

## ТРАНСПОРТ

УДК 378, 517.3

**Завальнюк І.П.**

Херсонська державна морська академія

**Нестеренко В.Б.**

Херсонська державна морська академія

**Завальнюк О.П.**

Херсонська державна морська академія

### АНАЛІЗ ВИКОРИСТОВУВАНИХ МЕТОДІВ НАБЛИЖЕНИХ РОЗРАХУНКІВ ПІД ЧАС ФОРМУВАННЯ СФЕРИ КОМПЕТЕНТНОСТІ СУДНОВОДІЯ

*У статті висвітлено основну проблему побудови дисципліни «Теорія та будова судна» з погляду прикладного характеру та відповідності сучасним світовим тенденціям неперервного професійного розвитку морського фахівця. У зв'язку із цим взято за приклад та проведено аналіз використовуваних методів наближених розрахунків під час формування сфери компетентності судноводія. Акцентовано увагу на єдиному практичному стрижні побудови зазначеної дисципліни – вантажному плані судна, який у майбутній професійній діяльності виконуватиметься судноводієм. Приділено значну увагу порівнянню двох методів – трапеції та Сімпсона – за такими критеріями, як швидкість, зручність, точність, зрозумілість і доступність для курсантів. Для оцінювання точності розрахунків за порівнювальними методами розглянуто обчислення площі криволінійної фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, побудованої під час складання вантажного плану для реального суховантажного судна. Опрацювання експериментальних даних проведено у програмі Mathcad.*

**Ключові слова:** наближені розрахунки, компетентність, судноводій, статика судна, остійність, діаграма статичної остійності.

**Постановка проблеми.** Компетентнісний підхід до підготовки фахівців морської галузі, зокрема судноводіїв, уже декілька років є провідним напрямом у навчальному процесі Херсонської державної морської академії.

Бакалавр судноводіння – це фахівець, який, згідно з вимогами Міжнародної конвенції ПДНВ [1], здатний виконувати низку важливих функцій, серед яких слід відзначити: планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення та розвантаження вантажів, а також поводження з ними під час рейсу; управління операціями судна та піклування про людей на судні на рівні експлуатації та управління, включаючи вирішення завдань, які виникають під час аварійних ситуацій, пов'язаних з остійністю та міцністю судна.

В освітній програмі підготовки судноводія передбачений класичний навчальний курс «Теорія та будова судна», який є базовим і покликаний забезпечити судноводія знаннями, вміннями

і навичками контролювати остійність та міцність судна під час його експлуатації, забезпечуючи плавання судна в різних умовах.

Відповідно до [2], «компетентність – динамічна комбінація знань, умінь і практичних навичок, способів мислення, професійних, світоглядних і громадянських якостей, морально-етичних цінностей, яка визначає здатність особи успішно здійснювати професійну та подальшу навчальну діяльність і є результатом навчання на певному рівні вищої освіти». Спеціальні (фахові, предметні) компетентності, згідно з [3], – це «компетентності, що залежать від предметної сфери та є важливими для успішної професійної діяльності за певною спеціальністю».

До сфер компетентності судноводія, відповідно до [1; 4–5], слід віднести «планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення і розвантаження вантажів, а також поводження з ними під час рейсу» та «контроль над посадкою, остійністю і напруженнями в корпусі» (2.1 Plan and ensure safe loading, stowage, securing, care during

voyage and unloading of cargoes. 3.1 Control trim, stability and stress).

Таким чином, загальною оцінкою підготовки фахівця морської галузі стає компетентність, яку курсант має продемонструвати після закінчення зазначеного вищенавчального курсу. Спеціальними компетентностями, які опановуються у дисципліні «Теорія та будова судна», є:

- планування й забезпечення завантаження, розміщення, кріплення і розвантаження вантажів, а також збереження їх під час рейсу;
- оцінка виявлених дефектів і пошкоджень у вантажних приміщеннях, на люкових кришках і в баластних танках та прийняття відповідних рішень;
- контроль над посадкою, остійністю і напруженнями в корпусі судна;
- нагляд за завантаженням, розміщенням, кріпленням і розвантаженням вантажів, а також збереження їх під час рейсу;
- перевірка і повідомлення про дефекти та ушкодження вантажних приміщень, люкових закриттів і баластних танків;
- підтримання судна у морехідному стані.

Зважаючи на даний перелік спеціальних компетентностей судноводія, досить актуальною для викладача спеціального морського навчального закладу є проблема побудови дисципліни «Теорія та будова судна» так, щоб курс носив більше прикладний характер, аніж теоретичний, відповідав світовим тенденціям неперервного професійного розвитку морського фахівця, а саме Continuing Professional Development (CPD) [6], та мав єдиний практичний і прикладний стрижень побудови, яким у даному разі виступає вантажний план судна.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Підготовка бакалаврів із галузі знань 27 «Транспорт» спеціальності 271 «Річковий та морський транспорт» спеціалізації «Судноводіння» з дисципліни «Теорія та будова судна» тісно пов'язана з проведенням розрахунків зі статички судна щодо визначення площ, обмежених кривими лініями, – перетинів корпусу судна, областей, лімітованих кривою діаграми статичної остійності, а також об'ємів, обмежених криволінійними поверхнями, – об'ємної водотоннажності, об'ємів, занурених у воду, тощо.

Ще в минулому столітті класичний курс теорії та будови судна зазвичай ґрунтувався на фундаментальних працях відомих морських фахівців, таких як А.М. Крилов, В.Г. Сизов, Б.В. Бекенський, О.І. Максимаджи та ін. Курсанти спеціальних морських навчальних закладів отримували добру ґрунтовну підготовку, але здебільшого наявні теоретичні знання застосовувалися ними на практиці невпевнено, з труднощами.

Так, автори типових спеціалізованих навчальних посібників рекомендують для виконання даних розрахунків застосовувати такі методи наближеного

інтегрування, як правила трапецій та Чебишева [7–9]. Однак у закордонній практиці, крім вищезгаданих методів, пропонується використання таких правил чисельного інтегрування, як правила Сімпсона [10].

**Постановка завдання.** Власний викладацький досвід свідчить про недостатній рівень математичної підготовки сучасних курсантів, тому метою статті є порівняльний аналіз двох розповсюджених методів наближених розрахунків – трапецій та Сімпсона – за такими критеріями, як швидкість, зручність, точність, зрозумілість і доступність для курсантів морських навчальних закладів під час формування сфери компетентності судноводія.

**Виклад основного матеріалу дослідження.** Сутність висунутих критеріїв порівняння двох методів полягає у такому:

- «зручність», яку можна оцінити за простотою та легкістю використання методу;
- «швидкість», що оцінюється за кількістю розрахункових ітерацій під час застосування того чи іншого методу;
- «точність», яку можна оцінити за відотною похибкою між значеннями площі, обчисленої за інтегрування функції, отриманої шляхом інтерполяції ступеневим поліномом  $n$ -го порядку та площі розрахованої наближеним інтегруванням за розглядуваним методом.

Далі доцільно навести коротку характеристику аналізованих методів. Отже, розглянемо область  $A$ , обмежену кривою  $y = f(x)$  і віссю  $x$  на ділянці  $[a, b]$  довжиною  $L$ , площу якої можна представити визначним інтегралом  $S_A = \int_a^b f(x) dx$ . Оскільки аналітичний вираз кривої  $y = f(x)$  невідомий, тому необхідно застосувати наближені методи розрахунків.

За методом трапецій (рис. 1) довжина  $L$  розбивається на  $n$  рівних часток і з точок ділення встановлюються перпендикуляри – ординати, довжина яких  $y_0, y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$ . Довжина отриманої одиничної ділянки  $h = L/n$ .

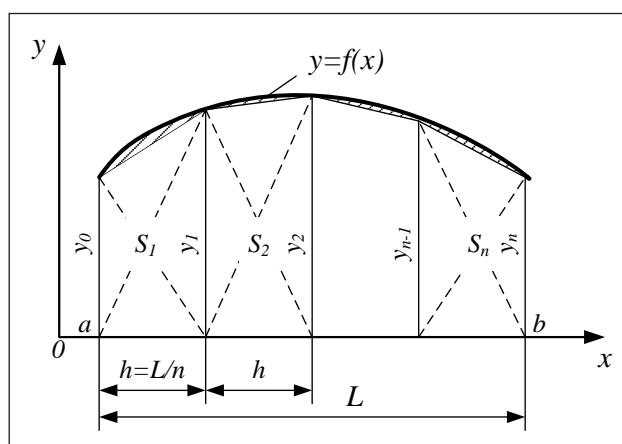


Рис. 1. Графічне представлення ординат під час визначення площі криволінійної фігури за правилом трапецій

Площа фігури, таким чином, розбилася на площини, обмежені з боків ординатами, знизу – відрізком  $h$ , а зверху – ділянкою кривої, яку з достатнім ступенем точності можна замінити прямою лінією, що перетворює площини на трапеції [7–9]. Тому площа всієї фігури  $A$  дорівнює сумі площ окремих трапецій  $s_i$ :

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \sum_{i=1}^n s_i = s_1 + s_2 + \dots + s_{n-1} + s_n = h \cdot \left( y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n - \frac{y_0 + y_n}{2} \right) = h \cdot \left( \sum_{i=0}^n y_i - \varepsilon \right) \quad (1)$$

де

$$s_1 = \frac{y_0 + y_1}{2} \cdot h, \quad s_2 = \frac{y_1 + y_2}{2} \cdot h, \dots, \quad s_n = \frac{y_{n-1} + y_n}{2} \cdot h$$

– площі отриманих трапецій;

$$\sum_{i=0}^n y_i = y_0 + y_1 + y_2 + \dots + y_{n-1} + y_n \text{ – сума ординат;}$$

$$\varepsilon = \frac{y_0 + y_n}{2} \text{ – поправка.}$$

Правила Сімпсона [7; 10] базуються на заміні кривої  $f(x)$  параболою  $k$ -ступеня. У статті судна знайшли застосування два правила Сімпсона (рис. 2). Перше правило полягає у використанні параболи другого ступеня і розділенні ділянки інтегрування на парну кількість рівних інтервалів  $h$ . Розрахункова формула для обчислення площі криволінійної фігури має вигляд:

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \frac{1}{3} \cdot h \cdot [f(x_0) + 4 \cdot f(x_1) + 2 \cdot f(x_2) + \dots + 2 \cdot f(x_{n-2}) + 4 \cdot f(x_{n-1}) + f(x_n)] = \frac{1}{3} \cdot h \cdot \Sigma_1, \quad (2)$$

де  $\Sigma_1$  – сума добутоків множників Сімпсона (SM1) на відповідні ординати  $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$ ; SM1 = (1, 4, 2, ..., 2, 4, 1).

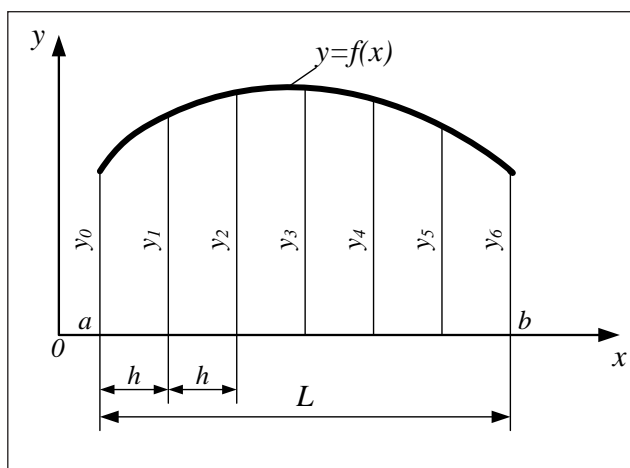


Рис. 2. Графічне представлення даних під час визначення площі криволінійної фігури за правилами Сімпсона (за  $n = 6$ )

$$S_A = \frac{h}{3} \cdot [y_0 + 4 \cdot y_1 + 2 \cdot y_2 + 4 \cdot y_3 + 2 \cdot y_4 + 4 \cdot y_5 + y_6]$$

(за першим правилом Сімпсона)

або

$$S_A = \frac{3}{8} \cdot h \cdot [y_0 + 3 \cdot y_1 + 3 \cdot y_2 + 2 \cdot y_3 + 3 \cdot y_4 + 3 \cdot y_5 + y_6]$$

(за другим правилом Сімпсона)

Друге правило основане на використанні параболи третього ступеня і розділенні ділянки інтегрування на число  $n$ , кратне 3:

$$S_A = \int_a^b f(x)dx \approx \frac{3}{8} \cdot h \cdot [f(x_0) + 3 \cdot f(x_1) + 3 \cdot f(x_2) + 2 \cdot f(x_3) + \dots + 3 \cdot f(x_{n-2}) + 3 \cdot f(x_{n-1}) + f(x_n)] = \frac{3}{8} \cdot h \cdot [y_0 + 3 \cdot y_1 + 3 \cdot y_2 + 2 \cdot y_3 + \dots + 3 \cdot y_{n-2} + 3 \cdot y_{n-1} + y_n] = \frac{3}{8} \cdot h \cdot \Sigma_2, \quad (3)$$

де  $\Sigma_2$  – сума добутоків множників Сімпсона (SM<sub>2</sub>) на відповідні ординати  $y_1, y_2, \dots, y_{n-1}, y_n$ ; SM<sub>2</sub> = (1, 3, 3, 2, ..., 3, 3, 1).

Отже, порівняння методів за зручністю використання вказує, що застосування методу трапецій потребує уявного розділення криволінійної фігури на певну кількість трапецій і знаходження площі кожної з них. За правилами Сімпсона на противагу правилу трапецій необхідно лише розділення інтервалу інтегрування на парну кількість ділянок (або кратне 3). Тому за критерієм зручності перевагу мають правила Сімпсона.

Що стосується швидкості виконання розрахунків, то, розглянувши приклад поділення  $L$  на  $n = 6$  рівних часток, можна зробити такі висновки. Під час обчислення площі  $S_A$  методом трапецій необхідно здійснити 23 розрахункові ітерації, а саме знайти площі шести трапецій (на визначення кожної припадає три ітерації) та виконати п'ять операцій додавання. Однак під час знаходження площі  $S_A$ , наприклад за першим правилом Сімпсона за тих же умов ( $n = 6$ ), необхідно виконати лише 13 розрахункових ітерацій – провести помноження ординат на певні множники Сімпсона і підсумувати їх (11 ітерацій), а потім помножити знайдену суму на довжину інтервалу  $h$ , розділене на 3 (дві ітерації). Таким чином, виконання розрахунків із застосуванням правил Сімпсона потребує меншої кількості часу.

Для оцінювання точності розрахунків за порівнювальними методами доцільно розглянути обчислення площі криволінійної фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, побудованої під час складання вантажного плану для суховантажу ARMONIA (табл. 1) в умовах переходу Бейрут – Бердянськ із вантажем бавовни в кипах ( $m = 4535$  т).

ARMONIA (номер IMO – 9134804) – багатопільове судно [11], яке призначене для перевезення широкого спектру вантажів, а саме: дерева, контейнерів, будівельних матеріалів, важких і навалювальних вантажів тощо. Розглядуваний суховантаж має дедвейт за літньою вантажною

маркою 20 101 т та основні розміри 149×23,1 м (length overall × breadth extreme). Різні умови експлуатації даного типу судна визначають його складну для побудови конструкцію. Конструкцією судна передбачаються потужні крани, які можуть використовуватися одночасно, що дає можливість перевозити вантажі в ті порти, де портові крани відсутні.

Розрахунки площі проводяться для перевірки остійності судна за критеріями остійності ІМО. Дані для побудови діаграми статичної остійності зведено в табл. 1.

Відомо, що для повного визначення стану остійності судна будують криву – діаграму статичної остійності, що виражає залежність плечей статичної остійності від кута крену судна [7–9]. Дана діаграма, побудована для досліджуваного судна ARMONIA, має вигляд кривої з яскраво вираженим максимумом та представлена на рис. 3.

Опрацювання експериментальних даних проводилося в програмі Mathcad. Використання функції інтерполяції та проведення апроксимації ступеневим поліномом 5-го порядку дало змогу отримати регресійну залежність плеча відновлювального моменту від кута крену:

$$GZ(\theta) = 5.585 \cdot \theta^5 - 7.876 \cdot \theta^4 - 4.064 \cdot \theta^3 + 6.035 \cdot \theta^2 + 1.53 \cdot \theta + 8.225 \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

Коефіцієнт кореляції становить 0,999.

Точність знаходження площі, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, може бути встановлена шляхом порівняння чисельних значень, отриманих під час інтегрування функції  $GZ(\theta)$  та обчислення з використанням правил трапецій та Сімпсона. Результати розрахунків зведено в табл. 2.

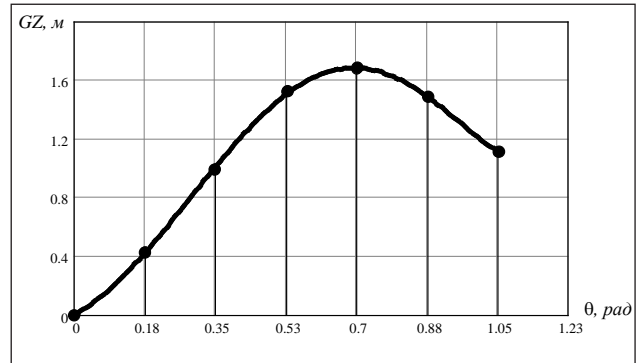


Рис. 3. Діаграма статичної остійності судна ARMONIA, рейс Бейрут – Бердянськ, вантаж – бавовна в кипах

Таблиця 1

Розрахунок плечей статичної та динамічної остійності на відхід

	$\theta, ^\circ$	$0^\circ$	$10^\circ$	$20^\circ$	$30^\circ$	$40^\circ$	$50^\circ$	$60^\circ$
	$\theta, \text{рад}$	0	0.175	0.35	0.525	0.7	0.875	1.05
$\sin\theta$		0	0.17	0.34	0.5	0.64	0.77	0.87
$KG \times \sin\theta$		0	1.5	3.00	4.42	5.66	6.81	7.69
KN		0	1.93	4.00	5.90	7.33	8.3	8.80
$GZ = KN - KG \times \sin\theta$		0	0.43	1.00	1.52	1.67	1.49	1.11
Інтегральна сума		0	0.43	1.86	4.38	7.57	10.73	13.33
Плеche динамічної остійності		0	0.036	0.16	0.37	0.64	0.91	1.13

Примітка:  $\theta$  – кут крену;  $GZ$  – плече відновлювального моменту (або плече статичної остійності), м;  $KN$  – плече форми, м;  $KG \times \sin\theta$  – плече ваги, м;  $KG$  – підвищення центру ваги судна над основною площиною, м.

Таблиця 2

Результати порівняльного аналізу точності методів наближених розрахунків

	Інтегрування функції $GZ(\theta)$	Правила трапецій	Правила Сімпсона
Площа криволінійної фігури за $0^\circ \leq \theta \leq 60^\circ$	$S_{icm} = \int_0^{1.05} GZ(\theta)d\theta = 1.175$	$S_1 = 1.166$	$S_2 = 1.179$
Абсолютна похибка	–	$\Delta_1 =  S_1 - S_{icm}  \approx 9 \times 10^{-3}$	$\Delta_2 =  S_2 - S_{icm}  \approx 4 \times 10^{-3}$
Відносна похибка	–	$\delta_1 = \left(\frac{\Delta_1}{S_{icm}}\right) \cdot 100 = 0.741\%$	$\delta_2 = \left(\frac{\Delta_2}{S_{icm}}\right) \cdot 100 = 0.326\%$

Примітка: за істинне прийнято значення площі, розрахованої інтегруванням  $GZ(\theta)$ .

Використання правил Сімпсона для визначення площі криволінійної фігури забезпечує більшу точність, аніж правила трапецій, за рівної кількості ординат. У цілому правила Сімпсона під час формування змісту й викладання дисципліни «Теорія та будова судна» можуть бути застосовані для знаходження площ і об'ємів, обмежених відповідно кривими лініями та криволінійними поверхнями, а саме: визначення площ ватерліній та положення центру флотації; розрахунку піднесення центру величини над основною площиною; визначення водотоннажності судна для будь-якого осідання судна; визначення площі фігури, обмеженої кривою діаграми статичної остійності, для встановлення остійності судна за критеріями ІМО та побудови діаграми динамічної остійності.

**Висновки.** Отримані результати виконаного авторами дослідження повністю розкривають його мету. Так, проведений порівняльний аналіз двох найрозповсюджених методів наближених розрахунків – трапецій та Сімпсона – вказує, що за висунутими критеріями оцінювання правила

Сімпсона є більш простими та зрозумілими для засвоєння курсантами. Крім того, вони є вдвічі точнішими за правила трапецій.

Однозначно під час опанування курсантами дисципліни «Теорія та будова судна» та надалі у морській практиці слід застосовувати як метод наближених розрахунків саме правила Сімпсона, які значно заощаджуватимуть час.

Авторами статті на прикладі вибору оптимального методу наближених розрахунків показано, що під час формування сфери компетентності судноводія у навчальному процесі, а також розв'язання ним типової задачі – складання вантажного плану судна – побудова дисципліни «Теорія та будова судна» має носити виключно прикладний характер. Тобто курсанти мають чітко розуміти й уміти легко та з упевненістю застосовувати отримані теоретичні знання в майбутній професійній діяльності, тому в подальшому авторами вибрано як пріоритетні дослідження у сфері застосування математичних методів обчислення та інформаційних технологій для розв'язання фахових задач судноводія.

#### Список літератури:

1. International Convention on Standards of Training, Certification and Watchkeeping for Seafarers / IMO. London : Ashford Press, 2011. 450 p.
2. Про вищу освіту : Закон України від 1 липня 2014 р. № 1556-VII. URL: <http://zakon.rada.gov.ua> (дата звернення: 27.03.2019).
3. Балуба І., Бахрушин В., Бойко Г. Методичні рекомендації щодо розроблення стандартів вищої освіти. Київ : МОН України, 2016. 29 с.
4. Model Course 7.01 Master and Chief Mate / IMO. London : Ashford Press, 2014. 352 p.
5. Model Course 7.03 Officer in charge of a navigational watch / IMO. London : Ashford Press, 2014. 274 p.
6. Continuing Professional Development (CPD). London, 2019. URL: <http://www.nautinst.org> (дата звернення: 27.03.2019).
7. Справочник по теории корабля : в 3-х т. / под ред. Я.И. Войткунского. Ленинград : Судостроение, 1985. Т. 2. 440 с.
8. Горячев А.М., Подругин Е.М. Устройство и основы теории морских судов. Ленинград : Судостроение, 1971. 326 с.
9. Дорогостайский Д.В., Жученко М.М., Мальцев Н.Я. Теория и устройство судна. Ленинград : Судостроение, 1976. 413 с.
10. Derrett D.R. Ship Stability for Masters and Mates. Oxford : Elsevier Butterworth-Heinemann, 2006. 534 p.
11. ARMONIA. Vessel Particulars. London, 2019. URL: <https://www.marinetraffic.com/en/ais/details/ships/shipid:753835/mmsi:636013060/vessel:ARMONIA> (дата звернення: 27.03.2019).

#### АНАЛИЗ ПРИМЕНЯЕМЫХ МЕТОДОВ ПРИБЛИЖЕННЫХ РАСЧЕТОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ СФЕРЫ КОМПЕТЕНТНОСТИ СУДОВОДИТЕЛЯ

*В статье освещена основная проблема построения дисциплины «Теория и устройство судна» с точки зрения прикладного характера и соответствия современным мировым тенденциям непрерывного профессионального развития морского специалиста. В связи с этим в качестве примера проведен анализ используемых методов приближенных расчетов при формировании сферы компетентности судоводителя. Акцентируется внимание на единственном практическом стержне построения указанной дисциплины – грузовом плане судна, который в будущей профессиональной деятельности будет выполняться судоводителем. Уделено значительное внимание сравнению двух методов приближенных расчетов – трапеций и Симпсона – по таким критериям, как скорость, удобство, точность, ясность и доступность для курсантов. Для оценки точности расчетов по сравнительным*

методам рассмотрены вычисления площади криволинейной фигуры, ограниченной кривой диаграммы статической остойчивости, построенной при составлении грузового плана для реального сухогруза. Обработка экспериментальных данных выполнена в программе Mathcad.

**Ключевые слова:** приближенные расчеты, компетентность, судоводитель, статика судна, остойчивость, диаграмма статической остойчивости.

#### **THE APPLICABLE METHODS OF APPROXIMATE CALCULATIONS ANALYSIS FOR THE SPHERE NAVIGATOR COMPETENCE FORMATION**

*The article highlights the basic problem of constructing discipline «Ship's theory and design» in terms of the nature of the application and compliance with modern world trends of continuous professional development of marine specialist. In this regard, an example was taken and an analysis of the methods used for approximate calculations in the formation of the navigator's competence was carried out. The attention is focused on the unique practical basis for the construction of the specified discipline – the ship's cargo plan, which in the future professional activity will be made by the navigator. In the article considerable attention is paid to the comparison of the two methods – trapezes and Simpson according to criteria such as speed, convenience, accuracy, clarity and accessibility for cadets. For estimating the accuracy of calculations by comparative methods, the calculation of the area of the curvilinear figure, limited by the curve of the static stability diagram, constructed during the making of the cargo plan for the real dry cargo ship was considered. Experimental data processing was done in the Mathcad program.*

**Key words:** approximate calculations, competence, navigator, ship's static, stability, static stability diagram.