UK) Limited, 1986. – 787 p.

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ШПУНТОВ ДЛЯ РАСЧЕТОВ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ТОНКИХ СТЕНОК В 2D ПОСТАНОВКЕ

**Безушко Д.И.**, к.т.н., доцент,  
[dibezushko@gmail.com](mailto:dibezushko@gmail.com) ORCID 0000-0003-2215-1136

*Одесский национальный морской университет*

**Арсирый Е.И.**, ст. преподаватель,  
[elena.arsiriy@gmail.com](mailto:elena.arsiriy@gmail.com) ORCID 0000-0001-8660-6916

*Одесский национальный морской университет*

**Гльичев В.Г.**, к. архитектуры,  
[chigi1960@gmail.com](mailto:chigi1960@gmail.com)

*Одесский национальный морской университет*

**Аннотация.** Одной из наиболее распространенных конструктивных схем, используемых при строительстве и реконструкции причалов - есть тонкие стенки (больверк). Эта система состоит из лицевой стенки и анкерной системе, в которую входят тяж и анкерная стенка (или другой вид анкерующей устройства). Возможны некоторые вариации конструктивной схемы, но в каждой из них входит лицевая стенка с шпунта. В работе приведены варианты определения геометрических характеристик сечений шпунта для использования в расчетах плоской деформации (плоская расчетная модель). В стандартных сортамент шпунта приведены лишь общие геометрические характеристики сечения такие, как площадь, момент инерции, момент сопротивления, радиус инерции, но этого мало для использования в расчетах методом конечных элементов. Сложная форма поперечного сечения шпунта (зетовый, корытного, прямого, комбинированного и других видов сечения) приводит к разногласиям в определенные геометрических характеристик и их интерпретации в плоской и пространственной постановке определения напряженно-деформированного состояния. В работе приведена методика определения геометрических характеристик сечения для стержню, что сгибается для плоской расчетной модели. Для расчетов методом конечных элементов используется проигран комплекс для геотехнических расчетов Midas GTS NX. Использование метода конечных элементе при определении геометрических характеристик поперечного сечения шпунта дает относительную погрешность до 5% по отношению к

данным приведенных в сортаменте. Что э приемлемым для использования в дальнейших расчетах причальных конструкций. В работе рассмотрены два варианта для одного метра погонного стенки: в 1 м входит 1 шпунт полностью 600 мм и второй частично 400 мм; в 1 м входят оба шпунты по 500 мм. Наименьшее значение момента инерции получено для первого варианта 72511 см<sup>4</sup>, что совпадает со значением с сортамента на -0.26%. А для второго варианта момент инерции больше на 12%. Поэтому при расчетах следует принимать наиболее невыгодный вариант.

**Ключевые слова:** тонкая стенка, больверк, причал, метод конечных элементов, геометрические характеристики сечений.

## DETERMINATION OF GEOMETRIC CHARACTERISTICS OF WINGS FOR CALCULATIONS OF THIN WALL DEFORMATION IN 2D PRODUCTION

**Bezushko D.**, Ph.D., Assistant Professor

[dibezushko@gmail.com](mailto:dibezushko@gmail.com) ORCID 0000-0003-2215-1136

*Odessa National Maritime University*

**Arsirii E.**, Senior lecturer

[elena.arsiriy@gmail.com](mailto:elena.arsiriy@gmail.com) ORCID 0000-0001-8660-6916

*Odessa National Maritime University*

**Illichov V.**, Ph.D.,

[chigi1960@gmail.com](mailto:chigi1960@gmail.com)

*Odessa National Maritime University*

**Abstract.** One of the most common structural schemes used in the construction and reconstruction of berths - is a thin wall (bolverk). This system consists of a front wall and an anchor system, which includes a string and an anchor wall (or other type of anchoring device). There are some variations of the design scheme, but each of them includes a front wall of sheet piling. The paper presents options for determining the geometric characteristics of sheet piles for use in the calculations of flat deformation (flat design model). In the standard assortments of sheet piling, only the general geometrical characteristics of the section such as area, moment of inertia, moment of resistance, radius of inertia are given, but this is not enough for use in finite element calculations. The complex shape of the cross-section of the sheet pile (zeta, trough, straight, combined and other types of cross-section) leads to differences in the definition of geometric characteristics and their interpretation in the flat and spatial formulation of the stress-strain state. The paper presents a method for determining the geometric characteristics of the cross section for a bending rod for a flat design model. For finite element calculations, the lost complex for geotechnical calculations Midas GTS NX is used. The use of the finite element method in determining the geometric characteristics of the cross section of the sheet pile gives a relative error of up to 5% relative to the data given in the range. What is acceptable for use in further calculations of berth structures. The paper considers two options for one meter of the running wall: 1 m includes 1 tongue completely 600 mm and the second partially 400 mm; in 1 m both sheet piles on 500 mm enter. The lowest value of the moment of inertia was obtained for the first variant 72511 cm<sup>4</sup>, which coincides with the value from the range by -0.26%. And for the second option, the moment of inertia is more than 12%. Therefore, the calculations should take the most unfavorable option.

**Keywords:** thin wall, bollard, berth, finite element method, geometric characteristics of sections.