

УДК 629.5.022.25  
К 64

DOI: 10.31653/2306-5761.29.219.97-105

## MATHEMATICAL MODEL OF THE MOTION OF COAST GUARD SWATH TYPE

## МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ХИТАВИЦІ КОРАБЛЯ БЕРЕГОВОЇ ОХОРОНИ ТИПУ SWATH

**L. Y. Kondratieva.** *graduate, research assistant*

**Л. Ю. Кондратьєва,** *аспірант, м. н. с.*

*Admiral Makarov National University of Shipbuilding, Mykolayiv*  
*Національний університет кораблебудування, м. Миколаїв*

### ABSTRACT

A lot of modern software are used the following methods for the seakeeping of ships calculations: the panel method and the flat sections method. Such calculations are playing an important role for the normal functioning of the designed vessel. For vessels with an atypical contours, panel method is using rather because it shows quite accurate results, but this calculation is carried out for a ship without a speed. But, for the ship motion calculation with speed is more often used Lewis approximation, but in case of small waterline area vessels do not give accurate results, this problem leads to high errors in the final calculation. Compared with other software systems SW52 allows to calculate the frequency-amplitude characteristics at any speed without losing the quality of calculations like in cases of using Lewis approximation. The results of the amplitude-frequency characteristics calculations using the Maccanyo-Landweber approximation in comparison with the results of experimental investigations of the seakeeping of the SWATH vessel "NAVATEK-1" for rolling, pitching and heaving has been performed in the article.

However, to apply this complex optimization problem, it is necessary to present it as a standalone block, which is called during the search for the optimum of the goal function. Thus, "SW52" makes calculations based on the spectral theory of motion and allows to calculate the standard deviations of the SWATH vessel's oscillations within the framework of the correlation theory. That is, the results are formed and agreed to the modern requirements for the seakeeping of patrol vessels according to such parameters as significant rolling, pitching, slamming, and also horizontal and vertical accelerations. The optimization task, which includes calculations of the seakeeping of vessel not only on the calm water, but also on irregular waves, will significantly improve the quality of the results of engineering work at the conceptual design stage for the SWATH vessel.

**Постановка проблеми** У багатьох сучасних програмних САД системах для розрахунків морехідних якостей судів використовуються наступні методи: панельний метод і метод плоских перетинів. Подібні розрахунки особливо важливі для повноцінного функціонування судна, що проектується. Для суден з

нетиповими обводами використовується панельний метод, який показує досить точні результати, однак даний розрахунок здійснюється для судна без ходу.

В оптимізаційній роботі для суден типу СМПВ важливо враховувати їх морехідні якості як очевидну перевагу.

**Аналіз останніх досягнень та публікацій** В [7] досліджено значення втрати точності розрахунків при апроксимаціях різних ступенів та впливу цих втрат на характеристики хитавиці судна. В [8] описані методи розрахунку хвильових навантажень, що діють на двокорпусні суда з невеликою площею ватерлінії, без зв'язку з процесом оптимізації судна конкретного призначення. На основі [2,4] розроблені моделі функціонування однокорпусного корабля берегової охорони. Втрати швидкості визначені згідно [3]. У книзі [6] наведено граф актуальності апроксимації Льюїса, який доводить його непридатність для кораблів типу СМПВ. Робота [1] дозволяє представити комплексну оцінку судна з невеликою площею ватерлінії для пасажирських перевезень, але не підходить для патрульних кораблів. Опис математичного використання апроксимації шпангоута Льюїса при використанні методу плоских перетинів для розрахунків АЧХ судна на різних швидкісних режимах докладно описаний в [9], однак не має застосовуватися для судів типу СМПВ у зв'язку з результатами дослідження, що зазначені в [7]. Методика, розрахунку хитавиці кораблів типу СМПВ описана в [11], та результати експериментальних досліджень натурального судна опубліковані в [10], що задовільно узгоджуються для порівняння максимальних значень кутів бортової хитавиці, вертикальних прискорень, слемінгу, та інших характеристик морехідних якостей корабля берегової охорони.

**Мета** – удосконалення розрахунків хитавиці суден типу СМПВ.

На сьогоднішній день оптимізація кораблів берегової охорони є надзвичайно актуальною темою. Досвід кафедри Теорії проектування визначає метод імітаційного моделювання виконання основної операції, якою є переслідування та запобігання проникненню судна порушника у територіальні води України), як найбільш надійний. Як метод оптимізації, автором був обраний метод Пауела-Флетчера-Давідона, як найкраще досліджений у сфері кораблебудування та проектування на ранніх стадіях. Процедура імітації патрулювання та процедура погоні судна- порушника описана в [3]. Таким чином визначення ймовірності виявлення судна порушника дорівнює одиниці у зв'язку зі співвідношенням розміру зони патрулювання та радіусу дії сучасних РЛС. Стосовно ж ймовірності того що корабель берегової охорони зможе наздогнати судно-порушник, вона визначається згідно довго стокового режимного розподілу висот хвиль в заданому регіоні, та відповідні кожній ітерації втрати швидкостей, які, власне для СМПВ є значною перевагою.

Основним показником виконання операції є час за який корабель берегової охорони пройде шлях до лінії курсу судна порушника [4]. Якщо  $T_{II} > T_k$  тоді вважається, що КБО наздогнав порушника і в масив, що створюється для побудови гістограмами заноситься значення 1, але якщо  $T_{II} < T_k$ , тоді вноситься значення 0.

$$T_{II} = S_{СП} / v_{СП} = (V_{оз} - \eta_{СН}) / v_{СП} \quad (1)$$

$$T_K = (S_K - L_{O3}) / v_K = (\zeta_K - \zeta_{CH} - Z) / v_K \quad (2)$$

$T_{II}$  – час за який судно порушник досягає лінії патрулювання КБО;

$S_{СП}$ ,  $v_{СП}$  – шлях і швидкість порушника відповідно;

$В_{ОЗ}$  – вертикальний горизонтальний розмір зони патрулювання;

$\eta_{CH}$  – ордината місця знаходження судна порушника;

$\zeta_{CH}$  – абсциса місця знаходження судна порушника;

$S_K$ ,  $v_K$  – шлях і швидкість порушника відповідно;

$L_{O3}$  – горизонтальний розмір зони патрулювання;

$Z$  – радіус дії артилерійської установки (обирає користувач ПЗ, згідно каталогу озброєння);

$\eta_K$  – ордината місця знаходження судна порушника;

$\zeta_K$  – абсциса місця знаходження судна порушника;

Однак, слід враховувати той факт, що патрульний корабель типу СМПВ втрачає швидкість значно менше ніж судно порушник. Використовуючи данні [3]

$$\kappa_{кбо}(\bar{h}_3) = \exp(-a_{\eta_{KM}} \bar{h}_3^2), \quad \bar{h}_3 = \frac{h_3}{\sqrt[3]{V}}, \quad a_{\eta_{KM}} \approx 0,05, \quad (3)$$

Якщо СМПВ рухається на максимально можливій швидкості, незважаючи на можливі штормові попередження.

Однак вимушені втрати швидкості мають велике значення для моделювання основної функціональної задачі в даному випадку – затримання судна порушника. Таким чином у формулі (1,2) з'являється коефіцієнт втрати швидкості

$$T_{II} = S_{II} / v_{II} = (В_{ОЗ} - \eta_{II}) / \kappa_{СП}(\bar{h}_3) v_{II}; \quad (4)$$

$$T_K = (S_K - L_{O3}) / v_K = (\zeta_K - \zeta_{CH} - Z) / (\kappa_{кбо}(\bar{h}_3) v_K) \quad (5)$$

Для судна порушника коефіцієнт втрат швидкостей розраховується згідно [2] як для однокорпусного корабля.

Після формування «першої» точки вектору незалежних змінних починається процес оптимізації, а саме пошуку мінімуму цільової функції в  $n$ -мірному евклідовому просторі. Однак цей простір має бути обмежений функціональними та тривіальними обмеженнями як показано на блок схемі рис.1.

Однак, в процесі концептуального проектування зазвичай не враховуються як обмеження, максимально допустимі значення характеристик хитавиці по найбільш важливим ступеням свободи, та напрямкам руху судна, та кутом бігу хвиль, вертикальні прискорення в найбільш важливих точках корпусу (для функціонування команди та озброєння, та розрахунку природних втрат швидкостей), та вимушені втрати швидкості що пов'язані зі слемінгом такого корабля як СМПВ. У зв'язку зі складністю розрахунків та не типовою формою шпангоута традиційні методи розрахунків не дають якісного результату, що стало на заваді для використання вище перерахованих характеристик у процесі оптимізації. Саме тому на сьогоднішній день патрульні кораблі в Україні не відповідають вимогам НАТО щодо морехідних якостей.

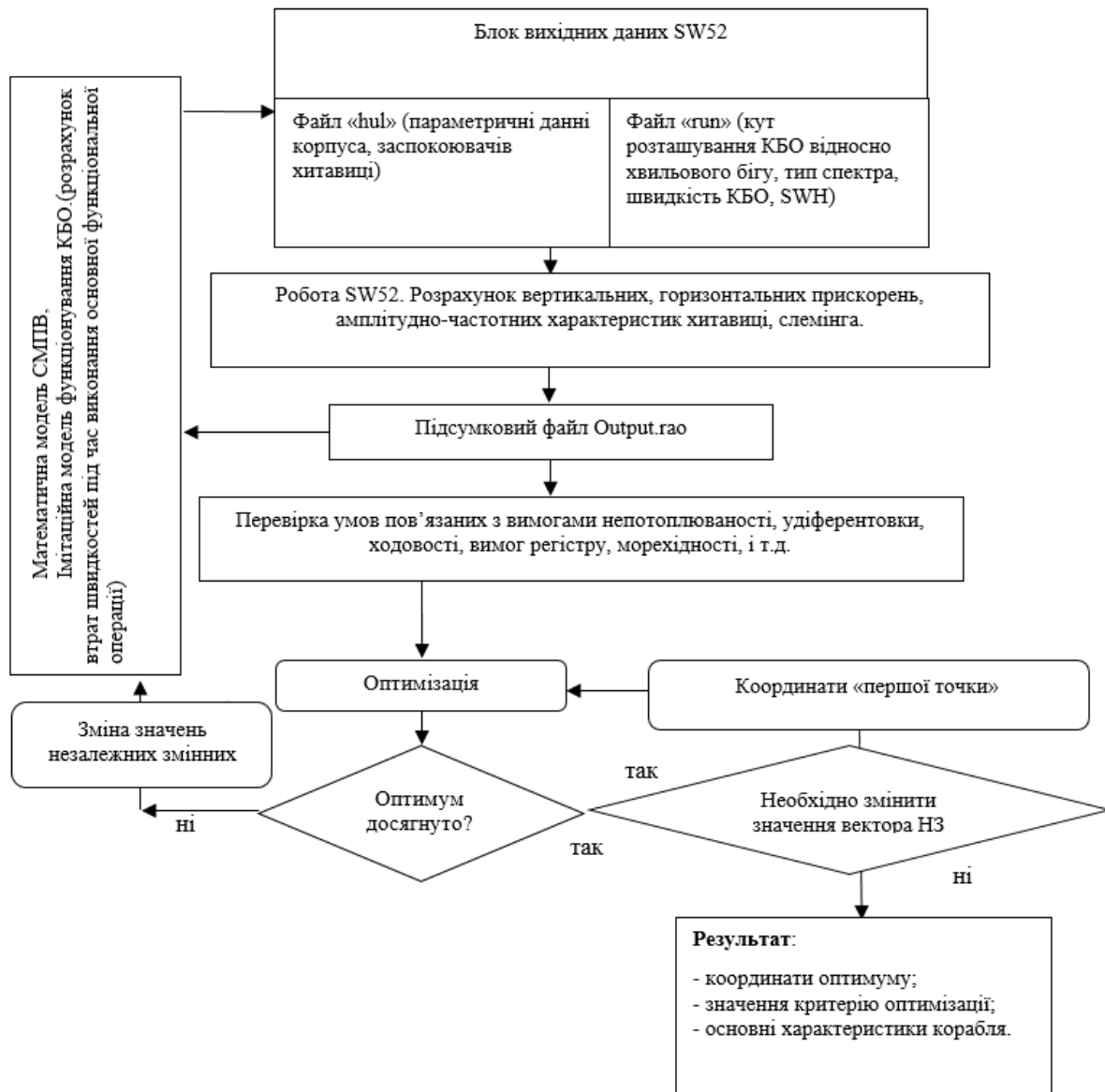


Рис.1 Блок схема роботи програмного комплексу PatrolSWATH

Однак будь-який корабель незалежно від особливостей його шпангоута має бути розглянутий як лінійна система, що перетворює вхідний сигнал у вигляді нерегулярного морського хвилювання на вихідний сигнал (хитавиця корпусу) по кожній зі ступенів свободи, з урахуванням довгострокового розподілу вітро-хвильової обстановки Чорноморського регіону та конкретної зони патрулювання. Незважаючи на велику кількість публікацій з проектування СМПВ, на даний час практично відсутні науково обґрунтовані методи вибору оптимальних головних розмірів патрульних суден типу SWATH, які враховують в процесі оптимального проектування, виконання критеріїв морехідності на основі спектральної, гідродинамічної, стохастичної, енергетичної теорії хитавиці. Такий підхід істотно змінює значення критерію «вартість-ефективність» та вибору максимуму цільової функції, адже кораблі типу СМПВ значно дорожчі у порівнянні зі своїми однокорпусними конкурентами. Однак математична програмна реалізація подібної методики вибору головних розмірів корабля берегової охорони, на сьогоднішній день не

була створена, що обумовлює актуальність дослідження. Критерії морехідності виглядають наступним чином:

Таблиця 1. Вимоги до морехідних якостей кораблів

Бортова хитавиця	$\leq 8^\circ$
Кільова хитавиця	$\leq 3^\circ$
Вертикальні та горизонтальні прискорення у центрі ваги корабля	$\leq 0.4g$
Слемінг	30 уд/год

Удосконалення процесу розрахунку максимальних значень хитавиці, а також вертикальних прискорень у контрольних найбільш важливих точках для функціонування судна, протягом процесу оптимізації згідно вищеперерахованих критеріїв являє собою мету дослідження.

На першому етапі перевірка заявлених переваг здійснювалась за допомогою програмного забезпечення «Bentley», яке дозволяє розраховувати хитавицю за допомогою методу плоских перетинів і за допомогою панельного методу.

Модуль «Motion Design» дозволяє розрахувати характеристики хитавиці з допомогою двох методів: лінійна теорія плоских перетинів і панельний метод [9]. У разі розрахунку для СМПВ актуально використовувати панельний метод, так як він точніше відображає нетипову форму шпангоута, однак працює лише при нульовій швидкості.

Метод плоских перетинів, доступний для розрахунків амплітудно-частотних характеристик судна на ходу використовує, розроблений в 1929 році Ф. Льюїсом метод апроксимації шпангоута. Ним запропонована наступна функція, що реалізує конформне відображення зовнішності одиничного кола в площині комплексної змінної  $\tau$ , на зовнішність контурів, по близьких формі до дубльованим щодо ватерлінії корабельним шпангоутам в площині  $\zeta$ :

$$\zeta = y + iz = i\alpha_0 (\tau + \alpha_1 \tau^{-1} + \alpha_3 \tau^{-3}), \quad (6)$$

тут  $\alpha_0$  і  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  – дійсні постійні, при чому  $\alpha_0$  розраховується через  $\alpha_1$ ,  $\alpha_3$  і дійсну осадку судна  $T$ :

$$\alpha_0 = -\frac{T}{1 + \alpha_1 + \alpha_3}. \quad (7)$$

Таким чином, контур Льюїса визначається коефіцієнтами  $\alpha_1$  і  $\alpha_3$ , які повинні бути виражені через параметри реального шпангоута. Виразимо напівширину шпангоута по ватерлінії  $b/2$  через постійні  $\alpha_1$  і  $\alpha_3$ .

$$\frac{b}{2} = T \frac{1 - \alpha_1 + \alpha_3}{1 + \alpha_1 + \alpha_3} \quad (8)$$

Відповідно, один з параметрів, що визначають контур форми Льюїса, матиме вигляд:

$$\frac{2T}{b} = \frac{1 + \alpha_1 + \alpha_3}{1 - \alpha_1 + \alpha_3} \quad (9)$$

Другий параметр коефіцієнт повноти  $\beta$ :

$$\beta = \frac{\pi (1 - \alpha_1^2 + 3\alpha_3^2)}{4 (1 + \alpha_1^2) - \alpha_1^2} \quad (10)$$

Так як параметрами  $\beta$  і  $2T/b$  повністю визначають ординати контурів форми Льюїса, останні називаються двох параметричними. Очевидно, що реальний шпангоут і апроксимуючий його двох параметричний контур мають однакові коефіцієнти повноти і відносної осадки до на пів ширини, але дещо відрізняються один від одного за формою. Для шпангоутів, що мають традиційні обводи, ця обставина майже не позначається на величині приєднаних мас. Однак для суден типу СМПВ вигляд шпангоутів має колосальні відмінності які можна побачити на мал.2(a).

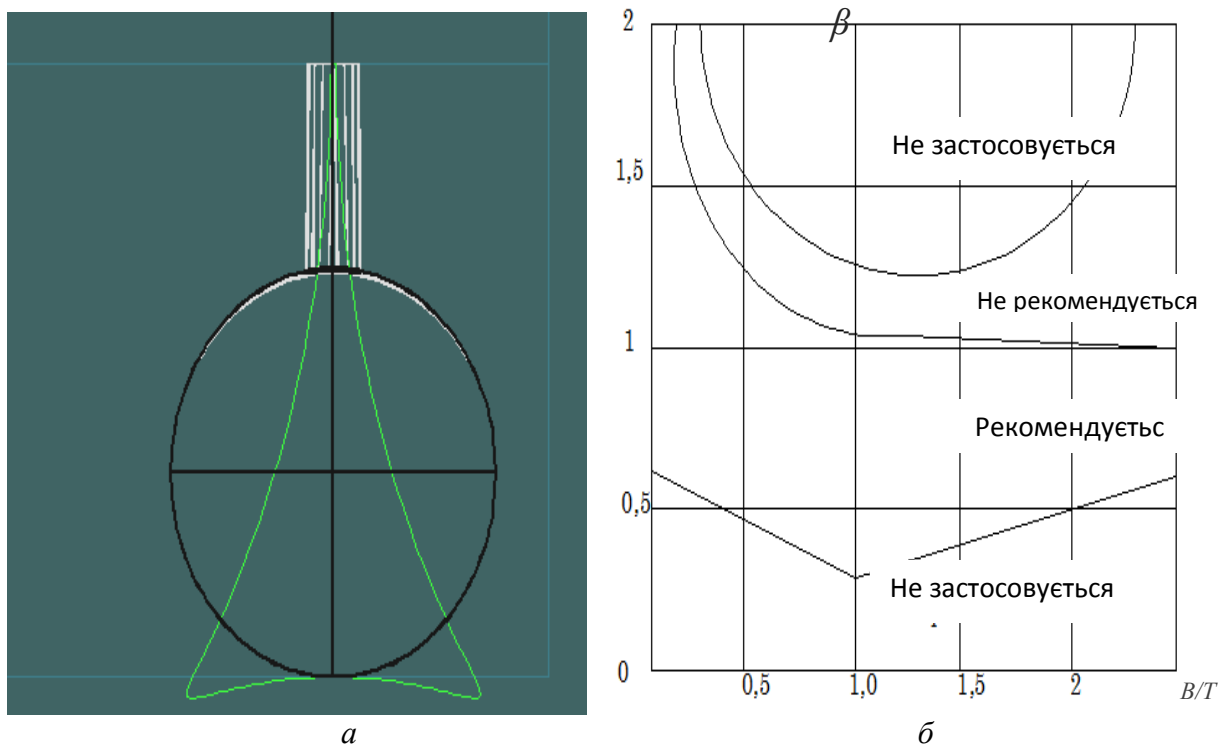


Рисунок 2. а - Результат апроксимації реального шпангоута СМПВ методикою Льюїса; б - Графік рекомендацій по застосуванню апроксимації Льюїса [6].

На сьогоднішній день цю апроксимацію використовує більшість популярних програмних забезпечень, які використовуються при проектуванні суден.

Програма “patrolSWATH” оптимізує розміри корабля берегової охорони з урахуванням розрахунків блоку “SW52” [11], який в свою чергу визначає статистичні коливання судна, викликані рухом судна на постійній швидкості на нерегулярному хвилюванні при будь-якому розташуванні щодо бігу хвиль. Однак в якості шпангоутної апроксимації використовує запропонована Л. Ландвебером та М. Маканьо трьох параметрична апроксимація, в якій аналітичний і реальний шпангоути мають не тільки  $\beta$  і  $2T/b$ , але і статичні моменти відносно ватерлінії.

У процесі руху судна в умовах нерегулярної хитавиці процеси силової та кінематичної реакції судна на хвилі будуть являти собою нерегулярні функції

часу. В блоці SW52 використовується спектральний метод розрахунку ймовірнісних характеристик хитавиці, котрий являє собою продовження лінійної гідродинамічної теорії хитавиці при переході до нерегулярного хвилювання. Спектральний опис морського нерегулярного хвилювання передбачає, що це явище являє собою стаціонарний гаусовський процес, а його головною характеристикою є спектр. Для частотного спектру  $S(\sigma)$  розроблено достатньо велика кількість апроксимуючих формул.

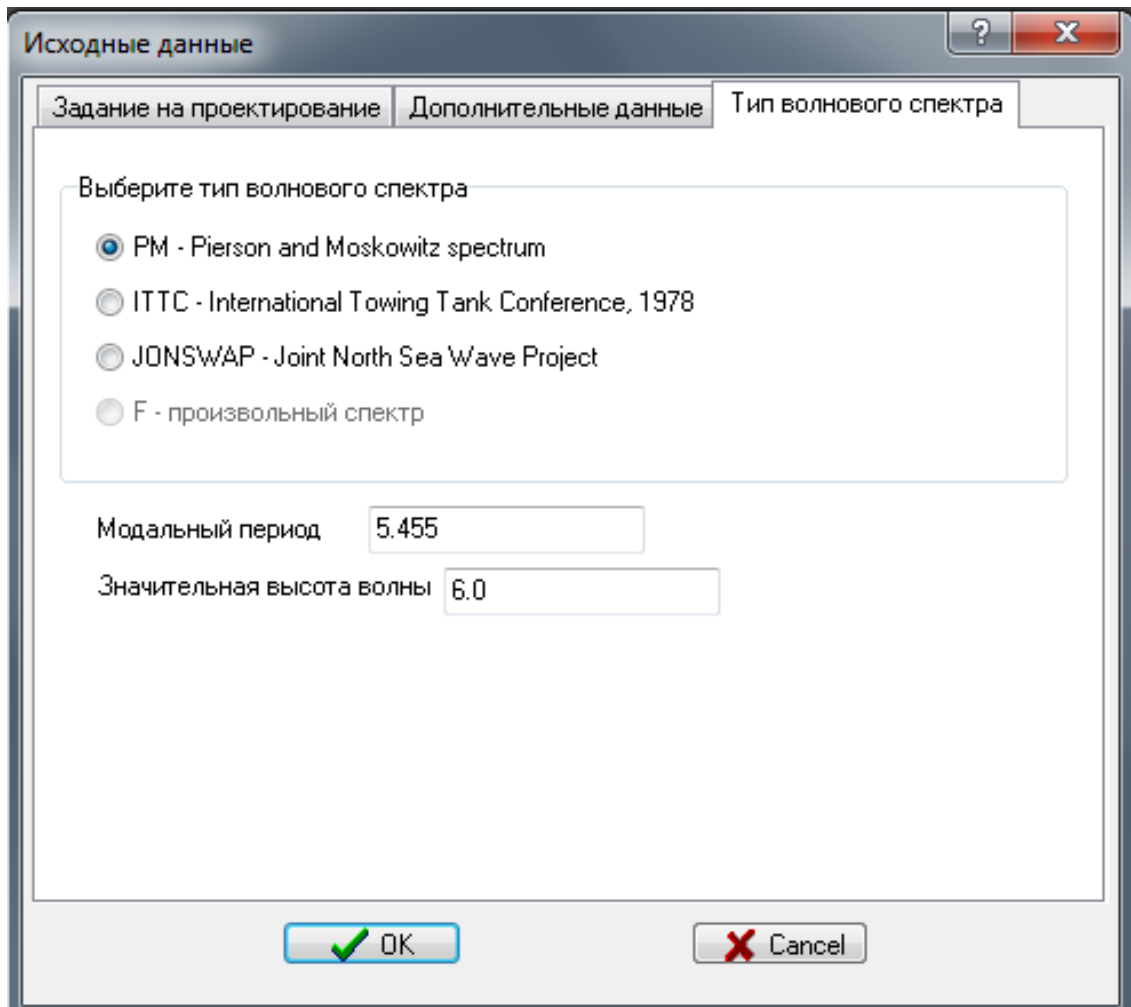


Рисунок 3. Меню вибору спектру для розрахунку характеристик морехідності

У програмі є можливість зміни спектральної апроксимації за зразком програмного комплексу “Maxsurf Motion”.

Автор наводить результати розрахунків АЧХ СМПВ “Navatek I” без ходу, та на швидкості  $v=15$  вузл [11].

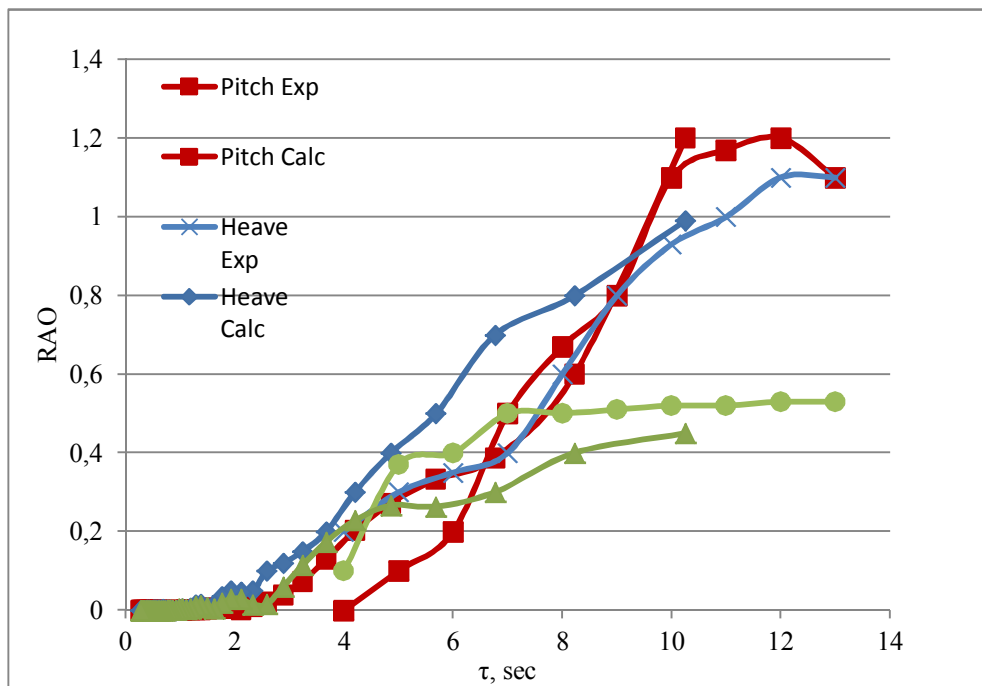


Рисунок 4. АЧХ судна “Navatek I”: Exp - експеримент  $v = 15$  вузл [3]; Calc - розрахунок в ПО “Patrol Swath”, блок “SW52”  $v = 15$  вузл.  $\Delta = 365$  (м);  $L = 34$  (м);  $B = 16$  (м);  $d = 3,7$  (м); тип спектра JONSWAP,  $h_{1/3} = 6$  (м)

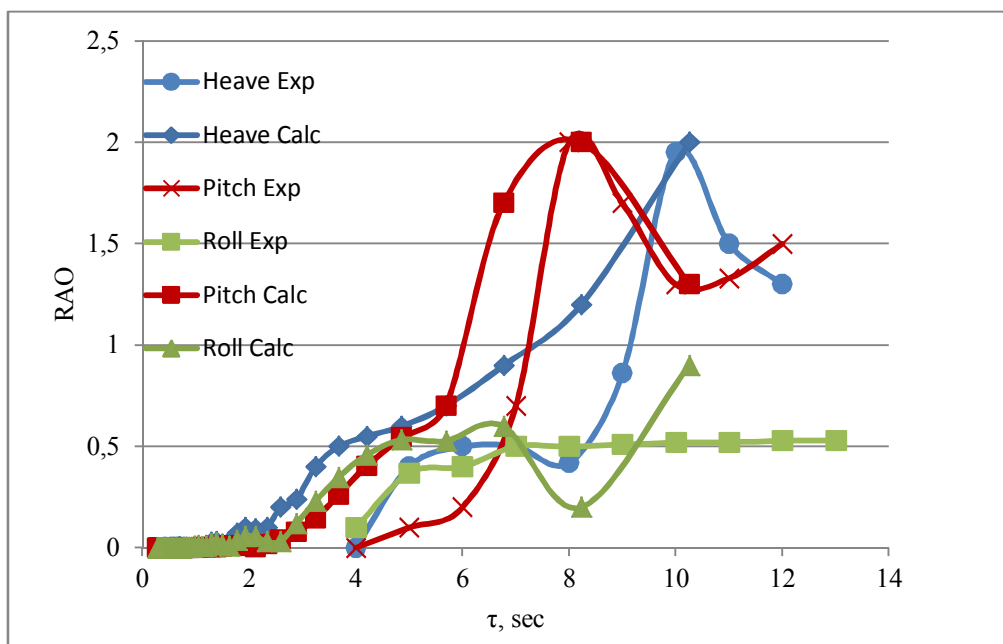


Рисунок 5. АЧХ судна “Navatek I”: Exp - експеримент без ходу [3]; Calc - розрахунок в ПО “Patrol Swath”, блок “SW52” без ходу.  $\Delta = 365$  (м);  $L = 34$  (м);  $B = 16$  (м);  $d = 3,7$  (м); тип спектра JONSWAP,  $h_{1/3} = 6$  (м).

### Висновки та перспектива подальшої роботи за даним напрямком

1. Розроблена блок схема логічної взаємодії оптимізації у звичному вигляді та модуля SW52, (що формує систему лінійних диференціальних рівнянь та вирішує їх на кожному кроці оптимізації методом Пауела-Флетчера-Давідона).



2. Доведено необхідність розробки блоку розрахунку хитавиці для кораблів типу СМПВ у зв'язку зі неефективністю використання інших програмних продуктів, що для розрахунку використовують апроксимацію Льюїса.

3. Наведені результати порівняння розрахунків бортової, кільової та вертикальної хитавиці з експериментом, що задовільняють умовам точності інженерних розрахунків на ранніх стадіях проектування.

### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Бойко А.П. Метод формирования поверхности судна с малой площадью ватерлинии [Текст] А.П. Бойко, А.В. Бондаренко// Збірник наукових праць НУК.- Миколаїв: НУК, 2010.- № 3.-С.62-68.
2. Дам С. Т. Выбор основных проектных характеристик кораблей береговой охраны: дис. к-та техн. наук: 629.05.02/ Дам Суан Туан; Украинский государственный морской технический университет имени адмирала Макарова– Д., 2003 – Бібліогр.: С. 7–96.
3. Дубровский В.А. Приближённый метод определения главных элементов судов с малой площадью ватерлинии [Текст] / В.А. Дубровский // В книге "Многокорпусные суда". - Л.: Судостроение, 1978.-С. 289-294.
4. Некрасов В. О. Метод визначення голловних розмірів та характеристик кораблів берегової охорони [Текст]// VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Іновації у суднобудуванні і техніці» (Миколаїв НУК) 2017 11-12 жовтня С.11-16.
5. Кондратьева Л.Ю. Розрахунок критеріїв морехідності в задачі оптимізації патрульних суден [Текст]// Сучасні інформаційні та інноваційні технології в транспорті» МІНТТ (Херсон ХДМА) 2016 19-20 травня с.117-121.
6. Ремез Ю.В. Качка корабля [Текст]/ Ю.В. Ремез. Л : Судостроение 1983, С.48-49.
7. Семенова В. Ю. Разработка метода расчета нелинейной качки судов: Дис. д-ра техн. наук: 05.08.01 СПб., 2005 360 с. РГБ ОД, 71:06-5/458.
8. Шапошников В.М. Метод расчёта волновых нагрузок, действующих на двухкорпусные суда с малой площадью ватерлинии (СМПВ) [Текст] / В.М. Шапошников // Сборник НТО им. акад. А.Н. Крылова. - Л.: Судостроение, 1989. - Вып. 465.-С.58-71.
9. Bentley Maxsurf Motion, Help
10. Seldl L. H., Clifford W. F., Cummings G. P., Design and operational Experience of the Swath ship NAVATEK-1/ Marine technology .- Vol. 30, № 3.-1993 pp/ 153-171.
11. D. T. Higdon, Multi-Hull Motions Simulation /Text/4 July Philadelphia, 2000 .  
Режим доступу–<http://home.earthlink.net/~dynamicstech/downloads/multi-overview.html>