



**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ  
ДОСЛІДЖЕННЯ  
МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДНА**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Одеський національний морський університет

*Кафедра теорії і проектування корабля  
ім. проф. Ю. Л. Воробйова*

# **ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДНА**

Навчальний посібник  
для студентів спеціальності 135  
«Суднобудування»

Одеса  
«Астропринт»  
2018

УДК 629.51/.58(075.8)  
Е457

Навчальний посібник містить опис лабораторних робіт з дисципліни «Теорія корабля та технічних засобів освоєння океану» та деяких експериментальних досліджень морехідних якостей моделей плавучих споруд у дослідному басейні Одеського національного морського університету.

Посібник буде корисним для студентів-кораблебудівників, а також аспірантів та фахівців кораблебудівної галузі.

Автори:

**Ніна Володимирівна Єфремова**, канд. техн. наук, доцент кафедри теорії і проектування корабля ім. проф. Ю. Л. Воробйова ОНМУ;

**Олександр Володимирович Демідюк**, канд. техн. наук, завідувач кафедри теорії і проектування корабля ім. проф. Ю. Л. Воробйова ОНМУ;

**Марина Віталіївна Дрига**, старший викладач кафедри теорії і проектування корабля ім. проф. Ю. Л. Воробйова ОНМУ;

**Наталія Никонорівна Котовська**, старший викладач кафедри теорії і проектування корабля ім. проф. Ю. Л. Воробйова ОНМУ

Рецензенти:

генеральний директор Морського інженерного бюро, доктор технічних наук, професор **Г. В. Єгоров**;

доцент кафедри «Інженерні конструкції та водні дослідження» ОНМУ, кандидат технічних наук **К. Ю. Федорова**

Навчальний посібник рекомендований до друку вченою радою Одеського національного морського університету (*протокол № 12 від 27 червня 2018 р.*)

ISBN 978–966–927–455–7

© Єфремова Н. В., Демідюк О. В.,  
Дрига М. В. та ін., 2018

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ МОРСЬКИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра теорії і проектування корабля ім. проф. Ю.Л.Воробйова**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ**  
**МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДНА**

**НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК**  
**ДЛЯ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 135 «СУДНОБУДУВАННЯ»**

Одеса – 2018

Навчальний посібник розроблений канд. техн. наук Демідюком Олександром Володимировичем – завідувачем кафедри "Кафедра теорії й проектування корабля ім. проф. Ю.Л.Воробйова" ОНМУ, канд. техн. наук Єфремовою Ніною Володимирівною – доцентом тієї ж кафедри, Дригою Мариною Віталіївною та Котовською Наталією Никонорівною – старшими викладачами тієї ж кафедри.

Навчальний посібник схвалений кафедрою "Кафедра теорії й проектування корабля ім. проф. Ю.Л.Воробйова " ОНМУ 22 травня 2018 (протокол № 15).

Навчальний посібник рекомендований до друку Вченою радою факультету Суднобудування, інформаційних технологій і системотехніки ОНМУ 23 травня 2018 (протокол № 7).

Навчальний посібник рекомендований до друку Вченою радою Одеського національного морського університету 27 червня 2018 (протокол № 12)

Рецензенти:

генеральний директор Морського Інженерного Бюро,  
доктор технічних наук, професор Г.В.Єгоров

доцент кафедри «Інженерні конструкції та водні дослідження» ОНМУ, кандидат технічних наук Федорова К.Ю.

## ЗМІСТ

Передмова	4
Розділ 1. Опис лабораторних робіт з дисципліни «Теорія корабля та технічних засобів освоєння океану»	10
1.1 Визначення геометричних характеристик моделі	11
1.2 Рішення деяких задач початкової остійності	18
1.3 Експериментальне дослідження остійності моделі судна	27
1.4 Буксирувальні випробування моделі судна	32
1.5 Визначення елементів гребного гвинта	47
1.6 Експериментальне вивчення роботи гребного гвинта	54
1.7 Дослідження бортової хитавиці моделі судна	67
Література до розділу 1	82
Розділ 2. Експериментальні дослідження хитавиці плавучих об'єктів	84
2.1 Експериментальне устаткування для дослідження гідродинамічних і кінематичних характеристик поздовжньої хитавиці моделей суден	84
2.2 Експериментальні дослідження хитавиці моделі самопідіймальної бурової установки	92
Література до розділу 2	132
Додаток. Форми протоколів лабораторних робіт	133

## ПЕРЕДМОВА

Будівництво дослідного басейну в Одесі було почато відразу після створення в 1930 році на базі Одеського політехнічного інституту Одеського інституту інженерів водного транспорту (ОІВТ) у складі двох факультетів: кораблебудівного й судномеханічного. Басейн почав працювати в 1932 році. Це був перший дослідний басейн, побудований у СРСР після громадянської війни. Басейн будувався по системі Велленкампа (гравітаційного типу). Рух моделі виконувався за допомогою тросової системи, що приводився в дію тягнучим вантажем, який опускався в шахту. Вага вантажу визначала швидкість руху моделі. Дослідні басейни такої системи давали можливість зменшення розмірів басейну без погіршення точності вимірів. В існуючому будинку колишнього інституту шляхетних дівиць тільки така конструкція могла бути розміщена без кардинальних переробок або взагалі без будівництва спеціального будинку.

Поперечний переріз басейну має вигляд напівеліпса, що по ідеї Велленкампа виключало вплив бічних стінок басейну на результати дослідів. Проект басейну був підписаний німецьким консультантом – видатним гідромеханіком, творцем теорії прикордонного шару – Германом Шліхтінгом.

Основні характеристики дослідного басейну ОНМУ: довжина (з доками для підготовки моделей) - 35,5 м; ширина - 6,1 м; глибина - 2,5 м; об'єм басейну найбільший – 400 куб. м. Оптимальна довжина моделі - 2,0 м.

До початку Великої Вітчизняної війни в басейні була проведена велика кількість випробувань моделей суден, що будувалися. У цей час на базі експериментів в дослідному басейні розвивалися

теоретичні дослідження опору води руху судна під керівництвом професора Г.Є. Павленка. Тут слід виділити систематичні випробування моделей барж і баржевих ешелонів, які були основою для проектування баржевого флоту СРСР. Участь у випробуваннях брали К.В. Кохановський (перший завідувач дослідним басейном), а також Е.С. Овчаренко.

Період з 50-х по 70-і роки пов'язаний з іменем доктора технічних наук, професора О.О. Костюкова. Його фундаментальна монографія «Теорія корабельних хвиль і хвильового опору» була визнана гідною престижної премії імені О.М. Крилова Науково-технічного товариства інженерів-кораблебудівників. В 1980 р. дослідному басейну ОІМФ привласнене ім'я професора О.О. Костюкова.

Можливості басейну в цей період суттєво зросли. Басейн був обладнаний хвилеутворювачем і хвилегасінням. Дообладнання дозволяло робити випробування моделей на регулярному хвилюванні. Для того, щоб хвилювання не руйнувалося за рахунок еліптичного перетину, у басейні були встановлені вертикальні дерев'яні щити, і ширина відповідно зменшилася до 4,1 м, що трохи звузило діапазон швидкостей випробувань.

В 60-і й 70-і роки було проведено дуже багато систематичних випробувань. Для цього був побудований парк моделей 60-ї серії (визнаної міжнародної серії, яка розроблена в дослідному басейні у Вагенінгені в Голландії). Для можливості випробувань по моделюванню поведінки моделей на мілководді була розроблена спеціальна конструкція, яка дозволяла встановлювати щити, що імітують подвійне дно з можливістю швидкого розбирання й переходу до випробувань на глибокій воді. Наприкінці 60-х років



було створене устаткування для створення змушених коливань моделі й визначення кінематичних і гідродинамічних характеристик різних видів хитавиці моделі. Це устаткування разом з моделлю переміщалося по рейках, прокладених уздовж басейну на спеціальній фермі. Великий внесок у створення цього устаткування вклали в.о. завідувача Кафедри теорії корабля Ю.М. Гулієв, Я.М. Еліс і інженер басейну В.М. Кирилов. Наприкінці 60-х і початку 70-х років поряд з роботами із замовлень промисловості були проведені систематичні випробування моделей 60-ї серії на глибокій воді й мілководді для визначення гідродинамічних і кінематичних характеристик руху суден.

З 1971 року по 1976 рік Ю.М. Гулієв був експертом ООН і керівником Проекту Міжурядової морської консультативної організації (ІМКО, нині ІМО) по створенню науково-експериментального центру гідродинаміки суден у м. Варна (Болгарія).

У середині 70 - х років випробуваннями керував Ю.Л. Воробйов, що став завідувачем Кафедри теорії корабля. В 80 - х роках були проведені систематичні випробування з дослідження руху моделей у каналах різного профілю, випробування по розходженню моделей, випробування з дослідження руху моделей близько твердої стінки та ін. Крім систематичних випробувань проводилися також випробування по визначенню опору проєктованих пасажирських і лоцманських катерів типу «Радуга» і «Александр Грін» (велика кількість катерів даних типів плаває дотепер по акваторіях України й Росії), найскладніші випробування для визначення можливості перегону дока-шостидесятитисячника з Чорного моря на Далекий Схід.

Слід зазначити, що, незважаючи на малі габарити басейну (за класифікацією басейни довжиною менш 50 м вважаються навчальними), вдавалося проводити досить складні експерименти на базі оригінальних, прийнятих колективом рішень. На основі проведених теоретичних і експериментальних досліджень разом з «Чорноморнііпроект» були випущені «Нормы технологического проектирования морских каналов» РД 31.31.47-88.

Крім стандартних випробувань була проведена значна кількість випробувань, пов'язаних з теоретичними дослідженнями аспірантів кафедри Я.М. Еліса, Е.Л. Сухіра, В.К. Лабазнікова, Є.В. Коханова, М.М. Мітциха, Нго Кана, І.О. Бойцуна, О.І. Лабина, О.М. Крилова, Чоудхури Анвара Кабіра, Т.В. Смірної, Ю.Є. Дробишевського, С.М. Баскакова, О.Ю. Нільви, Н.В. Єфремової, О.В. Демідюка й ін.

Проведенню всіх випробувань і технічної модернізації дослідного басейну сприяли навчальні майстри, інженери, завідувачі лабораторії: О.І. Крашановський, М.М. Кузнєцов, П.Н. Козачок, В.І. Димитренко, М.П. Андрєєв.

Ю.Л. Воробйова не стало в 2010 р., а в 2011 році його ім'ям була названа Кафедра теорії й проектування корабля ОНМУ.

Зараз кропітку творчу роботу з підтримки працездатності експериментальної лабораторії, підготовку й проведення випробувань продовжують завідувач дослідним басейном Л.С. Столяров, В.В. Литвиненко, Л.П. Кірсанов, В.В. Чуприн.

Процес модернізації дослідного басейну ОНМУ, переходу на сучасну елементну базу, початий Ю.Л. Воробйовим і В.Н. Кириловим, триває й зараз.

З 1998 по 2018 роки в дослідному басейні ОНМУ виконувалися наступні види експериментальних досліджень морехідних якостей суден:

- визначення буксирувального опору моделей плавучих об'єктів на тихій воді й на регулярному хвилюванні (на штатному експериментальному устаткуванні);

- визначення кінематичних характеристик хитавиці плавучих об'єктів на регулярному і імпульсному хвилюванні (на штатному експериментальному устаткуванні);

- визначення збурюючих сил і моментів, що діють на жорстко закріплену модель в умовах регулярного хвилювання (на спеціально спроектованому експериментальному устаткуванні);

- визначення узагальнених приєднаних мас й відповідних коефіцієнтів опору моделей (на модифікованому штатному експериментальному устаткуванні) методом змушених коливань на тихій воді).

Курсові кути хвилювання, що набігає, установлюються в діапазоні від  $0$  до  $180^\circ$  із заданим кроком. Висота хвиль  $H$  - в діапазоні від  $0.02\text{ м}$  до  $0.12\text{ м}$ . Частота регулярного хвилювання  $\omega$  змінюється в діапазоні від  $3.5\text{ с}^{-1}$  до  $12.5\text{ с}^{-1}$ . При  $\omega < 3.5\text{ с}^{-1}$  характеристики хитавиці можуть бути визначені на імпульсному (короткочасному несталому) хвилюванні.

Після модернізації устаткування басейну, виконаної в 2009 – 2010 роках з'явилася можливість модулювати частоту хвилювання, імітуючи нерегулярність хвилювання по довжині, при цьому висота хвиль залишається незмінною.

Опис штатного експериментального устаткування для визначення буксирувального опору моделей плавучих об'єктів на

тихій воді й на регулярному хвилюванні наведено в розділі 1 (п.1.4).  
Опис експериментального устаткування для дослідження гідродинамічних і кінематичних характеристик хитавиці моделей плавучих об'єктів наведено в розділі 2.

Навчальний посібник містить опис лабораторних робіт, які виконують студенти під час вивчення дисципліни «Теорія корабля та технічних засобів освоєння океану», а також стислий опис деяких експериментальних досліджень морехідних якостей моделей плавучих споруд.

**РОЗДІЛ 1****ОПИС ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ З ДИСЦИПЛІНИ  
«ТЕОРІЯ КОРАБЛЯ ТА ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ ОСВОЄННЯ  
ОКЕАНУ»**

При рішенні задач теорії корабля важливу роль відіграють результати експериментальних досліджень. Вони уточнюють і доповнюють теорію, а для деяких задач досі немає більш достовірних методів рішення, ніж експериментальні.

Основна задача проведення лабораторних робіт при вивченні дисципліни «Теорія корабля та технічних засобів освоєння океану» – ознайомити студентів з методами експериментальних досліджень в області теорії корабля, допомогти їм засвоїти теоретичний матеріал основних розділів курсу: «Статика», «Ходовість», «Хитавиця та керованість».

Лабораторні роботи проводяться на існуючому устаткуванні дослідного басейну Одеського національного морського університету.

Під час вивчення розділу «Статика» виконуються роботи «Визначення геометричних характеристик моделі», «Рішення деяких задач початкової остійності» та «Експериментальне дослідження остійності моделі судна»; у розділі «Ходовість» - «Буксирувальні випробування моделі судна», «Визначення елементів гребного гвинта» та «Експериментальне вивчення роботи гребного гвинта»; у розділі «Хитавиця та керованість» - «Дослідження бортової хитавиці моделі судна». Наприкінці кожного опису наведено перелік контрольних питань та короткий список літератури для поглибленого вивчення теоретичних положень з тематики роботи.

У додатку наведені форми протоколів лабораторних робіт. Слід звернути увагу на подвійну нумерацію рисунків та таблиць – у дужках наведені номери відповідно до нумерації розділів у посібнику.

## 1.1. ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ

**1.1.1. Постановка задачі.** Експериментальному дослідженню остійності судна повинне передувати визначення характеристик зануреного об'єму. Тому на першому етапі дослідження остійності визначаються в заданому діапазоні осадок характеристики моделі, необхідні на подальших етапах роботи, а саме:

- площа діючої ватерлінії  $S$ ;
- об'ємна водотоннажність  $V$ ;
- апліката центру величини  $z_c$ ;
- момент інерції ватерлінії відносно поздовжньої осі  $I_x$ ;
- поперечний метацентричний радіус  $r$ .

### **1.1.2. Опис об'єкту дослідження.**

Робота виконується на схематизованій моделі судна, розробленій приват-доцентом кафедри теорії і проектування корабля М. М. Мітцихом (рис. 1.1.1). Головні розмірення моделі: довжина  $L = 0,7$  м, ширина  $B = 0,4$  м, висота борту  $H = 0,28$  м.

Модель обладнана пристроєм для виміру кутів крену (1) і рамкою (2) із гвинтовою напрямною (3) для вертикального переміщення вантажу (4), маса якого 2 кг. Ця рамка може бути пов'язана з моделлю як жорстко (фіксується стопором (5)), так і за допомогою шарніра (6) в одній точці (так моделюється вплив підвішеного вантажу). Для виміру осадок по бортах моделі є шкали заглиблень (7). Для фіксації поперечних переміщень вантажів (8) (маса кожного дорівнює 0,25 кг) існують вертикальні штирі (9),

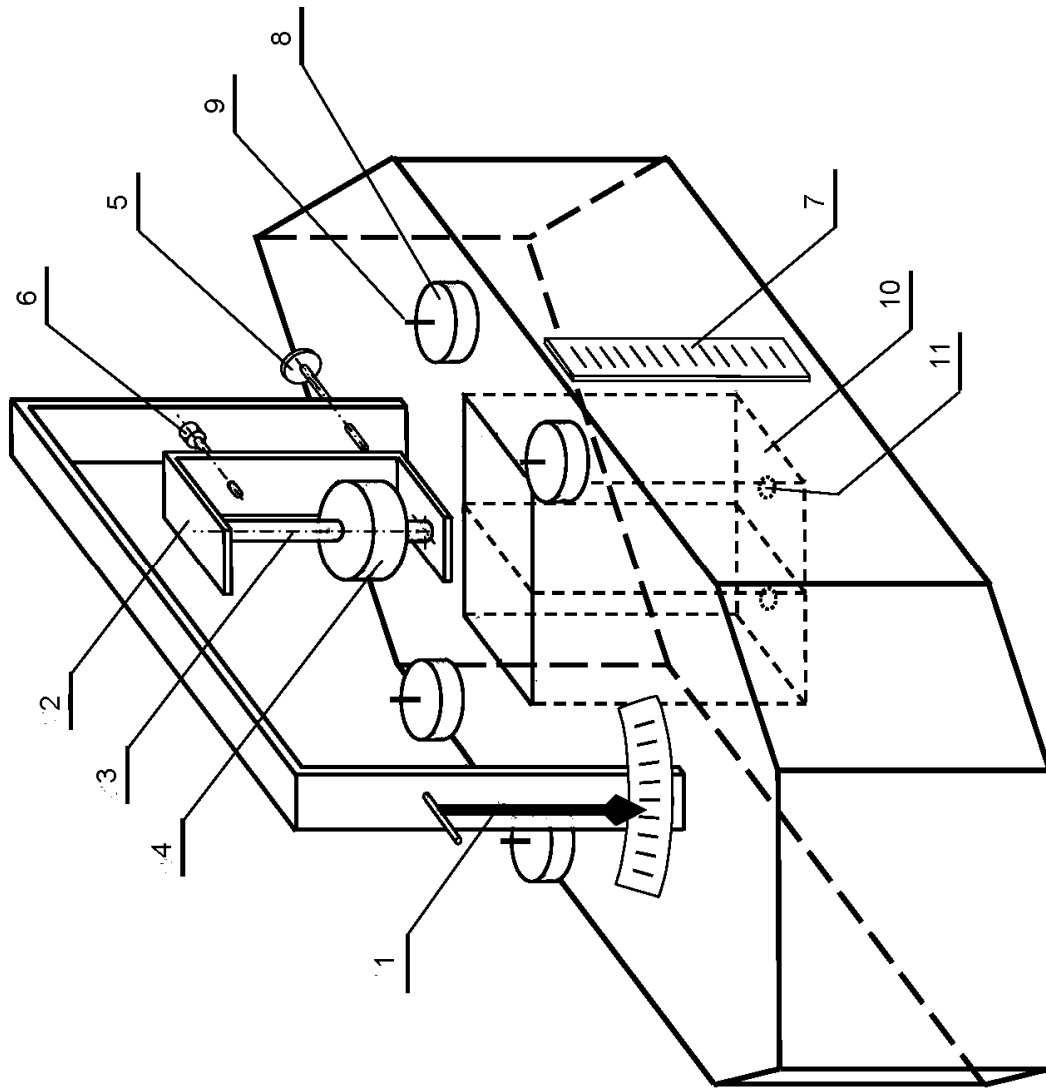


Рис. 1.1.1.1 Схематизована модель судна

відстань між якими 0,37 м. У корпусі моделі для моделювання впливу вільних поверхонь і вивчення непотоплюваності є два знімні блоки (10). У днищевій обшивці під ними містяться отвори (11), що закриваються.

На рис. 1.1.2 наведений ескіз ватерлінії моделі.

### **1.1.3. Порядок виконання роботи.**

Оскільки модель має вертикальні борти, то площа ватерлінії і її моменти інерції не залежать від осадки. Процедури їх обчислень дуже прості – вони визначаються як сума площ і моментів інерції елементарних геометричних фігур - прямокутника, трикутника й трапеції. Розрахункові формули для обчислення моментів інерції площ цих фігур наведені нижче (таблиця 1.1.1). Вихідні дані для обчислень беруться в сантиметрах.

З урахуванням прямобортності моделі апліката центру величини дорівнює половині осадки

$$z_{ci} = \frac{T_i}{2}. \quad (1.1.1)$$

Об'ємна водотоннажність  $V$  і поперечний метацентричний радіус  $r$  є функціями від осадки та обчислюються за формулами

$$V_i = ST_i; \quad (1.1.2)$$

$$r_i = \frac{I_x}{V_i} \quad (1.1.3)$$

У наведених формулах індекс  $i$  відповідає поточним значенням осадки. Обчислення  $V_i$  й  $r_i$  виконуються в табличній формі в



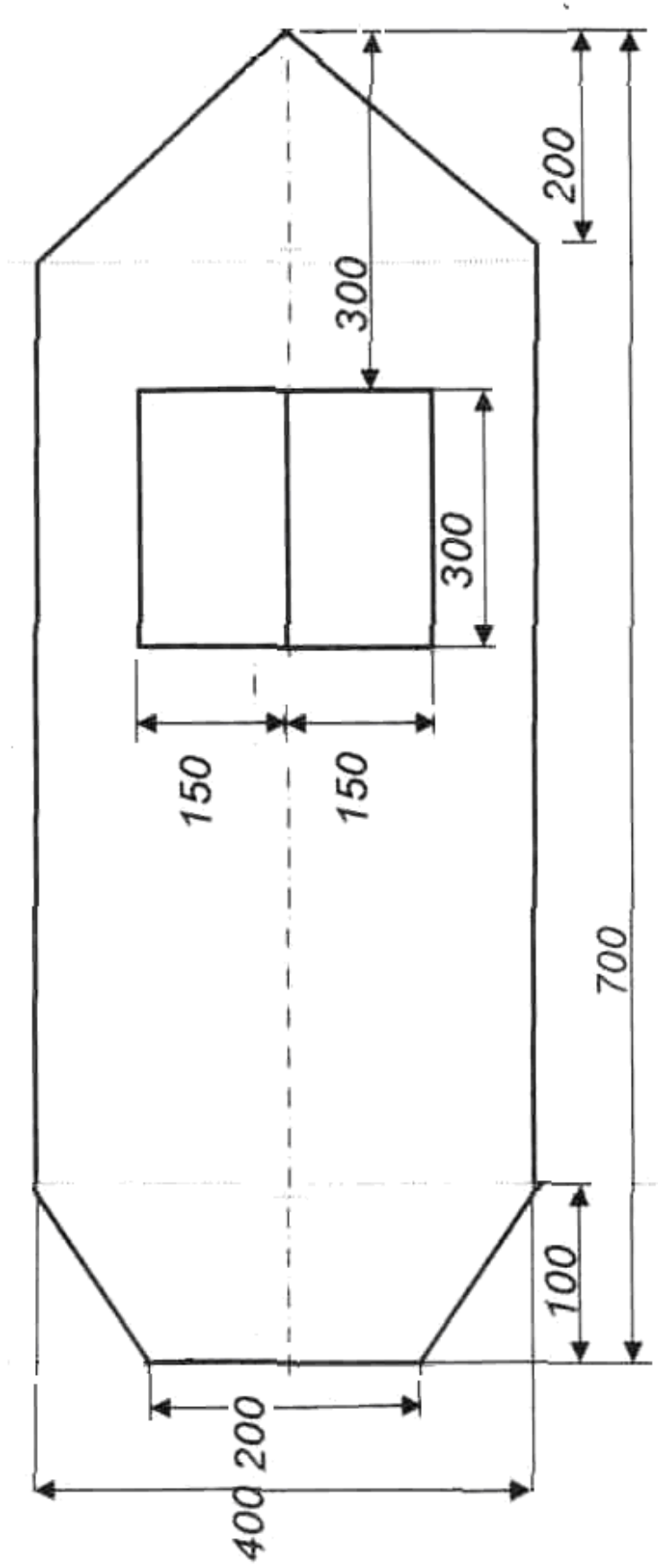


Рис. 1.1.1.2 Вагерлінія моделі

інтервалі від  $T = 2 \text{ см}$  до  $T = H$  ( $H$  - висота борту моделі) із кроком  $2 \text{ см}$ . Крім того, розраховується вагова водотоннажність моделі  $D$ :

$$D = \gamma V, \quad (1.1.4)$$

де  $\gamma = 0,001 \frac{\text{кг}}{\text{см}^3}$  - питома вага заборотної води з урахуванням прийнятих у роботі розмірностей довжин.

Розрахунки виконуються в таблиці 1.1.2. За результатами розрахунків будуються криві елементів теоретичного креслення моделі.

**1.1.4. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку.

#### **1.1.5. Контрольні питання.**

- 1.1.5.1. Характеристики посадки судна.
- 1.1.5.2. Умови рівноваги судна судна.
- 1.1.5.3. Об'ємна водотоннажність (визначення).
- 1.1.5.4. Центр величини (ЦВ) судна (визначення).
- 1.1.5.5. Об'ємна водотоннажність за умови відсутності крену та диференту (розрахункова формула).
- 1.1.5.6. Координати ЦВ за умови відсутності крену та диференту (розрахункові формули).
- 1.1.5.7. Площа ватерлінії (розрахункова формула).
- 1.1.5.8. Момент інерції площі ватерліній відносно подовжньої осі  $I_x$  (розрахункова формула).

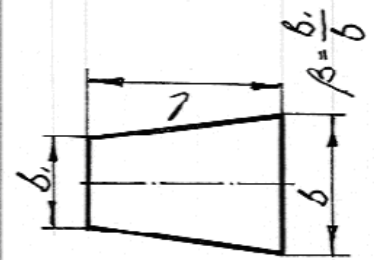
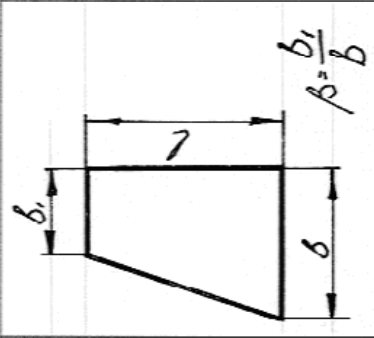
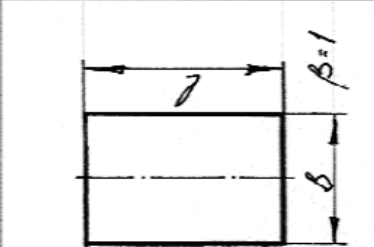
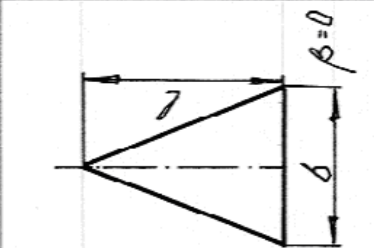
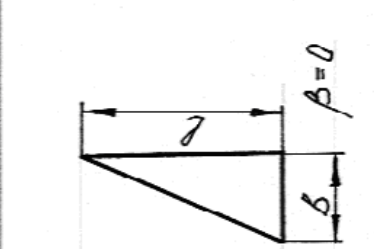
Момент інерції площі плоскої фігури відносно заданої осі

$$i_x = k l b^3,$$

де  $l$ ,  $b$  - довжина та ширина фігури,

$k$  - коефіцієнт, що враховує форму фігури.

Таблиця 1.1.1 Коефіцієнт  $k$  для різних фігур

Форма фігури					
$k$	$\frac{1 + \beta + \beta^2 + \beta^3}{48}$	$\frac{1 + 10\beta - 18\beta^2 + 38\beta^3 - 5\beta^4}{36(1 + \beta)}$	$\frac{1}{12}$	$\frac{1}{48}$	$\frac{1}{36}$

1.1.5.9. Крива аплікату ЦВ, її особливості.

1.1.5.10. Поперечний метацентр.

1.1.5.11. Поперечний метацентричний радіус.

1.1.5.12. Криві елементів теоретичного креслення.

1.1.5.13. Як обирають масштаби для побудовання кривих елементів теоретичного креслення?

1.1.5.14. Які криві зі складу кривих елементів теоретичного креслення треба будувати в однаковому масштабі?

**1.1.6. Література** [2. С. 23-36; 3. С.21-40; 4. С. 26-31].

## 1.2. РІШЕННЯ ДЕЯКИХ ЗАДАЧ ПОЧАТКОВОЇ ОСТІЙНОСТІ

**1.2.1. Постановка задачі.** Одною з найважливіших характеристик судна є його остійність. Розрізняють початкову остійність (відновний момент лінійний відносно кута крену) і остійність при більших кутах крену (нелінійна залежність відновного моменту від кута крену).

Задачами дослідження початкової остійності є визначення положення центру ваги моделі судна по висоті дослідним шляхом (дослід кренування), а також оцінка впливу на початкову остійність переміщення вантажу по вертикалі та підвішеного вантажу.

При рішенні задач початкової остійності при малих (до 10-15°) кутах крену застосовується метацентрична формула

$$M_{\theta} = Dh_0\theta, \quad (1.2.1)$$

де  $M_{\theta}$  - відновний момент;

$D$  - вагова водотоннажність;

$h_0$  - початкова поперечна метацентрична висота;

$$h_0 = z_m - z_g, \quad (1.2.2)$$

Де  $z_g$  - апліката центру ваги;

$z_m$  - апліката поперечного метацентру.

Величина  $h_0\theta$  - плече статичної остійності при малих кутах крену.

Стан рівноваги судна, що нахилилося, характеризується рівністю моменту, що кренить, та відновного моменту:

$$M_{кр} = M_{г}. \quad (1.2.3)$$

При відомих значеннях водотоннажності судна, метацентричної висоті та моменту, що кренить, кут крену визначається формулою

$$\theta = \frac{M_{кр} \cdot 57,3^\circ}{Dh_0}. \quad (1.2.4)$$

При виконанні практичних розрахунків водотоннажність судна визначається проектувальниками та експлуатаційниками шляхом підсумовування ваги судна порожньому й усіх складових дедвейту, або по марках заглиблення. Апліката поперечного метацентра знімається із кривих елементів теоретичного креслення. Апліката центру ваги визначається підсумовуванням статичних моментів відносно основної площини складових навантаження та діленням суми на водотоннажність.

Вага й координати центру ваги порожнього судна змінюються в процесі експлуатації внаслідок переобладнань, ремонтів та ін. Тому у встановлені класифікаційними товариствами строки проводять експериментальне визначення координат центру ваги та ваги судна порожньому - дослід кренування. Для визначення ваги судна досить знати його осадки та мати характеристики елементів зануреного об'єму. При відомих водотоннажності, змінах моменту, що кренить, (забезпечується переміщенням вантажу на відому відстань) і відповідних змінах кута крену визначається початкова метацентрична висота, а через неї апліката центру ваги судна

$$h_0 = \frac{M_{кр} \cdot 57,3}{D\theta}; \quad (1.2.5)$$

$$z_g = z_m - h_0 = (z_c + r) - h_0, \quad (1.2.6)$$

де  $z_c$  - апліката центру величини;

$r$  - поперечний метацентричний радіус.

Переміщення вантажу  $P$  по вертикалі на відстань  $l_z$  приводить, згідно з теоремою моментів, до переміщення центру ваги судна на відстань

$$\delta z_g = \frac{P}{D} l_z. \quad (1.2.7)$$

Оскільки посадка судна не змінюється, то залишається незмінною апліката поперечного метацентра. Початкова метацентрична висота до переносу вантажу

$$h_0 = z_m - z_g; \quad (1.2.8)$$

після переносу вантажу

$$h_1 = z_m - z_{g1}. \quad (1.2.9)$$

Зміна початкової метацентричної висоти

$$\delta h = h_1 - h_0 = -z_{g1} + z_g = -\delta z_g = -\frac{P}{D} l_z. \quad (1.2.10)$$

Тоді

$$h_1 = h_0 + \delta h = h_0 - \frac{P}{D} l_z. \quad (1.2.11)$$

Вплив підвішеного вантажу на початкову остійність аналогічний переміщенню його центру ваги по вертикалі в точку підвісу. Тоді переміщення центру ваги судна згідно з теоремою моментів визначається формулою

$$\delta z_g = \frac{P}{D} l_n, \quad (1.2.12)$$

де  $l_n$  - відстань між точкою підвісу та центром ваги вантажу. Нове значення початкової метацентричної висоти

$$h_2 = h_0 + \delta h = h_0 - \frac{P}{D} l_n. \quad (1.2.13)$$

### **1.2.2. Опис об'єкту дослідження.**

Робота виконується на схематизованій моделі судна, розробленій приват-доцентом кафедри ТПК М. М. Мітцихом, описаній в п. 1.1.1 (рис. 1.1.1). Вагова водотоннажність  $D$  та апліката поперечного метацентру  $z_m$  моделі наведені в таблиці 1.2.1.

### **1.2.3. Порядок виконання роботи.**

При виконанні лабораторної роботи момент, що кренить, створюється переміщенням вантажів (8) з борту на борт (рис. 1.2.1).

Кути крену фіксуються кренометром (1) (рис. 1.1.1). Під час виконанні роботи не слід побоюватися початкового крену – необхідно тільки його замірити, оскільки важливі не абсолютні значення, а зміни кутів крену. Осадка моделі дорівнює половині суми осадок по правому та лівому бортах.

**1.2.3.1. При виконанні досліду кренування** вантаж (4) на гвинтовій напрямній (3) рамки (2) слід зафіксувати на рівні шарніра (6). Для одержання точного результату вантажі (8) переміщують із борту на борт на напрямні (9) кілька разів. Маса переміщених вантажів, плечі переносу  $l_{yi}$  та відповідні кути крену записують у таблицю 1.2.2. Розрахунки виконуються в цій же таблиці.



Таблиця 1.2.1 Елементи теоретичного креслення моделі

$T_i$ , см	$D_i$ , кг	$z_{mi}$ , см
4	9,20	34,25
5	11,50	28,30
6	13,80	24,50
7	16,10	21,93
8	18,40	20,12
9	20,70	18,83
10	23,00	17,60
11	25,30	17,23
12	27,60	16,75
13	29,90	16,42
14	32,20	16,21
15	34,50	16,10
16	36,80	16,06
17	39,10	16,09
18	41,40	16,17
19	43,70	16,29

Середнє значення поперечної метацентричної висоти з досліду кренування

$$\bar{h}_0 = \frac{\sum_{i=1}^n h_{0i}}{n} \quad (\text{см}). \quad (1.2.14)$$

Апліката центру ваги моделі

$$z_g = z_m - \bar{h}_0 \quad (\text{см}). \quad (1.2.15)$$

**1.2.3.2. При перевірці впливу на початкову остійність переміщення вантажу по вертикалі необхідно повторити дослід кренування, перемістивши вантаж (4) вздовж гвинтової напрямної (3)**

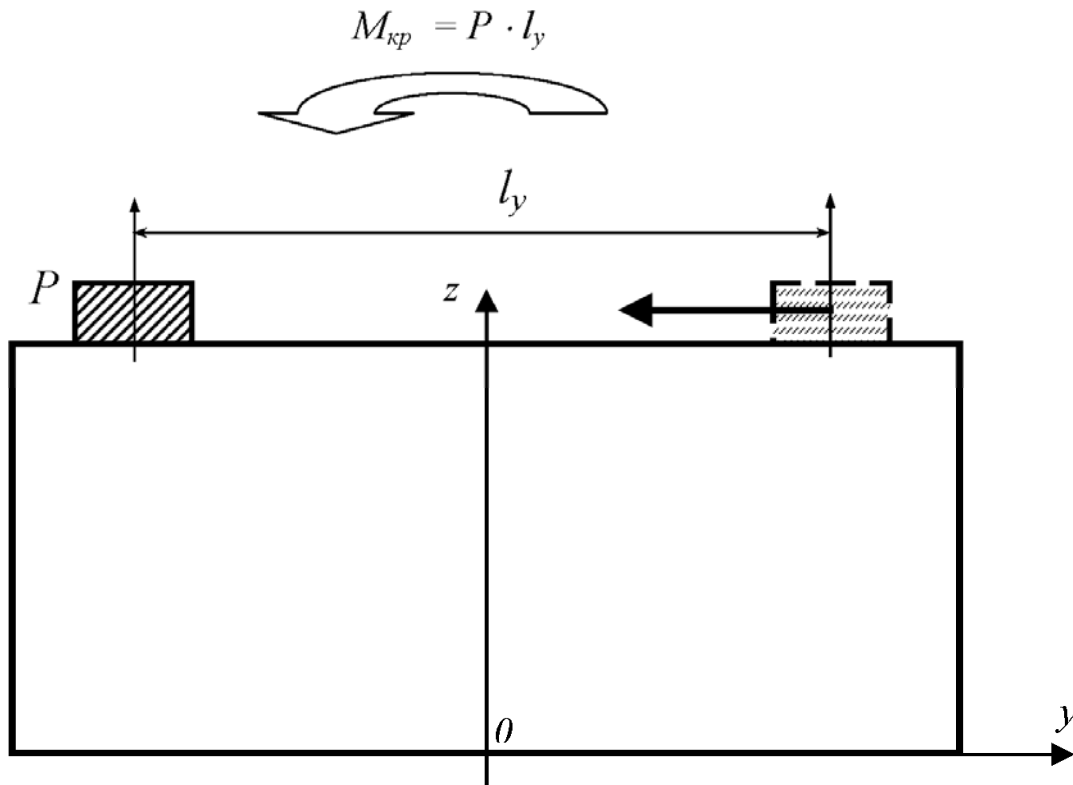


Рис. 1.2.1 Завдання моменту, що кренить  
 $P$  - маса переміщеного вантажу, кг;  
 $l_y$  - плече поперечного переносу вантажу, см

рамки (2) моделі та зафіксувавши величину цього переміщення  $l_z$  (рис. 1.2.2).

Результати вимірів і обчислення записуються в таблицю 1.2.3. За результатами розрахунків робиться висновок про вплив на остійність вертикального переміщення вантажу.

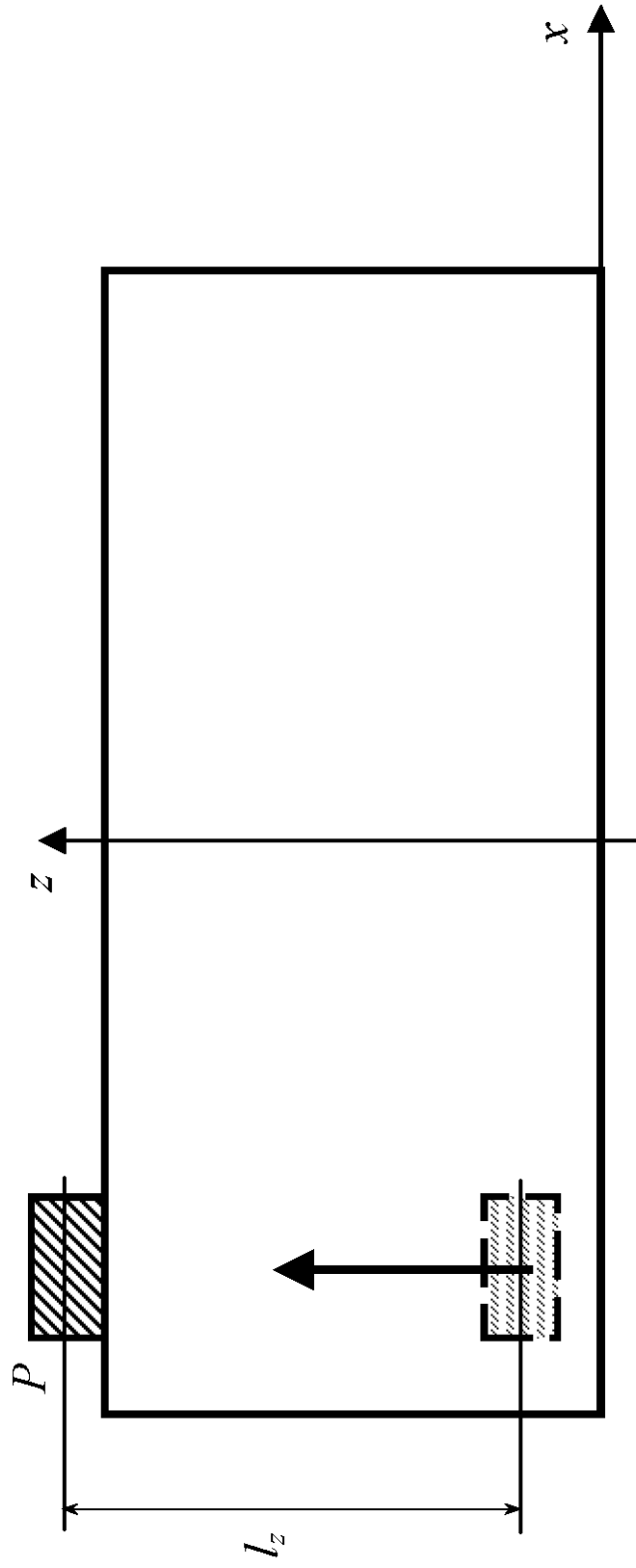


Рис. 1.2.2.2 Переміщення вантажу по вертикалі  
 $l_z$  - вертикальне переміщення вантажу, см

Середнє значення поперечної метацентричної висоти з досліду кренування

$$\bar{h}_1 = \frac{\sum_{i=1}^n h_{1i}}{n} \quad (\text{см}). \quad (1.2.16)$$

Розрахункове значення поперечної метацентричної висоти

$$h_1 = \bar{h}_0 + \delta h = \bar{h}_0 - \frac{P}{D} l_z \quad (\text{см}). \quad (1.2.17)$$

**1.2.3.3. При перевірці впливу на початкову остійність підвішеного вантажу** необхідно повторити дослід кренування, відпустивши стопор (5) рамки (2) моделі й зафіксувавши відстань  $l_n$  від центру ваги вантажу (4) до осі шарніра (6). Результати вимірів і обчислення записуються в таблицю 1.2.4. За результатами розрахунків робиться висновок про вплив на остійність підвішеного вантажу.

Середнє значення поперечної метацентричної висоти з досліду кренування

$$\bar{h}_2 = \frac{\sum_{i=1}^n h_{2i}}{n} \quad (\text{см}). \quad (1.2.18)$$

Розрахункове значення поперечної метацентричної висоти

$$h_2 = \bar{h}_0 + \delta h = \bar{h}_0 - \frac{P}{D} l_n \quad (\text{см}). \quad (1.2.19)$$

**1.2.4. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку. Слід звернути увагу на формулювання висновків щодо визначення аплікати центру ваги

судна за допомогою дослідження кренування, щодо впливу вертикального переміщення вантажу на початкову остійність, а також щодо впливу на початкову остійність підвішеного вантажу.

### **1.2.5. Контрольні питання.**

- 1.2.5.1. Остійність (визначення).
- 1.2.5.2. Відновний момент.
- 1.2.5.3. Момент остійності форми.
- 1.2.5.4. Момент остійності ваги.
- 1.2.5.5. Плече статичної остійності.
- 1.2.5.6. Поперечна остійність.
- 1.2.5.7. Метацентрична формула остійності.
- 1.2.5.8. Дослід кренування (призначення).
- 1.2.5.9. Дослід кренування (проведення).
- 1.2.5.10. Зміна остійності судна при перенесенні вантажу.
- 1.2.5.11. Вплив на остійність підвішеного вантажу.

**1.2.6. Література** [2. С. 86-97, 103-123, 141-145, 246-272; 3. С.103-106, 112-114, 141-146; 4. С. 82-99].

### 1.3. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСТІЙНОСТІ МОДЕЛІ СУДНА НА ВЕЛИКИХ КУТАХ КРЕНУ

**1.3.1. Постановка задачі.** Поперечну остійність судна в області значних кутів крену зазвичай характеризують за допомогою діаграми статичної остійності. При експериментальному дослідженні поперечної остійності моделі судна в області значних кутів крену дослідним шляхом визначаються величини відновних моментів при різних кутах крену та заданих значеннях аплікати центру ваги. Експерименти проводяться з моделлю без надбудов і з надбудовами.

При статичній дії зовнішнього моменту, що кренить,  $M_{кр}$  модель буде плавати в положенні рівноваги при деякому куті крену  $\theta$ , тобто момент, що кренить, буде врівноважений відновним моментом:

$$M_{кр} = M_{в}. \quad (1.3.1)$$

Отже, прикладаючи до моделі статично задані моменти, що кренять, та вимірюючи відповідні кути крену, при яких модель буде перебувати в рівновазі (стійкій та нестійкій), можна знайти залежність  $M_{в} = M_{в}(\theta)$ , яка графічно представляється у вигляді діаграми статичної остійності.

#### **1.3.2 Опис об'єкту дослідження.**

Експеримент проводиться з моделлю судна (1), що плаває в басейні (рис. 1.3.1). Модель обладнана знімними надбудовами (2), переміщуваним вантажем (3), вертикальним стояком (4) (для переміщення вантажу (3)), а також пристроєм для передавання на модель моменту, що кренить. Цей пристрій складається з горизонтального вала (5) (що обертається в підшипниках),

насадженого на вал шків (7), кренометра (8) і коромисел (6). Кінці коромисел шарнірно з'єднані тягами (9) з палубою моделі, утворюючи два рухливі паралелограми. Вантаж (10), який створює момент, що кренить, установлюється на підвіску (11), нитка якої перекинена через шків (7). Таким чином, модель навантажується моментом, що кренить,

$$M_{кр} = P_{кр} \frac{d}{2}, \quad (1.3.2)$$

де  $P_{кр}$ , кг - вага вантажу (10);

$d = 25$  см - діаметр шків (7).

Вага моделі (1) судна  $D = 35$  кг, вага переміщуваного вантажу (3)  $P_{\delta} = 3,5$  кг. Апліката центру ваги задається при проведенні досліду.

### **1.3.3 Порядок виконання роботи.**

1.3.3.1. Установити стрілку кренометра (8) на нуль. Вихідне положення моделі в басейні – без крену та диференту.

1.3.3.2. Покласти вантаж, що кренить, (10), вагою  $P_{кр}$ , на підвіску (11), притримуючи її рукою, Плавно відпустити вантаж, що кренить, почекати, поки коливання моделі припиняться.

1.3.3.3. Вагу  $P_{кр}$  та статичний кут крену  $\theta$ , обмірюваний по кренометру, записати в таблицю 1.3.1-1. Визначити  $M_{кр}$ .

1.3.3.4. При тому ж значенні  $M_{кр}$  знайти кут крену  $\theta'$ , відповідний до нестійкої рівноваги, і записати його в таблицю 1.3.1-1. Для визначення  $\theta'$  вручну та дуже обережно нахилити модель до кута, при якому вона буде перебувати в положенні хиткої рівноваги (від перекидання модель притримувати рукою).

1.3.3.5. Узяти новий вантаж, що кренить і покласти на підвіску.

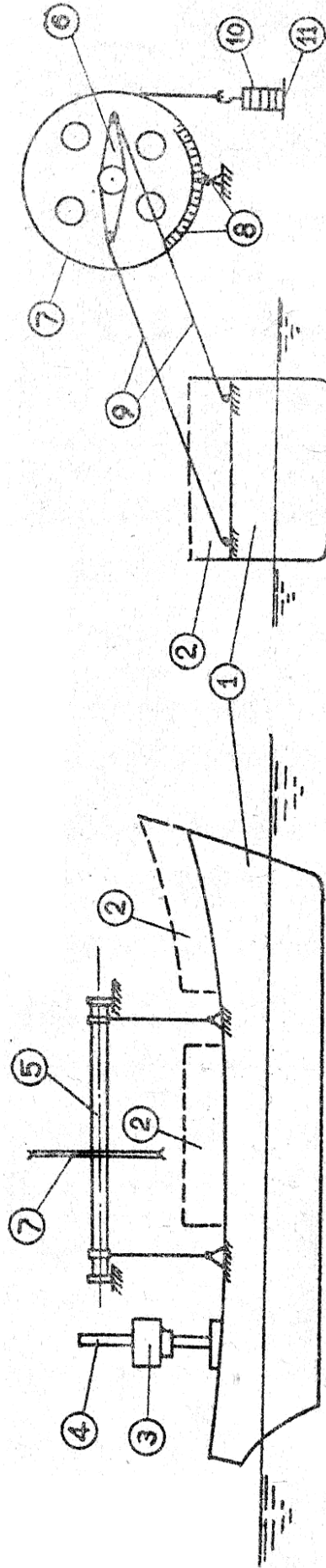


Рис. 1.3.1 Схема експериментальної установки



1.3.3.6. Повторити операції 1.3.3.3 і 1.3.3.4. При виконанні роботи слід прийняти 5-6 значень ваги вантажу, що кренить.

1.3.3.7. За даними таблиці 1.3.1-1 побудувати діаграму статичної остійності моделі (зразок див. рис. 1.3.2), визначити значення коефіцієнта остійності  $Dh_1$ , метацентричної висоти  $h_1$ , максимального моменту, що кренить  $M_{кр\max}$ , кута максимуму діаграми  $\theta_{\max}$  та кута заходу  $\theta_{зак}$ .

1.3.3.8. Перемістити вантаж (3) по напрямній (4) нагору або вниз, при цьому змінюється апліката центру ваги моделі. Записати напрям і величину переміщення.

1.3.3.9. Повторити операції 1.3.3.2 – 1.3.3.6 для моделі з новим положенням центру ваги. Результати записати в таблицю 1.3.1-2, побудувати нову діаграму статичної остійності, визначити її характеристики, зазначені в п. 1.3.3.7.

**1.3.4. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку. Слід звернути увагу на формулювання висновків щодо впливу зміни положення центру ваги моделі на характеристики діаграми статичної остійності.

### **1.3.5. Контрольні питання.**

1.3.5.1. Діаграма статичної остійності (визначення, характерні точки).

1.3.5.2. Типи діаграм статичної остійності.

1.3.5.3. Узагальнена метацентрична висота.

1.3.5.4. Визначення статичних кутів крену за допомогою діаграм статичної остійності.

**1.3.6. Література** [2. С. 76-79; 3. С.161-171; 4. С. 112-114].



## 1.4. БУКСИРУВАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛІ СУДНА

**1.4.1. Постановка задачі.** Характеристики ходовості натурального судна - буксирувальний опір і буксирувальна потужність – визначають шляхом перерахування результатів модельних випробувань. Модельні випробування - експериментальне визначення опору моделі  $r$  як функції її швидкості  $V_M$ .

При проведенні лабораторної роботи студенти знайомляться з устаткуванням дослідного басейну, з технологією виготовлення моделей, а також з методикою проведення буксирувальних випробувань для одержання залежностей буксирувальної потужності та опору від швидкості натурального судна.

### **1.4.2. Дослідні басейни.**

Дослідні басейни залежно від способу проведення випробувань підрозділяються на два типи: гравітаційного й динамометричного типу.

У басейнах гравітаційного типу модель рухається за допомогою вантажу, зв'язаного тросом з моделлю; вантаж опускається під дією сили ваги. При досягненні моделлю постійної швидкості опір визначається величиною тягнучого вантажу. Швидкість руху моделі при цьому вимірюється.

У басейнах динамометричного типу модель буксирується із заданою постійною швидкістю за допомогою візка, що переміщається по рейках. Пристрій, що з'єднує модель та візок, містить у собі динамометр; цей динамометр вимірює буксирувальний опір.

Таким чином, у басейнах гравітаційного типу задається величина опору та вимірюється відповідна йому швидкість, а в

басейнах динамометричного типу задається швидкість моделі та вимірюються відповідний до цієї швидкості буксирувальний опір.

### **1.4.3. Опис дослідного басейну ОНМУ.**

Дослідний басейн ОНМУ - гравітаційного типу, довжина басейну – 35,5 м, ширина – 6,1 м, найбільша глибина – 2,25 м (при проведенні випробувань), форма поперечного перерізу басейну – параболічна. Для проведення буксирувальних випробувань використовується буксирувальне устаткування, розгінне устаткування, устаткування запису швидкості та ін.

Схема буксирувального та розгінного устаткувань басейну показана на рис. 1.4.1.

Через більший шків ведучого блоку (1), шків приладу запису швидкості (2), відповідний шків (3) і натяжний шків (4) проходить буксирувальний замкнений сталевий трос (5). Тягнучий вантаж (6) приєднується до троса з кевлара, навитого на менший шків ведучого блоку (1). Модель (7) за допомогою поперечки із тросиком, що утворюють тросовий ромб, приєднується до нижньої частини буксирувального троса. Таке з'єднання забезпечує стійкість моделі на курсі та не перешкоджає ходовому диференту.

Відношення діаметрів шківів ведучого блоку -  $2 \div 1$ , тому зусилля  $F$ , прикладене до моделі, пов'язане з вагою  $P$  вантажу (6) співвідношенням

$$F = \frac{P}{2} - \Delta P_{TP}, \quad (1.4.1)$$

де  $\Delta P_{TP}$  - сумарна сила тертя в блоках.

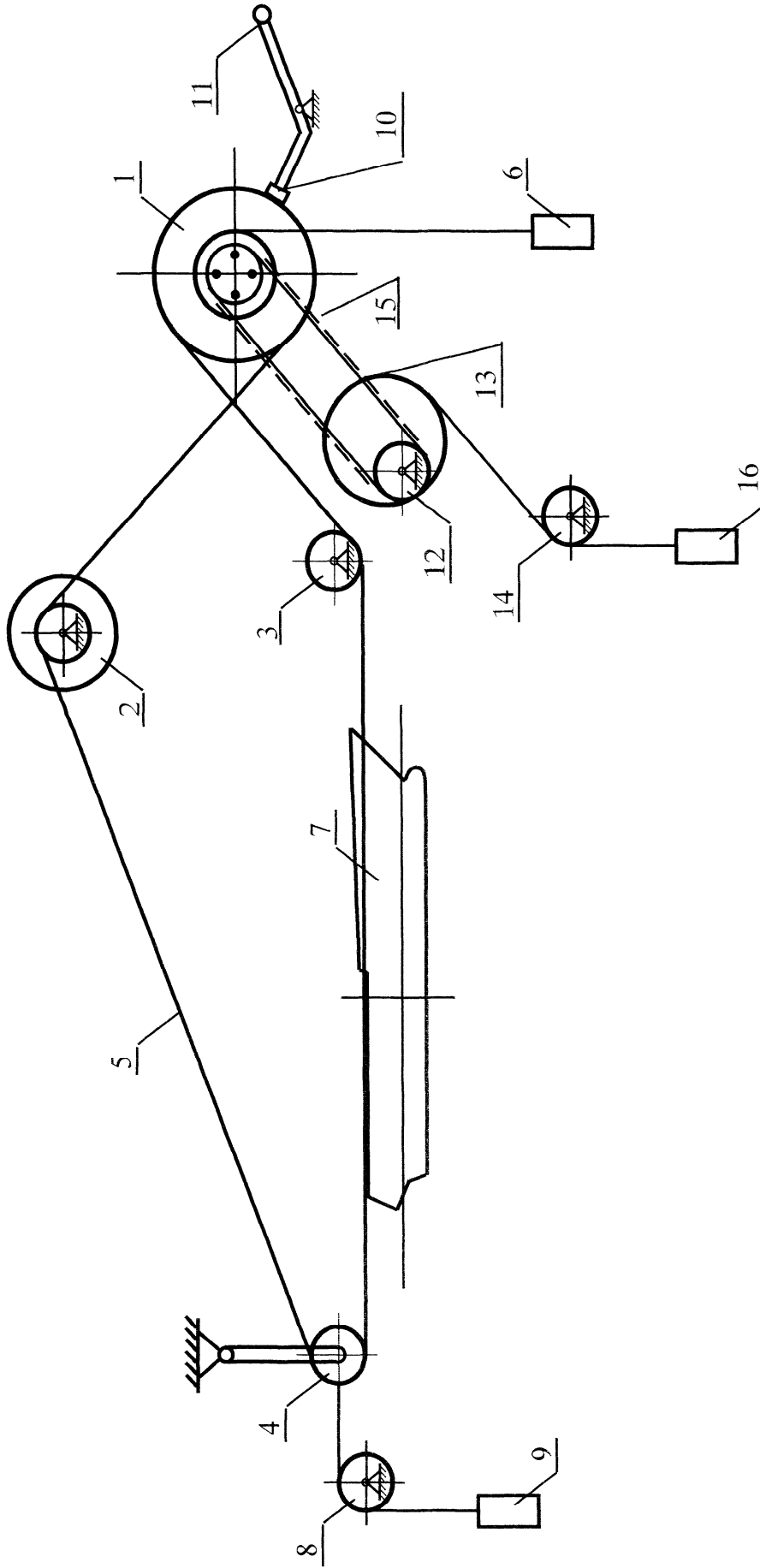


Рис. 1.4.1 Схема буксирного та розгінного устаткування дослідного басейну ОНМУ

Натяжний шків установлений у щоках на шарнірі та через блок (8) обтягається натяжним вантажем (9). Вага  $G$  натяжного вантажу вибирається такою, щоб виключити прослизання буксирувального троса по шківах. Пуск моделі здійснюється за допомогою важеля (11) пускового фрикційного гальма (10). Зупиняти модель під час її руху за допомогою пускового гальма не можна, це може привести до розриву буксирувального троса через великі сили інерції, що виникають при різкому гальмуванні моделі.

При буксирувальних випробуваннях домагаються рівномірного руху моделі в басейні: тільки за цих умов виключається вплив сил інерції, і величина опору води визначається вагою тягнучого вантажу. Модель починає рух зі стану спокою, тому добитися постійної швидкості її руху при обмеженій довжині басейну без вживання спеціальних заходів практично неможливо. Для скорочення ділянки розгону моделі застосовується розгінне устаткування.

Розгінне устаткування складається з вала (12) (з'єднаного ланцюговою передачею (15) із ведучим блоком (1)), ексцентричного шківа (13), відвідного шківа (14) і розгінного вантажу (16). Це устаткування призначене для скорочення ділянки розгону моделі від стану спокою до руху з постійною швидкістю, тому після повного обороту шківа (13) воно автоматично відключається від ведучого блоку (1). Подальший рух відбувається лише під дією тягнучого вантажу (6).

Запис швидкості здійснюється спеціальним обладнанням, з'єднаним з ПЕОМ.

#### **1.4.4. Порядок виконання роботи.**

##### 1.4.4.1. Технологія виготовлення моделей.

В дослідному басейні ОНМУ моделі для проведення буксирувальних випробувань виготовляються з пінопласту й покриваються із зовнішньої сторони сумішшю парафіну з воском, обводи доводять до повної відповідності теоретичному кресленню моделі. Контроль обробки здійснюється за допомогою шпангоутних шаблонів і шаблонів країв моделі. Відносна погрішність при виготовленні моделі - менш 1 %. Переваги таких моделей - легкість обробки, відносно невисока вартість.

Для буксирувальних випробувань, як правило, виготовляється модель «голого» корпусу по теоретичних обводах без керма, гвинта й інших виступаючих частин. На готовій моделі по обводу першого теоретичного шпангоута встановлюється дротова рамка - штучний турбулізатор. Це робиться для того, щоб режим руху води в прикордонному шарі по всій довжині моделі при порівняно невеликих числах Рейнольдса був турбулентним, як і в прикордонному шарі навколо судна. Потім модель зважується та встановлюється на воду в басейні. Для забезпечення заданої водотоннажності в модель укладається твердий баласт. Необхідна посадка моделі досягається переміщенням баласту по довжині моделі. Діюча ватерлінія повинна збігтися з ватерлінією, нанесеною на борті моделі.

##### 1.4.4.2. Техніка проведення буксирувальних випробувань.

Модель встановлюють у вихідне положення наприкінці басейну, приводять до готовності розгінне устаткування та устаткування для запису швидкості. Встановлюють тягнучий та розгінний вантажі й

пускають модель, піднявши нагору важіль пускового гальма (11). Після відключення розгінного устаткування автоматично включається запис швидкості. Гальмування й зупинка моделі здійснюються вручну. Повернення моделі у вихідне положення виконується за допомогою спеціального електромотора або вручну.

На робочій ділянці пробігу записуються швидкості моделі. Якщо виявиться, що ці значення неоднакові (тобто швидкість нестала), тоді, залишаючи вагу тягнучого вантажу незмінною, змінюють величину розгінного вантажу: збільшують, якщо швидкість зростала, зменшують, якщо швидкість падала, і повторюють пробіг. Так роблять доти, поки не доб'ються незмінності швидкості на всієї робочій ділянці пробігу моделі. Це значення швидкості й приймають у якості відповідної встановленому тягнучому вантажу.

Після цього змінюють вагу тягнучого вантажу, і роблять у тому ж порядку пробіги до одержання постійної швидкості моделі при новому значенні ваги тягнучого вантажу. За отриманими результатами випробувань будують криву опору води руху моделі залежно від швидкості (зразок - рис. 1.4.2). Для побудови такого графіка, як правило, одержують 5-6 пар значень опору  $r$  й швидкості  $V_M$ .

#### **1.4.5. Основи методики модельних випробувань і метод перерахування результатів випробувань моделі на натуру.**

1.4.5.1. Визначити опір натурального судна по опору його моделі дозволяє закон динамічної подібності. Виникаюча при русі судна (моделі) сила опору обумовлена головним чином вагомістю й



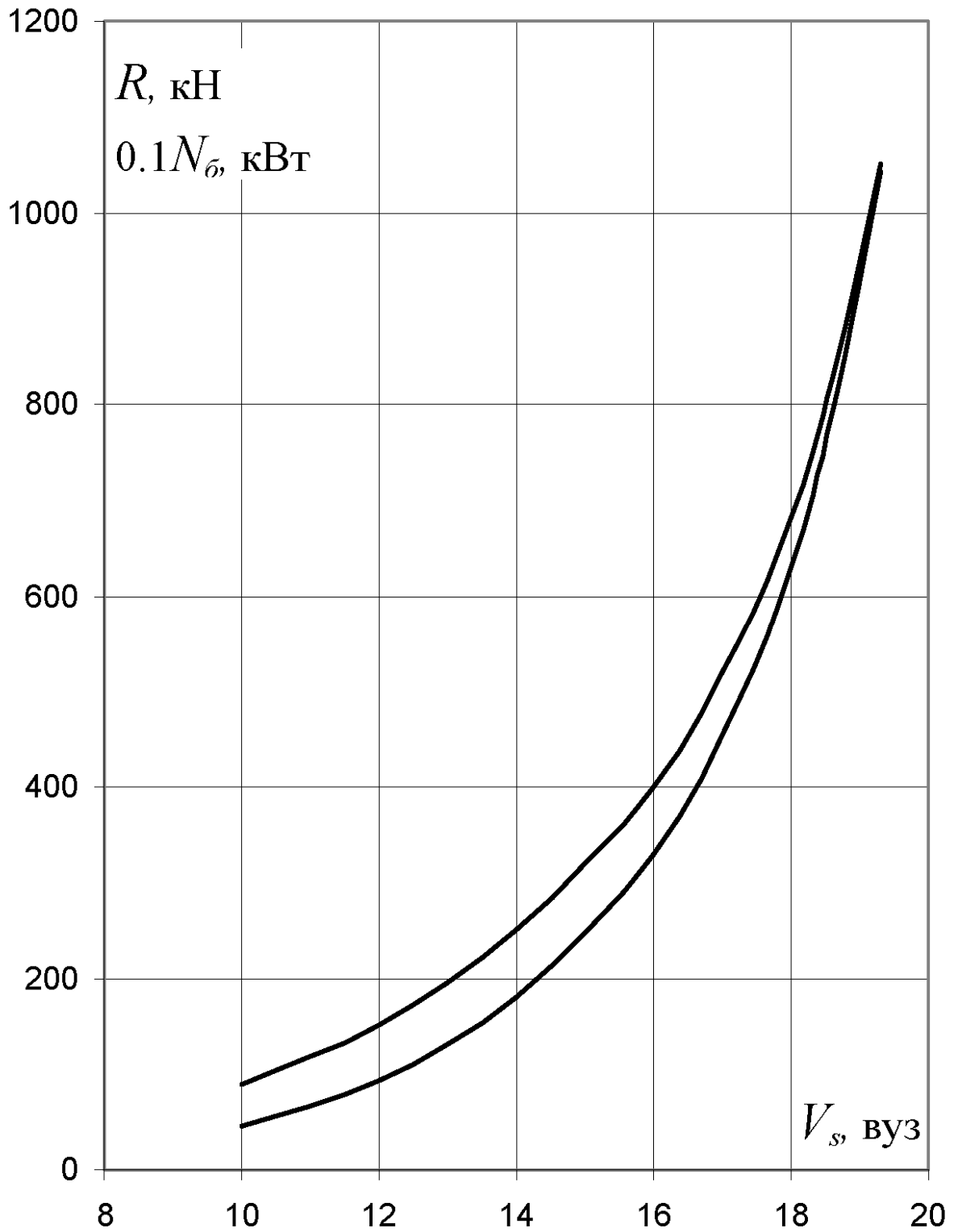


Рис. 1.4.2 Буксирувальний опір та буксирувальна потужність

в'язкістю води, отже, при випробуваннях моделі повинні виконуватися умови подібності, що враховують вплив вагомості й в'язкості води. Такими умовами є, крім геометричної подібності, рівність чисел Фруда (для сил ваги) і рівність чисел Рейнольдса (для сил в'язкості), тобто для судна й моделі повинні виконуватися рівності:

$$Fr_M = Fr_H, \text{ тобто } \frac{V_M}{\sqrt{gL_M}} = \frac{V_H}{\sqrt{gL_H}}; \quad (1.4.2)$$

$$Re_M = Re_H, \text{ тобто } \frac{V_M L_M}{\nu_M} = \frac{V_H L_H}{\nu_H}, \quad (1.4.3)$$

де індексом «М» позначені величини (швидкість та довжина), що відповідають моделі, а індексом «Н» — натурному об'єктові.

Позначивши відношення лінійних розмірів  $\lambda = \frac{L_H}{L_M}$ , одержимо:

$$V_H = V_M \sqrt{\lambda}. \quad (1.4.4)$$

Отже, для дотримання рівності чисел Фруда швидкість руху моделі повинна бути в  $\sqrt{\lambda}$  раз менше швидкості судна.

З рівності чисел Рейнольдса для швидкості судна одержимо:

$$V_H = \frac{V_M \nu_H}{\lambda \nu_M}. \quad (1.4.5)$$

Оскільки кінематичні коефіцієнти в'язкості води в дослідному басейні ( $\nu_M$ ) і в морській воді ( $\nu_H$ ) мало відрізняються, то для дотримання рівності чисел Рейнольдса швидкість моделі повинна бути приблизно в  $\lambda$  раз більше швидкості судна.

Очевидно, що одночасна рівність чисел Фруда та чисел Рейнольдса при випробуваннях моделі нездійсненна: розміри моделі довелося б брати такими ж, як і судна й випробовувати її при швидкостях, рівних швидкостям судна. Тому в основу методики модельного експерименту покладена гіпотеза про те, що повний опір судна (моделі) складається із двох частин: одної, що залежить тільки від вагомості, і другої, що залежить тільки від в'язкості води:

$$R = R_1(Fr) + R_2(Re). \quad (1.4.6)$$

Користуючись цією гіпотезою, випробування проводять так, щоб динамічна подібність була дотримана тільки у відношенні однієї частини опору. При цьому інша частина опору й для моделі, і для судна визначається яким-небудь іншим методом.

Відомо, що опір тертя, обумовлений в'язкістю води, може бути визначений розрахунковим шляхом. Тому в якості частини опору  $R_2(Re)$  в (1.4.6) береться опір тертя судна (моделі). Вважається, що цей опір дорівнює опору пластини, що має довжину, площу змоченої поверхні та швидкість, рівні відповідно довжині, площі змоченої поверхні та швидкості судна (моделі). Така пластинка називається еквівалентною.

Частина опору, рівна різниці повного опору та опору пластини, називається залишковим опором

$$R_O = R - R_{ПЛ}. \quad (1.4.7)$$

Вплив кривизни суднової поверхні на опір тертя невеликий. При дотриманні геометричної подібності можна вважати, що він однаковий для моделі та судна, і включати в залишковий опір. Вплив

шорсткості суднової поверхні на опір тертя враховується введенням спеціальної надбавки на шорсткість. Для моделі, поверхня якої гладка, надбавка на шорсткість не вводиться.

При вивченні повного опору  $R$  його прийнято розглядати як суму трьох складових: опору тертя  $R_{TP}$ , опору форми  $R_{\Phi}$  й хвильового опору  $R_{XB}$ :

$$R = R_{TP} + R_{\Phi} + R_{XB}. \quad (1.4.8)$$

Таким чином, у залишковий опір  $R_O$ , крім хвильового опору  $R_{XB}$ , обумовленого вагомистю рідини (підкоряється закону подібності Фруда), входить також і виникаючий через в'язкість води опір форми  $R_{\Phi}$ , для подібності якого необхідне дотримання рівності чисел Рейнольдса. Однак, як показують численні дослідження, при числах Рейнольдса, більших деякого граничного значення  $Re_{IPR}$ , опір форми  $R_{\Phi}$  змінюється по такому ж закону, що й хвильовий опір. Отже, при дотриманні умови  $Re_M > Re_{IPR}$  об'єднання опору форми  $R_{\Phi}$  та хвильового опору  $R_B$  в залишковий  $R_O$  цілком припустимо. Більші значення числа Рейнольдса при випробуваннях моделі досягаються шляхом відповідного вибору масштабу моделі. Розміри моделі беруться можливо більшими, але такими, щоб виключити вплив границь басейну.

1.4.5.2. Опір судна за результатами модельних випробувань може бути визначений так. При випробуваннях моделі дотримують вимоги про подібність тільки по залишковому опору, тобто витримують однакові значення чисел Фруда для судна й моделі.

Вимірявши повний опір моделі  $r$  та виключивши з нього знайдений розрахунковим шляхом опір еквівалентної пластини  $r_{ПЛ}$ , одержують залишковий опір  $r_O$ , який за законом подібності Фруда перераховують у залишковий опір натурального судна  $R_O$ .

До знайденого в такий спосіб опору  $R_O$  додають опір пластини, еквівалентної судну  $R_{ПЛ}$ , знайдений розрахунковим шляхом.

При дотриманні умов динамічної подібності течій повні опори судна та моделі і їх складові визначаються по загальній формулі для опору тіл, що рухаються в рідині:

$$\begin{aligned} R &= \zeta_H \frac{\rho_H}{2} \Omega_H V_H^2; \\ r &= \zeta_M \frac{\rho_M}{2} \Omega_M V_M^2, \end{aligned} \quad (1.4.9)$$

де  $\rho_H, \rho_M$  - масова густина води в морі й басейні;

$\Omega_H, \Omega_M$  - площа змоченої поверхні судна й моделі;

$V_H, V_M$  - швидкість руху судна й моделі;

$\zeta_H, \zeta_M$  - коефіцієнт опору судна й моделі.

Якщо динамічна подібність дотримується, то ці коефіцієнти рівні:

$$\zeta_H = \zeta_M = \zeta. \quad (1.4.10)$$

Оскільки при буксирувальних випробуваннях моделі виконуються умови подібності тільки відносно залишкового опору, то для моделі й судна однаковими будуть коефіцієнти залишкового опору:

$$\zeta_{OH} = \zeta_{OM} = \zeta_O. \quad (1.4.11)$$

### **1.4.6. Методика обробки експериментальних даних.**

Перерахування результатів випробувань моделі на натурне судно виконують у такій послідовності:

1.4.6.1. За результатами випробувань моделі будується залежність опору моделі від її швидкості  $r = r(V_M)$  (зразок див. рис. 1.4.2).

1.4.6.2. Обчислюються коефіцієнти повного опору моделі за формулою

$$\zeta_M = \frac{2r}{\rho_M \Omega_M V_M^2}. \quad (1.4.12)$$

1.4.6.3. Обчислюються числа Рейнольдса для моделі

$$\text{Re}_M = \frac{V_M L_M}{\nu_M}. \quad (1.4.13)$$

1.4.6.4. Залежно від чисел Рейнольдса знаходять коефіцієнти тертя еквівалентної пластини  $(\zeta_{fo})_M$ . Для цього у вітчизняній практиці вживається формула Прандтля-Шліхтінга

$$\zeta_{fo} = \frac{0.455}{(\lg \text{Re})^{2.58}}. \quad (1.4.14)$$

1.4.6.5. Визначаються коефіцієнти залишкового опору моделі

$$\zeta_{OM} = \zeta_M - (\zeta_{fo})_M. \quad (1.4.15)$$

При рівності чисел Фруда ці коефіцієнти дорівнюють коефіцієнтам залишкового опору судна.

1.4.6.6. Зі співвідношення, що випливає з рівності чисел Фруда, визначаються швидкості судна  $V_H$ , відповідні до швидкостей моделі  $V_M$  - по формулі (1.4.4).

1.4.6.7. Обчислюються числа Рейнольдса для натурального судна

$$\text{Re}_H = \frac{V_H L_H}{\nu_H}. \quad (1.4.16)$$

1.4.6.8. Залежно від чисел Рейнольдса визначаються значення коефіцієнтів тертя пластини, еквівалентної натурному об'єкту (судну) -  $(\zeta_{fo})_H$ .

1.4.6.9. Обчислюються коефіцієнти повного опору судна

$$\zeta_H = (\zeta_{fo})_H + \zeta_O + \Delta\zeta_{III}, \quad (1.4.17)$$

де  $\Delta\zeta_{III}$  - коефіцієнт надбавки на шорсткість суднової поверхні

$$\Delta\zeta_{III} = (0.3 \div 0.5) \cdot 10^{-3}. \quad (1.4.18)$$

1.4.6.10. Визначаються повний (буксирувальний) опір і буксирувальна потужність судна

$$R = \zeta_H \frac{\rho_H V_H^2}{2} \Omega_H, \quad \text{кН}, \quad (1.4.19)$$

$$N_{\delta} = R V_H, \quad \text{кВт}. \quad (1.4.20)$$

При відсутності даних про площу змоченої поверхні судна (моделі) можна використовувати наближені формули:

- для морських суден з великим коефіцієнтом повноти водотоннажності - формулу Семеки:

$$\Omega = LT \left[ 2 + 1.37(\delta - 0.274) \frac{B}{T} \right]; \quad (1.4.21)$$

- для суден з коефіцієнтом повноти водотоннажності  $\delta < 0.6$  - формулу Мумфорда з коефіцієнтами Мурагіна

$$\Omega = LT \left[ 1.36 + 1.13\delta \frac{B}{T} \right]. \quad (1.4.22)$$

Коефіцієнти кінематичної в'язкості:

- для морської води при температурі  $4^\circ C$   $\nu = 1.61 \cdot 10^{-6} \frac{m^2}{c}$

- для води у басейні залежно від температури визначається по таблиці 1.4.1.

Таблиця 1.4.1 Коефіцієнти кінематичної в'язкості прісної води

$t, ^\circ C$	0	5	10	15
$\nu, \frac{m^2}{c}$	$1.78 \cdot 10^{-6}$	$1.52 \cdot 10^{-6}$	$1.31 \cdot 10^{-6}$	$1.14 \cdot 10^{-6}$
$t, ^\circ C$	20	25	30	40
$\nu, \frac{m^2}{c}$	$1.01 \cdot 10^{-6}$	$0.90 \cdot 10^{-6}$	$0.80 \cdot 10^{-6}$	$0.67 \cdot 10^{-6}$

Густина води приймається:

- для води у басейні  $\rho_M = 102 \frac{кгс \cdot c^2}{m^4}$ , якщо розмірність опору моделі  $r = r(V_M)$  -  $кгс$ , або  $\rho_M = 1.00 \frac{кН \cdot c^2}{m^4}$ , якщо розмірність опору моделі  $кН$ ;



- для морської води  $\rho_H = 1.025 \frac{\kappa H \cdot c^2}{m^4}$ .

1.4.6.11. Обчислюється швидкість судна у вузлах

$$V_S = 1.945V_H, \text{ вуз.} \quad (1.4.23)$$

Розрахунки за наведеною схемою виконуються в табличній формі (див. табл. 1.4.2).

**1.4.7. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку.

#### **1.4.8. Контрольні питання.**

1.4.8.1. Гравітаційні дослідні басейни.

1.4.8.2 Динамометричні дослідні басейни.

1.4.8.3. Обладнання дослідного басейну ОНМУ.

1.4.8.4. Призначення розгінного устаткування.

1.4.8.5. Геометрична, кінематична та динамічна подібність течій рідини.

1.4.8.6. Складові опору судна.

1.4.8.7. Особливості експериментального визначення опору рухові судна.

1.4.8.8. Опір тертя. Еквівалентна пластина.

1.4.8.9. Коефіцієнт опору.

1.4.8.10. Буксирувальна потужність.

1.4.8.11. Моделі суден – розміри, особливості виготовлення.

1.4.8.12. Призначення турбулізаторів.

**1.4.9. Література** [2.С. 88-96; 3.С. 159-176, 179-190].

## 1.5. ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГРЕБНОГО ГВИНТА

**1.5.1. Постановка задачі.** Під час виконання лабораторної роботи визначаються геометричні елементи готового гребного гвинта: діаметр, крок, розміри маточини, число лопатей, напрям обертання; також треба накреслити спрямлену поверхню лопаті та обчислити дискове відношення.

Число лопатей і напрям обертання гвинта визначається візуально. Розміри маточини та діаметр гвинта визначаються безпосереднім виміром, крок і дискове відношення обчислюються по вимірюваних величинах.

У якості кроку лопаті гвинта звичайно приймають середній крок гвинтових ліній, що утворюють нагнітальну поверхню лопаті. Тому визначення кроку зводиться до виміру кроку гвинтових ліній на декількох обраних радіусах. Якщо нагнітальна поверхня є правильною гвинтовою лінією (так найчастіше й буває), то крок гвинтової лінії на будь-якому радіусі дорівнює місцевому кроку. Місцевий крок – крок дуги гвинтової лінії на ділянці між будь-якими двома точками на ній.

На заданому радіусі  $r$  (рис. 1.5.1) місцевий крок визначається відношенням:

$$H_{MN} = \frac{360^\circ}{\alpha^\circ} h, \quad (1.5.1)$$

де  $\alpha^\circ$  - центральний кут, обмірюваний у площині, перпендикулярній осі гвинта;

$h$  - величина підйому по вертикалі гвинтової лінії на ділянці  $MN$ .

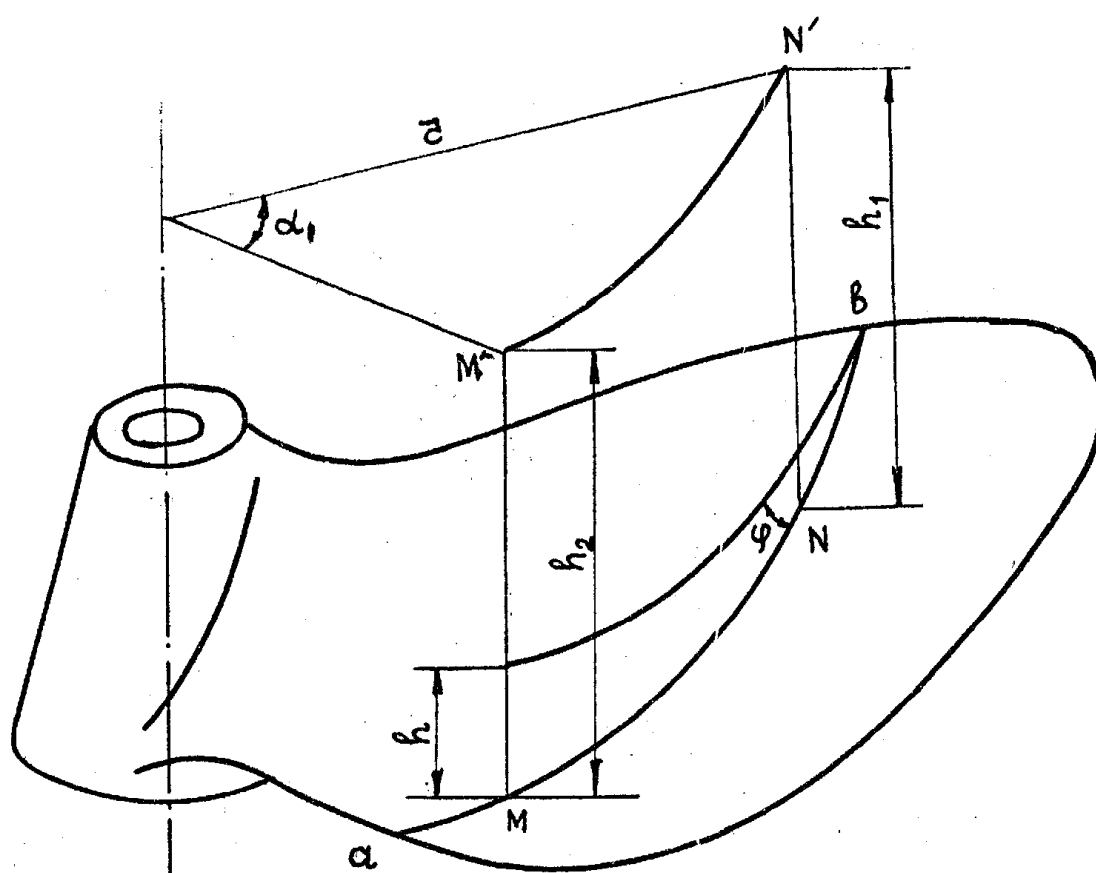


Рис. 1.5.1 Вимірювані характеристики лопаті

У якості точок  $M$  і  $N$  можуть бути взяті крайки лопаті гвинта (точки  $a$  та  $b$ ) на обраному радіусі.

### 1.5.2. Опис установки.

Спосіб визначення місцевого кроку по формулі (1.5.1), пов'язаний з визначенням положення гвинтової лінії в циліндричній системі координат  $(h, \alpha)$ , називається координатним. Для цього використовується стендовий крокомір (рис. 1.5.2).

У найпростішому виконанні крокомір складається з вала (4), який за допомогою спеціального патрона (2) (або гайок і конусів) установлюється на маточині (2) точно по осі гвинта.

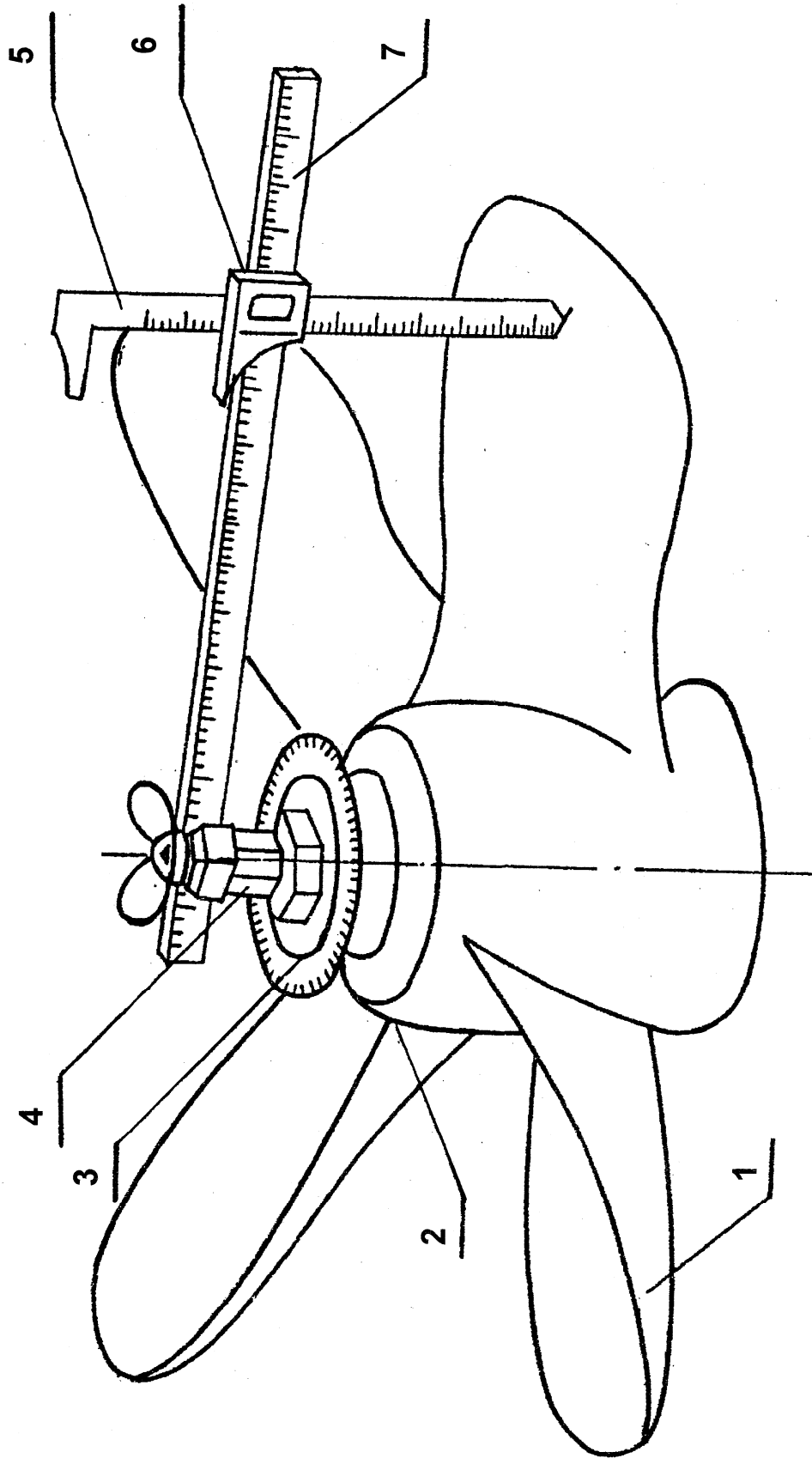


Рис. 1.5.2 Схема установки

Навколо вала обертається горизонтальна рейка (7). Кут повороту рейки визначається за допомогою лімба з ноніусом (3). Уздовж рейки переміщається каретка (6), у напрямних якої паралельно осі гвинта рухається лінійка (5) з ноніусом, що дозволяє точно фіксувати її вертикальні переміщення під час обміру лопаті (1).

### **1.5.3. Порядок виконання роботи.**

1.5.3.1. Обмір лопаті за допомогою координатного крокоміра.

1.5.3.1.1. Зафіксувати обраний радіус перетину лопаті  $r_i$ .

1.5.3.1.2. Підвести кінець вертикальної лінійки (5) (див. рис. 1.5.3) до зіткнення з поверхнею лопати в однієї з її крайок (точка  $a$  рис. 1.5.2) і відзначити кут  $\alpha_{ai}$ , відповідний до цього положення, і відстань по вертикалі  $h_{ai}$ . Результати записати в таблицю 1.5.1.

1.5.3.1.3. Підвести кінець вертикальної лінійки (5) до іншої крайки (точка  $b$  рис. 1.5.2) і відзначити відповідний кут  $\alpha_{bi}$  і відстань по вертикалі  $h_{bi}$ . Результати записати в таблицю 1.5.1.

1.5.3.1.4. Крок гвинта на даному радіусі  $H_{ri}$  визначається по формулі (1.5.1), де значення  $h$  та кута повороту вертикальної рейки  $\alpha^\circ$  визначаються як різниці відповідних значень у точках  $a$  і  $b$  (таблиця 1.5.1).

1.5.3.1.5. Довжина дуги гвинтової лінії  $ab$  визначається по формулі

$$ab = \sqrt{h^2 + \left( r \frac{\alpha^\circ}{57.3^\circ} \right)^2}. \quad (1.5.2)$$

1.5.3.1.6. Повторити такі виміри в 5-6 перетинах лопаті, одержати значення кроку на різних радіусах перетинів.

1.5.3.1.7. Середній крок лопаті визначається як середнє арифметичне зі значень кроків розглянутих перетинів:

$$H = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n H_{ri}. \quad (1.5.3)$$

1.5.3.2. Побудова контуру спрямленої проекції лопаті і визначення дискового відношення.

За даними таблиці 1.5.1 будується контур спрямленої лопаті (зразок див рис. 1.5.3).

1.5.3.2.1. На вертикально розташованій осі від обраної точки  $O$  відкласти відстані, відповідні до радіусів  $r_i$ , на яких визначався крок гвинтової лінії, радіус маточини  $\frac{d}{2}$  та радіус гвинта  $\frac{D}{2}$ .

1.5.3.2.2. Через отримані точки  $O_i$  провести горизонтальні прямі. Вправо та уліво від точок  $O_i$  відкласти в прийнятому масштабі половини дуг  $a_i b_i$  для спрямленого контуру (тобто  $a_i O_i = O_i b_i$ ).

1.5.3.2.3. Точки  $a_1, \dots, a_i, \dots, K, \dots, b_i, \dots, b_1$  з'єднати кривою і продовжити її плавно до перетинання з горизонтальною прямою  $a_0 b_0$ , проведеною на відстані  $\frac{d}{2}$  від осі гвинта.

1.5.3.2.4. Визначити площу  $A$  отриманого контуру, яка рівновелика спрямленої проекції лопаті, і дискове відношення по формулі:

$$\theta = \frac{zA}{A_d} = \frac{4zA}{\pi D^2}, \quad (1.5.4)$$

- де  $z$  - число лопатей гвинта;  
 $A$  - площа контуру спрямленої проекції однієї лопаті;  
 $A_d$  - площа диска гвинта.

Для визначення площі  $A$  можна скористатися наближеним методом, показаним на рис. 1.5.3. Площа, обмежена криволінійним контуром, замінюється рівновеликим прямокутником. У прийнятому масштабі

$$A = S \frac{D-d}{2}. \quad (1.5.5)$$

**1.5.4. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку.

#### **1.5.5. Контрольні питання.**

1.5.5.1. Основні елементи гребного гвинта.

1.5.5.2. Геометричні характеристики гребного гвинта.

1.5.5.3. Безрозмірні геометричні характеристики гребного гвинта.

1.5.5.4. Геометричні характеристики лопаті гребного гвинта.

**1.5.6. Література** [1.С. 18-33; 2.С. 142-147].

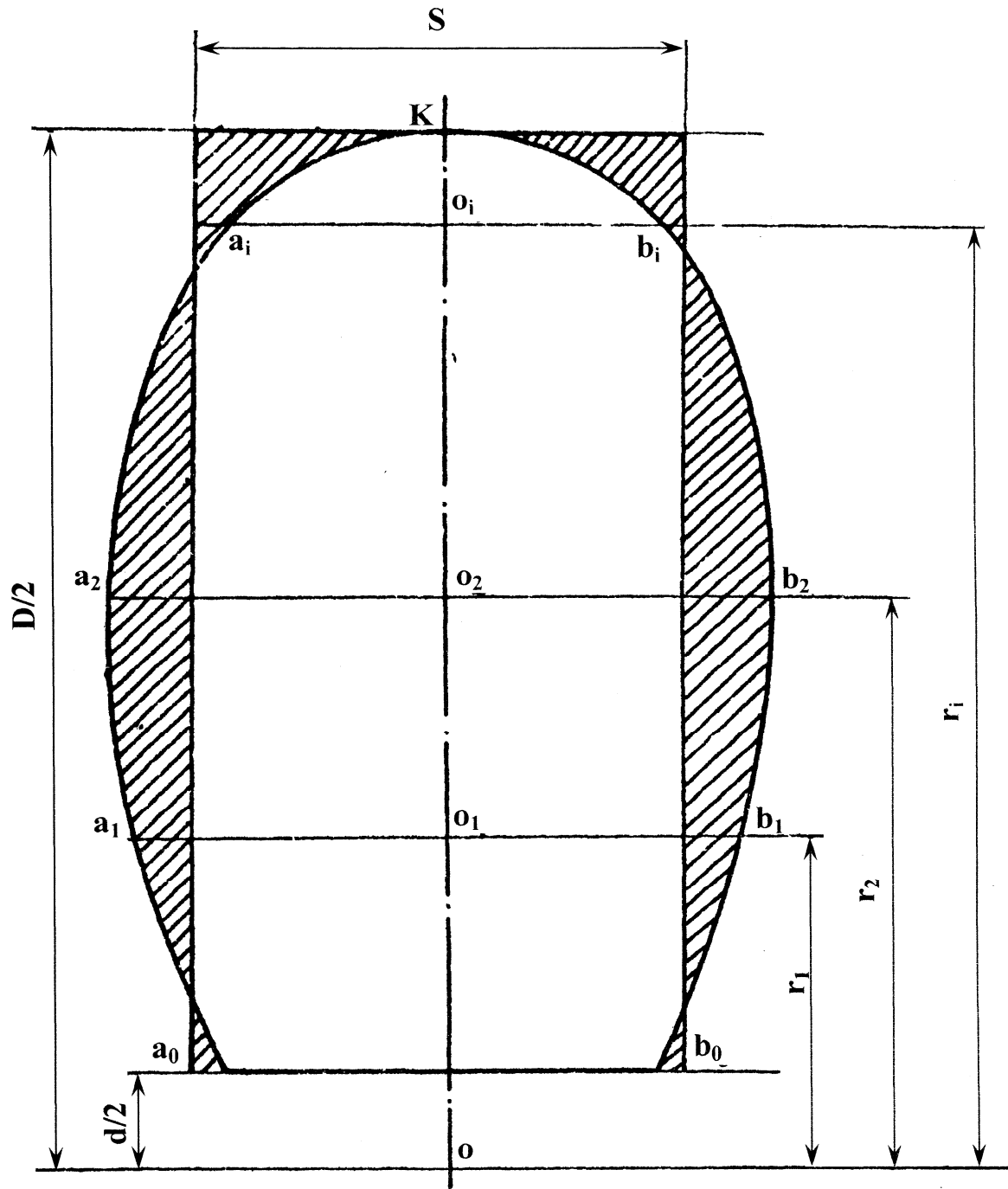


Рис. 1.5.4 Наближене визначення площі спрямленої лопаті



## 1.6. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ГРЕБНОГО ГВИНТА

**1.6.1. Постановка задачі.** Шляхом проведення модельних випробувань в дослідному басейні визначаються значення коефіцієнтів упору  $K_1$  та моменту  $K_2$  моделі гребного гвинта як функції відносної ходи  $\lambda_p$ . Вимірюються наступні параметри:

$P$  - величина упору гвинта;

$M$  - величина моменту гвинта;

$n$  - частота обертання (число оборотів) гвинта;

$V_p$  - швидкість переміщення гвинта вздовж осі обертання.

Визначення характеристик гребних гвинтів базується на експериментальних даних, отриманих при випробуваннях їх моделей. При проведенні таких експериментів повинні бути забезпечені геометрична, кінематична й динамічна подібність гвинтів і їх моделей.

При дотриманні динамічної подібності

$$\frac{P_M}{P_H} = \frac{\rho_M V_M^2 L_M^2}{\rho_H V_H^2 L_H^2}, \quad (1.6.1)$$

де індекс «М» ставиться до характеристик моделі, індекс «Н» - до характеристик натурального об'єкта,  $\rho$  - масова густина води,  $L_M, L_H$  - характерні лінійні розміри (діаметри  $D$ ) моделі й гвинта, а швидкості  $V_M, V_H$  визначаються швидкістю обертання гвинта. Тоді

$$\frac{P_M}{\rho_M n_M^2 D_M^4} = \frac{P_H}{\rho_H n_H^2 D_H^4} = K_1; \quad (1.6.2)$$

$$\frac{M_M}{\rho_M n_M^2 D_M^5} = \frac{M_H}{\rho_H n_H^2 D_H^5} = K_2. \quad (1.6.3)$$

Таким чином, при дотриманні динамічної подібності рівні коефіцієнти упору  $K_1$  та моменту  $K_2$  гвинта і його моделі.

Необхідною умовою динамічної подібності є геометрична подібність, тобто у гвинта і його моделі повинні бути однаковими дискові відношення  $\theta$ , число лопатей  $z$ , відносні товщини, крокове відношення при однаковій формі контуру лопаті та ін.

З умов кінематичної подібності випливає сталість відношень схожих швидкостей – поступальної швидкості  $V_P$  та окружної швидкості  $\pi n D$  гвинта і його моделі. Тоді

$$\frac{V_{PM}}{n_M D_M} = \frac{V_{PH}}{n_H D_H} = \lambda_P. \quad (1.6.4)$$

Отже, відносні ходи гвинта і його моделі однакові.

Крім того, відповідно до теорії подібності у гвинта і його моделі повинні бути рівними числа Рейнольдса. Оскільки при випробуванні моделі та в умовах експлуатації реальних гвинтів коефіцієнти кінематичної в'язкості середовища  $\nu$  практично рівні, то рівність чисел Рейнольдса можна записати у вигляді:

$$V_M D_M = V_H D_H \Rightarrow \pi n_M D_M^2 = \pi n_H D_H^2. \quad (1.6.5)$$

Тоді

$$n_M = n_H \left( \frac{D_H}{D_M} \right)^2. \quad (1.6.6)$$

Упор моделі при цьому дорівнює упору натурального гвинта, що технічно нездійсненне.

Установлене, що при випробуваннях моделі із числами Рейнольдса  $Re > 4 \cdot 10^5$  дані експериментів виходять стабільними та надійними.

Число Рейнольдса для гвинта визначається по формулі:

$$Re = \frac{\pi n D}{\nu} b_{cp}, \quad (1.6.7)$$

де  $b_{cp}$  - середня ширина лопаті.

Для виключення впливу вільної поверхні на гідродинамічні сили вісь гребного гвинта повинна бути занурена на 1,0-1,5 його діаметра. Це дозволяє виключити число Фруда з визначальних критеріїв.

### **1.6.2. Опис експериментальної установки.**

Кінематична схема експериментальної установки наведена на рис. 1.6.1. У корпусі (1) розміщені наступні основні функціональні вузли:

- привід (2) обертання гребного гвинта;
- валопровід, з'єднаний з редуктором (3);
- дейдвудне обладнання (4), що включає гребний вал (5), до якого кріпиться досліджувана модель гребного гвинта (6);
- датчик (7) числа оборотів гребного вала;
- датчик (8) величини обертаючого моменту;
- датчик (9) величини упору гребного гвинта.

Корпус (1) прикріплений до візка (10), що має можливість переміщатися уздовж басейну по рейковій напрямній (11) за допомогою механізму пересування, розташованого на стінці басейну.

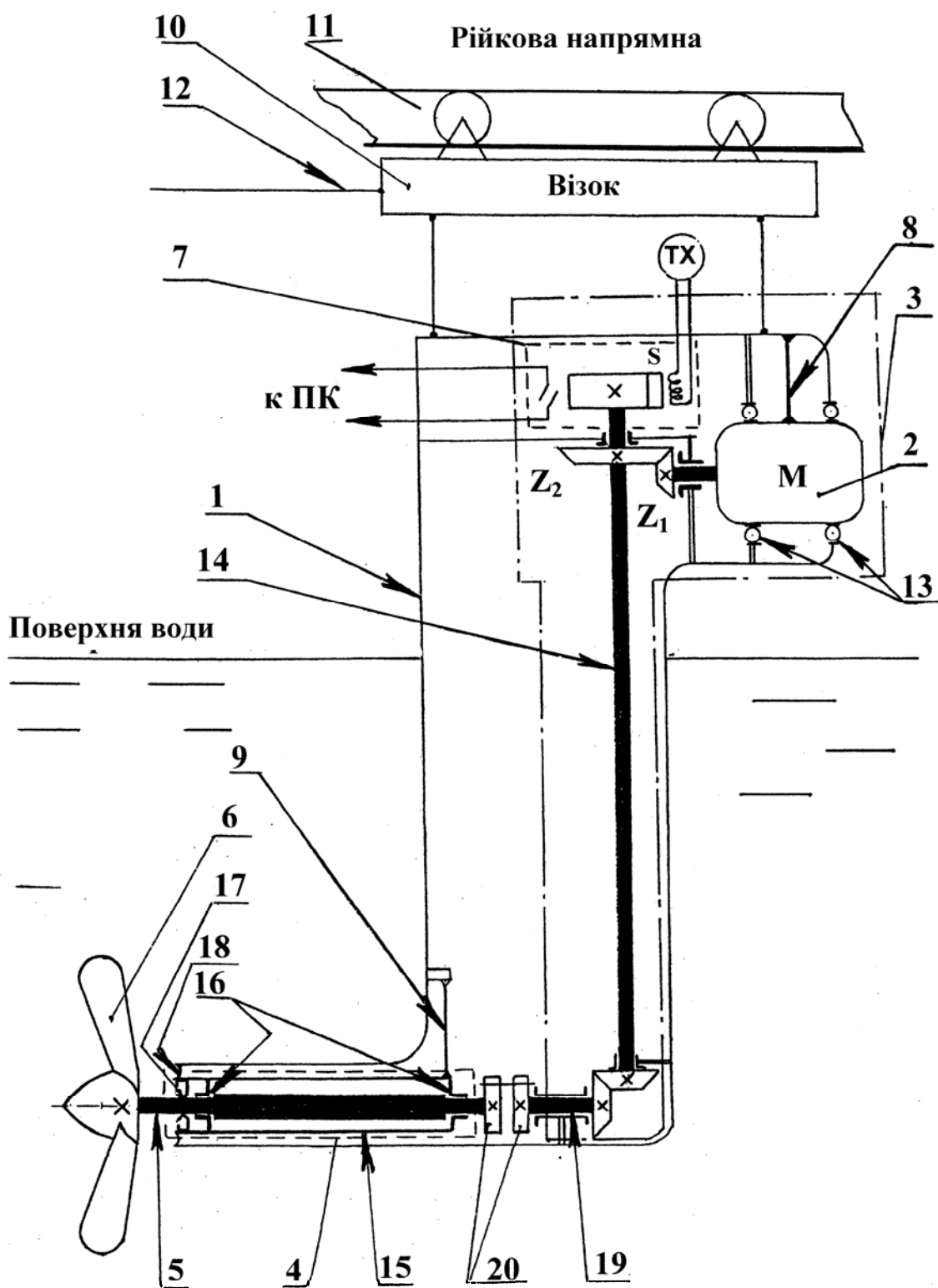


Рис. 1.6.1 Кінематична схема експериментальної установки

У складі цього механізму є датчик лінійної швидкості. Механізм пересування пов'язаний з візком (10) тягнучими тросами (12).

Привід (2) складається з електродвигуна змінного струму з короткозамкненим ротором, з'єднаного кабелем з апаратурою керування частотою обертання.

Оскільки для прямого визначення обертаючого моменту безпосередньо на моделі гребного гвинта (6) потрібно дуже складна й дорога апаратура, то в процесі експерименту вимірюється реактивний момент, що виробляє електродвигун. Для цього статор електродвигуна закріплений на корпусі (1) кульковими опорами (13), які дозволяють статору вільно обертатися навколо своєї осі й одночасно фіксують його положення уздовж осі.

Тензометричний датчик (8) величини обертаючого моменту розташований у місці кріплення статора двигуна (2) до корпусу (1), фіксуючи його. Цей датчик дозволяє виміряти виникаючий реактивний момент на статорі електродвигуна.

Для зручності спостереження та проведення вимірів, а також узгодження частоти обертання з характеристиками гвинта, електродвигун (2) розміщений вище ватерлінії й кінематично з'єднаний із гребним валом (5) за допомогою подвійного редуктора з конічними шестірнями  $z_1, z_2, z_3, z_4$  й подовженим проміжним валом (14). Таким чином, частота обертання гребного вала (5) і моделі гвинта (6)  $n_B$  пов'язана із частотою обертання  $n_{ДВ}$  ротора електродвигуна (2) співвідношенням  $n_B = n_{ДВ}k$ , де

$$k = \frac{z_1}{z_2} \cdot \frac{z_3}{z_4} = \frac{20}{60} \cdot \frac{20}{20} = \frac{1}{3} - \text{передаточне число редуктора.}$$

Оскільки  $z_3 = z_4$ , то частота обертання проміжного вала (14) збігається із частотою обертання гребного вала (5). Торець вала (14) міститься вище ватерлінії, до нього прикріплений датчик (7) числа оборотів гребного вала, що має імпульсний (числовий) вихід для приєднання до ПЕОМ і лінійний вихід для приєднання до стрілочного індикатору (останній позначений «ТХ» на рис. 1.6.1 і служить для візуального спостереження за частотою обертання гвинта).

Дейдвудне обладнання (4) складається із труби (15), у якій на кулькових опорах (16) розміщений вал (5). Опори (16) дозволяють валу (5) обертатися, але перешкоджають осьовим переміщенням відносно дейдвудної труби. Із зовнішньої сторони дейдвудного обладнання в зазорі між валом (5) і дейдвудною трубою (15) міститься манжетне гумове ущільнення (17), що захищає підшипники від влучення води. Зазор між корпусом (1) і дейдвудною трубою (15) герметизований пружною металевою мембраною (18), яка одночасно фіксує радіальне положення зовнішнього кінця дейдвудної труби й дозволяє їй зміщатися уздовж осі. Внутрішній кінець дейдвудної труби зафіксований тензометричним датчиком упору (9) гребного вала, що реагує на осьове зусилля.

Гребний вал (5) з'єднаний з вихідним валом (19) редуктора за допомогою ковзної муфти (20), що забезпечує передачу крутного моменту при вільному взаємному осьовому переміщенні торців валів, що з'єднуються.

Частота обертання приводного двигуна змінного струму установки задається перетворювачем частоти змінного струму у діапазоні від 0 до 60 Гц через 0.1 Гц.

Швидкість поступального переміщення гвинта, рівна швидкості руху візка (10), визначається за стандартною методикою дослідного

басейну, результат виміру швидкості візка зберігається у файлі ПЕОМ.

### **1.6.3.Калібрування експериментальної установки.**

1.6.3.1. З метою калібрувальних вимірів необхідно визначити значення моменту тертя для фіксованих значень частоти обертання гребного гвинта в діапазоні від 0 до 10 об/с через 1 об/с. Виміри проводяться без моделі гвинта, по їхніх результатах будується графік залежності моментів тертя від частоти обертання гребного гвинта  $M_{тр} = M_{тр}(n)$ , ця залежність називається характеристикою холостого ходу (приклад – рис. 1.6.2).

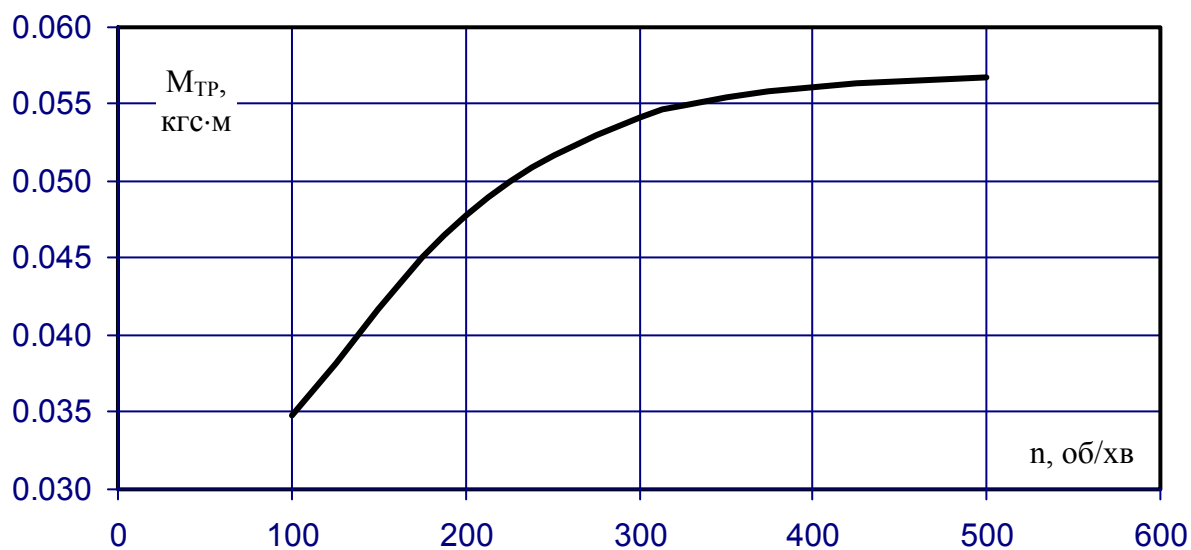


Рис. 1.6.2 Залежність моменту тертя від числа оборотів вала  
(характеристика холостого ходу)

1.6.3.2. Для калібрування датчика упору застосовується калібрувальний вантаж. До обтічника гвинта за допомогою спеціального кутового важеля, шарнірно прикріпленого до рейкових напрямних (рис. 1.6.3) прикладається калібрувальний вантаж.

Послідовність дій:

1.6.3.2.1. Закріпити тяговий візок на рейкових напрямних.

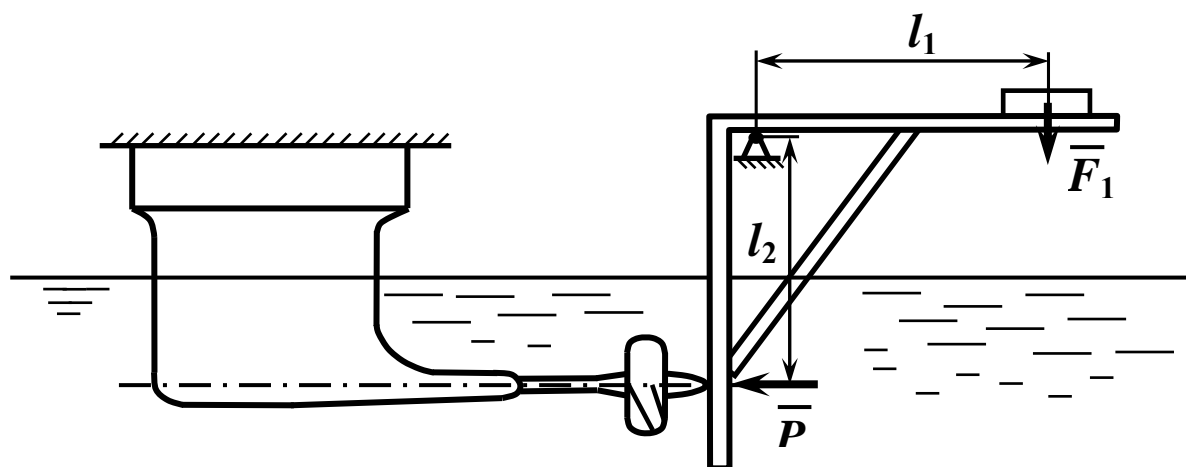


Рис. 1.6.3 Схема калібрування датчика упору

1.6.3.2.2. Прикріпити до напрямних основу кутового важеля так, щоб вертикальний стрижень упирався в торець обтічника гвинта.

1.6.3.2.3. Виміряти рулеткою відстань по горизонталі  $l_1$  від осі обертання важеля до центру ваги каліброваного вантажу (вага якого дорівнює заданій величині  $F_1$ ) і відстань по вертикалі  $l_2$  від осі обертання важеля до осі обертання гвинта.

1.6.3.2.4. Включити вимірювальну систему, потім ПЕОМ, відзначити нульову точку; послідовно, за допомогою важків збільшувати величину  $F_1$  й визначати величину упору  $P$  із залежності

$$P = \frac{F_1 l_1}{l_2}. \quad (1.6.8)$$

1.6.3.3. Для калібрування датчика моменту необхідно:



1.6.3.3.1. Виміряти рулеткою відстань по горизонталі  $l_3$  від осі обертання електродвигуна (2) до точки підвісу вантажу  $F_3$  на важелі, привареного до корпусу електродвигуна (рис. 1.6.4).

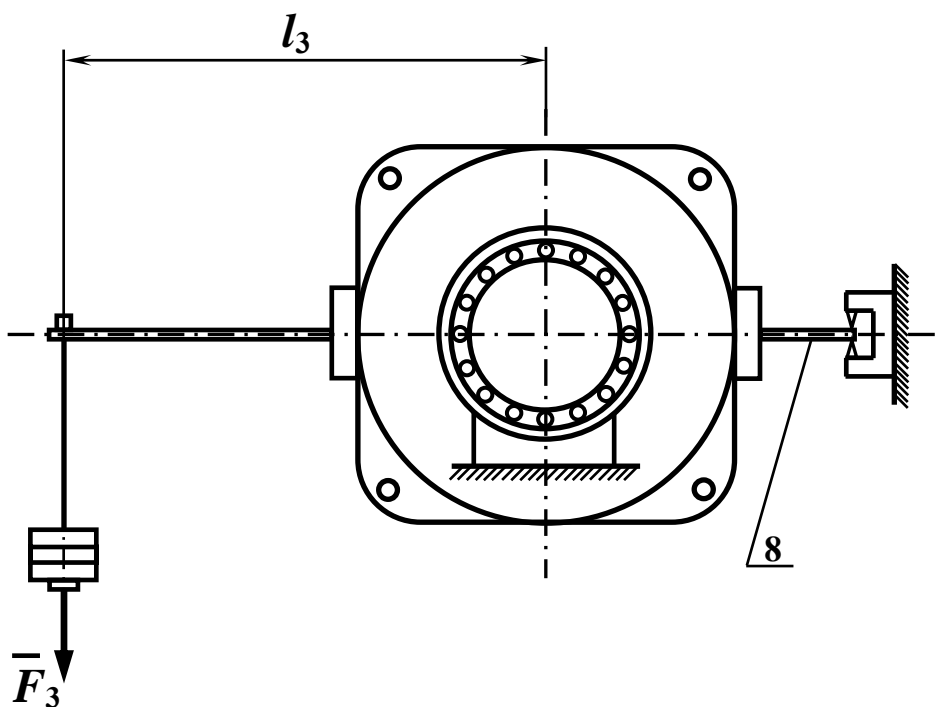


Рис. 1.6.4 Схема калібрування датчика моменту

1.6.3.3.2. Включити вимірювальну систему, потім ПЕОМ, відзначити нульову точку; послідовно, за допомогою важків збільшувати величину  $F_3$  й визначати величину крутного моменту  $M_B$  із залежності

$$M_B = 3F_3l_3. \quad (1.6.9)$$

#### **1.6.4. Методика проведення випробувань.**

1.6.4.1. Зробити виміри моделі гвинта, записати діаметр  $D_M$  до протоколу лабораторної роботи.

1.6.4.2. Виміряти температуру води в басейні й записати значення масової густини  $\rho_M$  й кінематичної в'язкості  $\nu_M$  при даній температурі води (див. табл. 1.4.1) до протоколу лабораторної роботи.

1.6.4.3. Зробити калібрування датчиків (п. 1.6.3), побудувати характеристику холостого ходу (зразок - рис. 1.6.2), по ній визначити значення  $M_{TP} = M_B$  та записати в табл. 1.6.1.

1.6.4.4. Приймаючи значення критичного числа Рейнольдса  $Re_{кр} = 4 \cdot 10^5$ , визначити частоту обертання моделі гвинта  $n$  в діапазоні  $0 < n \leq 8.3$  об/с й при проведенні експерименту забезпечити значення  $n$ , для якого  $Re > Re_{кр}$ .

1.6.4.5. Опустити гвинт під поверхню води так, щоб глибина занурення його осі становила  $(1.0 \div 1.5)D$ .

1.6.4.6. Визначити значення упору та моменту при нульовій швидкості візка (режим на швартовах) при різних значеннях  $n$ , записати дані до в табл. 1.6.1.

1.6.4.7. Задати мінімальне значення швидкості візка й визначити відповідні значення упору та моменту. Збільшити швидкість і повторити виміри. Повторювати дії до досягнення режимів нульового упору та нульового моменту. Записати дані в табл. 1.6.1.

### **1.6.5. Методика обробки експериментальних даних.**

1.6.5.1. Визначити значення коефіцієнта упору  $K_1$  й коефіцієнта моменту  $K_2$ :

$$K_1 = \frac{P}{\rho n^2 D_M^4} = \frac{pk_P}{\rho n^2 D_M^4}; \quad (1.6.10)$$

$$K_2 = \frac{M_M}{\rho n^2 D_M^5} = \frac{mk_M - M_{TP}}{\rho n^2 D_M^5}, \quad (1.6.11)$$

де  $k_P, k_M$  - коефіцієнти калібрування датчиків упору та моменту відповідно;

$p, m_B$  - значення упору та моменту у кодах ПЕОМ відповідно.

1.6.5.2. Визначити значення коефіцієнта корисної дії гвинта по формулі

$$\eta_0 = \frac{K_1 \lambda_P}{K_2 2\pi}. \quad (1.6.12)$$

1.6.5.3. За даними табл. 1.6.1 побудувати графіки залежності коефіцієнтів упору  $K_1$ , моменту  $K_2$  та коефіцієнта корисної дії  $\eta_0$  моделі гребного гвинта від відносної ходи  $\lambda_P$ , тобто його криві дії (зразок див. рис. 1.6.5).

1.6.5.4. Для значення відносної ходи  $\lambda_P$ , що відповідає максимальному значенню коефіцієнта корисної дії  $\eta_0$  визначити коефіцієнт навантаження

$$B = \frac{8}{\pi} \frac{P}{\rho V_p^2 D^2}, \quad (1.6.13)$$

та коефіцієнт корисної дії ідеального гвинта у вільній воді

$$\eta_i = \frac{2}{1 + \sqrt{1 + B}}. \quad (1.6.14)$$

Результати випробувань моделей гвинтів (об'єднаних у систематичні серії) у вільній воді використовуються для розрахунків ходовості суден та вибору основних елементів гвинтів.

**1.6.6. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку.

**1.6.7. Контрольні питання.**

1.6.7.1. Для чого виконуються випробування моделей гвинтів у вільній воді?

1.6.7.2. Що таке коефіцієнти калібрування та для чого їх використовують?

1.6.7.3. Що таке характеристика холостого ходу та для чого її використовують?

1.6.7.4. Що таке криві дії гребного гвинта?

1.6.7.5. Які є режими роботи гребного гвинта?

1.6.7.6. Що таке хода нульового упору та хода нульового моменту?

**1.6.8. Література** [1.С. 60-71; 2.С. 155-162, 210-213].

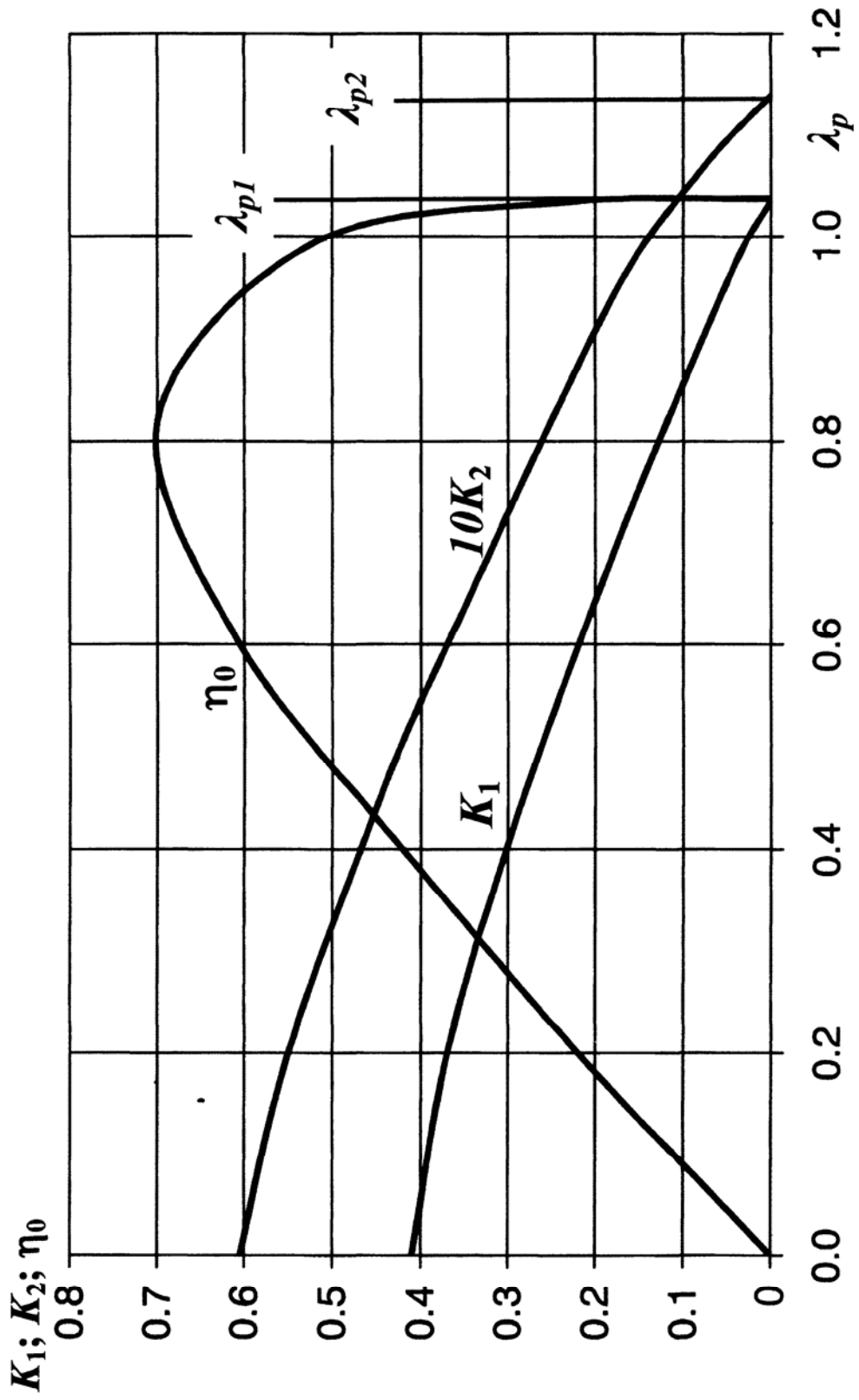


Рис. 1.6.5 Криві дії гребного гвинта

## 1.7. ДОСЛІДЖЕННЯ БОРТОВОЇ ХИТАВИЦІ МОДЕЛІ СУДНА

**1.7.1. Постановка задачі.** В процесі дослідження бортової хитавиці моделі судна визначається водотоннажність  $D$ , координати центра ваги моделі  $x_g$  і  $z_g$ , приєднаний момент інерції мас води  $\lambda_{44}$ ,  $\lambda_{44}$ , період вільних коливань  $T_{44}$ ,  $T_{44}$ , коефіцієнт опору при бортовій хитавиці  $\mu_{44}$ ,  $\mu_{44}$ .

Для проведення роботи виготовлена модель транспортного судна з наступними головними розмірностями:

- довжина між перпендикулярами  $L_{\perp\perp M}$   $L_{\perp\perp M}=1,53$  м;
- ширина  $B_M$   $B_M=0,274$  м;
- осадка  $T_M$   $T_M=0,077$  м;
- коефіцієнт загальної повноти  $\delta$   $\delta=0,81$ ;
- водотоннажність  $D_M=26,3$  кг;
- абсциса центру величини  $x_{CM}$   $x_{CM}=0,015$  м.

Модель виготовлена в масштабі  $\lambda = \frac{L_{\perp\perp M}}{L_{\perp\perp H}} = \frac{1}{50}$

Робота складається з п'яти самостійних задач.

### **1.7.2. Визначення ваги моделі і переміщення її центра ваги на одну вертикаль з центром величини.**

1.7.2.1. Модель (1) (рис. 1.7.1) встановлюється на опорах – носовій (2) у точці  $D_M$  моделі та кормовій (3) у точці  $D_M$  моделі. Носова опора розміщується на ваги. Модель довантажується гирями до ваги  $D_M$  кг. Гирі довільним чином розміщуються на носовій (4) і кормовій (5) вертикальних стійках. Відстань від кожної стійки до міделя моделі  $a = b =$  м.

1.7.2.2. Відстань між опорами  $A$  і  $B$  (рис. 1.7.1)  $AB = l = 1.08$  м. Якщо показання ваг  $P$ , то відстань від центра ваги моделі до міделя  $x_{gM}$  з урахуванням напрямку подовжньої осі  $x$  визначається за формулою

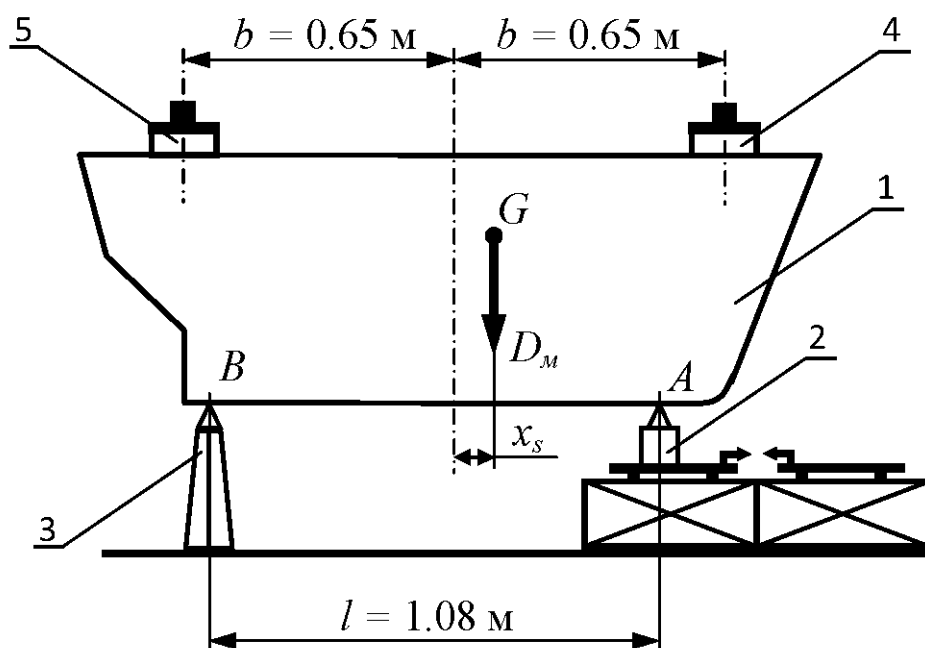


Рис. 1.7.1 Схема експерименту по визначенню абсциси центра ваги моделі і його переміщенню на одну вертикаль з центром величини

$$x_{gM} = x_B + d, \quad (1.7.1)$$

де  $x_B = -0,605$  м – абсциса точки  $B$ ;

$d$  – відстань між центром ваги моделі й опорою  $B$ , м,

$$d = \frac{P}{D_M} l. \quad (1.7.2)$$

1.7.2.3. Для того, щоб модель плавала на воді в положенні «на рівний кіль», необхідно виконати таку умову:

$$x_{gM} = x_{cM}. \quad (1.7.3)$$

Після визначення поточного значення  $x_{gM}^I$  (значення  $x_{gM}$  у першому наближенні) може виявитися, що  $x_{gM} \neq x_{cM}$ . Тоді обчислюється різниця

$$\Delta x_{gM} = x_{cM} - x_{gM}^I, \quad (1.7.4)$$

і визначається вага вантажу  $\Delta P$ , який необхідно перенести з однієї вертикальної стійки на іншу (з умови рівності моментів ваг):

$$\Delta P = \frac{|\Delta x_{gM}|}{2b}. \quad (1.7.5)$$

Якщо  $x_{gM} > 0$ , то вантаж  $\Delta P$  переноситься з кормової стійки на носову, якщо  $x_{gM} < 0$  – навпаки.

1.7.2.4. Після переносу вантажу  $\Delta P$  абсциса центра ваги моделі визначається в другому наближенні способом, що описаний в пунктах 1.7.2.2 та 1.7.2.3, з наступною перевіркою умови (1.7.3).

Якщо умова (1.7.3) виконується ( $x_{gM}^{II} = x_{cM}$ ), то процес обчислення абсциси центра ваги закінчується. У противному випадку знову визначається вага вантажу  $\Delta P$ , який потрібно перенести і т.д.

Умова (1.7.3) повинна виконуватися з точністю до  $\Delta x_{gM} = 0,001 \text{ м}$ . Результати вимірів і обчислень записуються у таблицю 1.7.1.



### 1.7.3. Визначення періоду коливань моделі в повітрі.

Період коливань моделі в повітрі необхідний, щоб надалі визначити момент інерції мас моделі відносно подовжньої осі, що проходить через її центр ваги ( $I_{xM}$ ).

Для визначення згаданих величин модель підвішують у повітрі на спеціальній установці (рис. 1.7.2). Для цього на моделі мається відповідний засіб.

Підвішена модель може коливатися навколо осі  $O$ , тобто являє собою фізичний маятник, період коливань якого пов'язаний з моментом інерції мас моделі відносно осі підвісу  $O$ . Коливання моделі, як фізичного маятника, будуть такими, що затухають, оскільки енергія буде витрачатися на подолання опору повітря і на тертя в місці підвісу.

Тому амплітуда коливань буде постійно зменшуватися, а період - залишатися постійним.

Період вільних коливань визначається у такий спосіб. За допомогою секундоміра вимірюється тривалість ( $t$ ) великого числа коливань ( $n$ ); тоді період коливань ( $T$ ) обчислюється за формулою.

$$T = \frac{t}{n} \quad (1.7.6)$$

Дослід по визначенню  $T$  повторюється декілька разів. Причому відлік часу належить починати після того, як модель здійснить декілька повних коливань і рух буде сталим.

Результати вимірів і обчислень заносять в таблицю 1.7.2. Враховувати потрібно тільки ті результати, що незначно відрізняються між собою. Значення періоду, що різко відрізняються

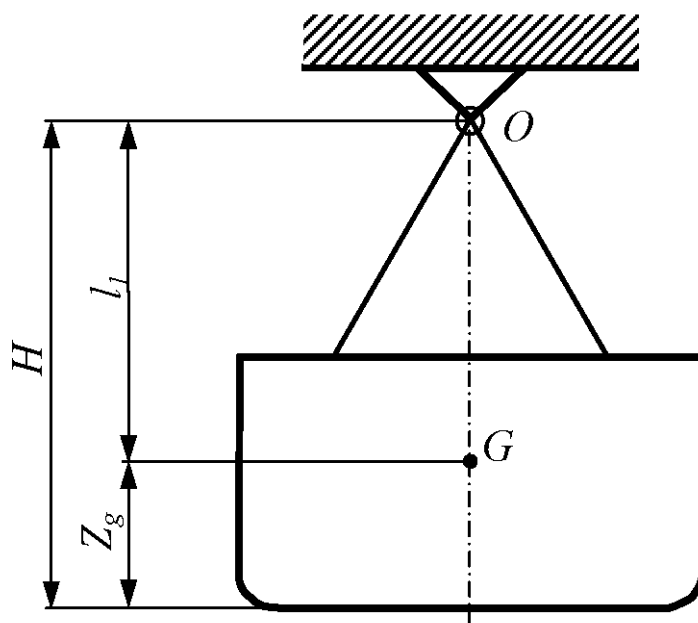


Рис. 1.7.2 Схема підвісу моделі в повітрі

від інших, варто виключити з розгляду, оскільки вони свідчать про неточність проведення даного дослідження.

#### **1.7.4. Визначення власного моменту інерції моделі.**

**1.7.4.1 Власний момент інерції мас моделі  $I_{xM}$**  - це момент інерції відносно осі, що проходить через центр ваги мас моделі.

Момент інерції відносно будь-якої осі, яка паралельна осі, відносно якої визначено власний момент інерції, буде більше за величиною, ніж  $I_{xM}$ , на величину так званого переносного моменту інерції, який дорівнює добутку маси тіла на квадрат відстані між вищеназваними осями.

Момент інерції моделі відносно будь-якої осі, що не проходить через центр ваги моделі, пов'язаний з періодом коливань. Розглянемо

момент інерції відносно згаданої вище осі  $O$  – горизонтальної осі підвісу моделі.

$$I_{OM} = D_M l_1 \left( \frac{F}{2\pi} \right)^2, \quad (1.7.7)$$

де  $I_{OM}$  – момент інерції мас моделі відносно осі підвісу  $O$ , кгмс<sup>2</sup>;

$l_1$  – відстань від осі до центра ваги моделі, м;

$$l_1 = H - z_{gM}. \quad (1.7.8)$$

В формулі (1.7.8)  $H$  – відстань від основної площини до осі підвісу, його потрібно виміряти лінійкою.

Апліката центра ваги моделі буде визначена в досліді кренування (таблиця 1.7.3).

Власний момент інерції мас моделі

$$M_{KPM} = P_2 b \quad (1.7.9)$$

Розрахунок  $M_{KPM} = P_2 b$  виконується в таблиці 1.7.4.

**1.7.4.2. Дослід кренування.** Для проведення дослід кренування модель (1) встановлюється на воду і перевіряється правильність її посадки по конструктивну ватерлінію, що нанесена на борт моделі. По бортах моделі розміщено штирі. До одного з них приєднаний тросик з підвіскою (3), перекинутий через блок (2). На другий штир (4) вантаж встановлюється безпосередньо. Крен моделі судна на малий кут створюється моментом, що кренить ( $M_{KPM}$ ), як показано на рис. 1.7.3.

Якщо  $P_2$  – вага кожного з вантажів, що встановлений на штир (4) та підвішений до тросику (3), а  $b$ , – відстань між штирями, то

$$M_{KPM} = P_2 b \quad (1.7.9)$$

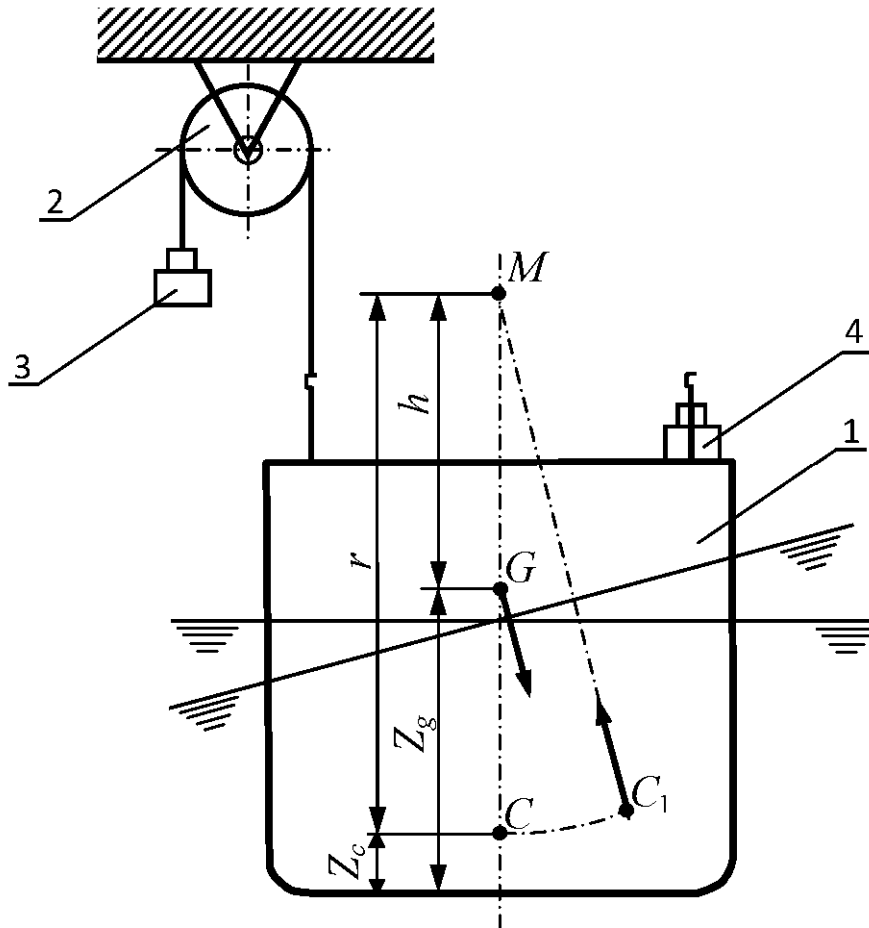


Рис. 1.7.3 Схема дослідження кренування

Метацентрична висота моделі

$$h_M = 57.3^\circ \frac{M_{KPM}}{D_M \theta}, \quad (1.7.10)$$

де  $\theta$  – кут крену у градусах.

Кут  $\theta$  у формулі (1.7.10) визначається за допомогою кренометра, що встановлений на моделі.

Кренометр являє собою металевий посуд, що заповнений в'язкою рідиною. В рідину опущено гнучку пластикову смужку, до якої прикріплений тензодатчик.

При нахилі моделі в бік смужка змінює свою форму, тензодатчик розтягується або стискується, унаслідок чого міняється його опір.

З тензодатчика сигнал через аналогово-цифровий перетворювач подається на комп'ютер, де за допомогою спеціального програмного забезпечення записується у виді графіка. На цьому графіку по горизонтальній осі зображується час, а по вертикальній - так звані умовні коди, пов'язані з напругою на тензодатчикові.

**1.7.4.3. Тарування приладу.** Для того, щоб за допомогою кренометра можна було одержувати значення кута крену моделі в градусах, необхідно попередньо зробити тарування приладу. Тобто зіставити показання приладу в умовних кодах з його положенням у просторі.

Для цього використовується спеціальний лімб у формі кільця, на якому закріплена склянка, у яку можна помістити кренометр. На лімбі знаходиться шкала, що проградуєвана в градусах. Склянка може обертатися навколо осі, перпендикулярної площині лімба.

Потрібно помістити кренометр у склянку. Потім склянку відхиляти від вертикалі послідовно на 2, 4, 6, 8, 10 градусів, причому спочатку вправо, а потім вліво. При цьому записується сигнал в умовних кодах, що надходить з кренометра. Таким чином визначається залежність між показаннями кренометра в умовних кодах і кутом між віссю симетрії кренометра і вертикаллю. Цей графік називається тарувальною кривою. За абсолютними значеннями

кутів у градусах і умовних кодах визначаються залежності для нахилання вліво і вправо в одній системі координат. У якості тарувальної кривої приймається лінія, рівновіддалена від зазначених кривих. Зразковий вид тарувальної кривої показаний на рис. 1.7.4.

Дослід кренування повторюється кілька разів для різних значень ваги вантажів  $P_2$ , і відповідно щораз обчислюється значення метацентричної висоти.

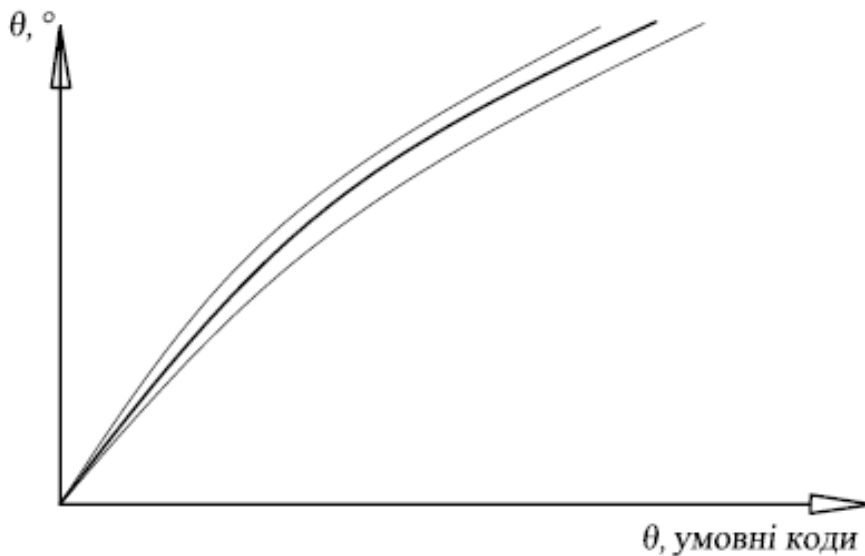


Рис. 1.7.4 Зразковий вид тарувальної кривої

Після обчислення середнього значення метацентричної висоти (див. табл. 1.7. 3), потрібно визначити аплікату центра ваги моделі

$$Z_{gM} = Z_{cM} + r_M - h_M, \quad (1.7.11)$$

де  $Z_{cM}$  – апліката центра величини моделі;

$r_M$  – поперечний метацентричний радіус моделі.

Ці величини знаходяться за допомогою кривих елементів теоретичного креслення (див. рис. 1.7.5).

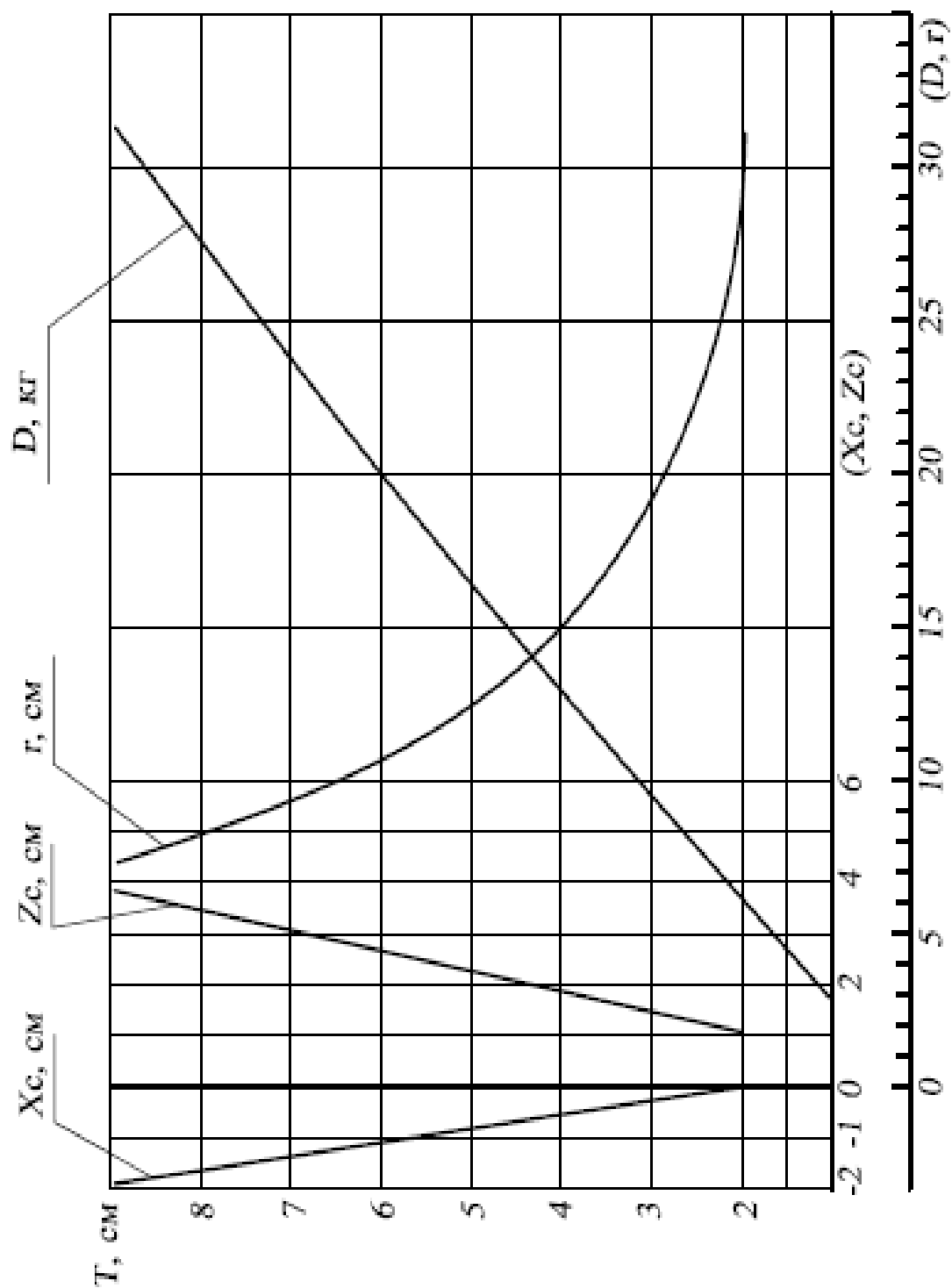


Рис.1.7.5 Криві елементів теоретичного креслення

### **1.7.5. Визначення приєднаного моменту інерції мас моделі.**

**1.7.5.1. Період вільних коливань моделі при бортовій хитавиці** можна зняти з осцилограми коливань моделі навколо подовжньої осі. Модель потрібно звільнити від вантажів, що створюють момент, який кренить, причому тросик, перекинутий через блок теж потрібно від'єднати (див. рис. 1.7.3). Потім, поштовхом, спрямованим вертикально, і прикладеним до борта моделі в районі міделя, створюються бортові коливання. На комп'ютері треба зафіксувати залежність кута крену моделі від часу.

При роботі з осцилограмою спочатку потрібно визначитися з масштабом, у якому зображується час на горизонтальній осі, а потім, виміривши відрізок, що відповідає на горизонтальній осі часу декількох повних коливань, обчислити період. Для цього вимірюється тривалість ( $t$ ) великого числа коливань ( $n$ ) и період коливань ( $T_{4M}$ ) обчислюється за формулою.

$$T_{4M} = \frac{t}{n} \quad (1.7.12)$$

Обчислення  $T_{4M}$  здійснюється у таблиці 1.7.5.

**1.7.5.2. Період бортової хитавиці пов'язаний з моментами інерції наступною формулою:**

$$T_{4M} = 2\pi \sqrt{\frac{I_{xM} + \lambda_{44M}}{D_M h_M}}, \quad (1.7.13)$$

де  $I_{xM}$  – власний момент інерції мас моделі;

$\lambda_{44M}$  – приєднаний момент інерції мас води;



$h_M$  – початкова поперечна метацентрична висота моделі.

Звідси приєднаний момент інерції

$$\lambda_{44} = D_M h_M \left( \frac{T_{4M}}{2\pi} \right)^2 - I_{xM}. \quad (1.7.14)$$

### **1.7.6. Визначення коефіцієнта опору при бортовій хитавиці та перерахунок характеристик хитавиці на натурне судно.**

**1.7.6.1. Коефіцієнт загасання при бортовій хитавиці** визначається по формулі

$$v_{44Mi} = \frac{\ln \frac{(\theta_{i-1})}{\theta_i}}{T_{4M}} \quad (1.7.15)$$

Необхідно зняти з осцилограми загасаючих коливань послідовні значення амплітуд. За допомогою тарувальної кривої перейти від умовних кодів до градусів. Потім зробити обчислення натуральних логарифмів відносин послідовних амплітуд, і, нарешті, обчислити коефіцієнти загасання амплітуд.

Для обчислення коефіцієнта опору бортовий хитавиці треба використовувати середнє значення вищезгаданого коефіцієнта:

$$v_{44M} = \frac{\sum_{i=1}^k v_{44Mi}}{k} \quad (1.7.16)$$

Коефіцієнт опору бортовий хитавиці:

$$\mu_{44} = v_{44}(I_M + \lambda_{44M}). \quad (1.7.17)$$

**1.7.6.2. Перерахунок на натурне судно.** По знайденим величинам для моделі згідно до закону динамічної подібності визначаються відповідні величини для натурального судна за формулами:

$$\left\{ \begin{array}{l} L_{\perp\perp H} \\ B_H \\ T_H \end{array} \right\} = \lambda \left\{ \begin{array}{l} L_{\perp\perp M} \\ B_M \\ T_M \end{array} \right\}$$

$$D_H = \lambda^3 D_M$$

$$\left\{ \begin{array}{l} x_{gH} \\ z_{gH} \end{array} \right\} = \lambda \left\{ \begin{array}{l} x_{gM} \\ z_{gM} \end{array} \right\} \quad (1.7.18)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_{xH} \\ \lambda_{44H} \end{array} \right\} = \lambda^5 \left\{ \begin{array}{l} I_{xM} \\ \lambda_{44M} \end{array} \right\}$$

$$T_{4H} = \sqrt{\lambda} T_{4M}$$

$$\mu_H = \lambda^{4,5} \mu_M$$

Тут  $\lambda = \frac{L_{\perp\perp H}}{L_{\perp\perp M}}$   $\lambda = \frac{L_{\perp\perp H}}{L_{\perp\perp M}}$  - геометричний масштабний множник. Він

задається викладачем кожному студенту індивідуально.

**1.7.7. Результати лабораторної роботи** оформляються у вигляді протоколу. Форму протоколу наведено у додатку.

### **1.7.8. Контрольні питання.**

- 1.7.8.1. Що таке центр ваги?
- 1.7.8.2. Що таке центр величини?
- 1.7.8.3. Що таке вагова водотоннажність?

- 1.7.8.4. Як визначити відстань від нерухомої опори до центра ваги моделі?
- 1.7.8.5. Навіщо потрібно переміщувати центр ваги так, щоб він опинився на одній вертикалі з центром величини?
- 1.7.8.6. Як можна записати умову плавання моделі на рівній кіль (три способи)?
- 1.7.8.7. Що таке період коливань?
- 1.7.8.8. Що таке амплітуда коливань?
- 1.7.8.9. Що таке частота коливань?
- 1.7.8.10. Чому при замірюванні часу, на протязі якого здійснюються коливання, потрібно починати замірювати час після того, як модель вже зробить декілька коливань?
- 1.7.8.11. Як пов'язані період коливань та їхня амплітуда?
- 1.7.8.12. Що таке фізичний маятник?
- 1.7.8.13. Чому при обчисленні середнього значення періоду враховуються не всі значення періодів, що були обчислені під час проведення досліду?
- 1.7.8.14. Що таке кренометр?
- 1.7.8.15. Як здійснюється процес тарування кренометра?
- 1.7.8.16. Що таке тарувальна крива? Для чого вона використовується?
- 1.7.8.17. Як проводиться дослід кренування?
- 1.7.8.18. У чому особливість досліду кренування, який проводиться у цій роботі?
- 1.7.8.19. Як обчислити момент, що нахилиє судно?
- 1.7.8.20. Що таке метацентрична висота, як її обчислити?
- 1.7.8.21. Як знайти аплікату центра величини для моделі?
- 1.7.8.22. Як знайти поперечний метацентричний радіус для моделі?
- 1.7.8.23. Що таке момент інерції мас моделі?

- 1.7.8.24. Що таке власний момент інерції мас моделі і як його обчислити?
- 1.7.8.25. Що таке приєднаний момент інерції мас моделі? Як його обчислити?
- 1.7.8.26. Як визначити період вільних коливань моделі на воді?
- 1.7.8.27. Чи залежить період вільних коливань моделі від водотоннажності та метацентричної висоти? Яким чином?
- 1.7.8.28. Що таке коефіцієнт загасання бортової хитавиці?
- 1.7.8.29. Що таке коефіцієнт опору бортової хитавиці, як його обчислити?
- 1.7.8.30. Як за допомогою осцилограми вільних коливань можна визначити амплітуду коливань моделі?
- 1.7.8.31. Що таке геометричний масштабний множник?

**1.7.9. Література** [2. С. 162-166; 5. С. 112 – 114; 8. С. 23 – 27, 330 – 339]

## ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ 1

### Основна

1. Артющков Л.С., Ачкинадзе А.Ш., Русецкий А.А. Судовые движители. – Л.: Судостроение, 1988. – 296 с.
2. Басин А.М. Качка судов. М.:Транспорт, 1969. – 272 с.
3. Басин А.М. Ходкость и управляемость судов. – М.: Транспорт, 1977. – 456 с.
4. Войткунский Я.И. Сопротивление воды движению судов. – Л.: Судостроение, 1988. – 288 с.
5. Ремез Ю.В. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1983 – 328с.
6. Рождественский В.В., Луговский В.В., Борисов Р.В., Мирохин Б.В. Статика корабля. Л.: Судостроение, 1986. - 240 с
7. Семенов-Тян-Шанский В.В. Статика и динамика корабля. Л.: Судостроение, 1973. - 608 с.
8. Семенов Тян-Шанский В.В., Благовещенский С.Н., Холодилин А.Н. Качка корабля. Л.: Судостроение, 1969.– 392 с.

### Додаткова

9. Воробьев Ю.Л. Гидродинамика судна в стесненном фарватере. - СПб.: Судостроение, 1992. - 224 с.
10. Воробьев Ю.Л., Демидюк А.В. Математические методы и модели в расчетах на ЭВМ. Одесса: Астропринт, 2012. – 256 с.
11. Ефремова Н.В. Гидромеханика. Теория корабля (ходкость). Методические указания к лабораторным работам. – Одесса: ОНМУ, 2009. – 68 с.
12. Коханов Э.В, Митцих Н.Н., Хильский В.П. Теория корабля. Методические указания по проведению лабораторных работ. – Одесса: ОИИМФ, 1988. – 109 с.

13. Мореходность судов и средств океанотехники. Методы оценки: Монография / Под ред. Бородая И.К. – ФГУП «Крыловский государственный научный центр» – СПб.: 2013 – 256с.
14. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 1. Гидромеханика. Сопротивление движению судов. Судовые движители /Под ред. Войткунского Я.И. - Л.: Судостроение, 1985. - 764 с.
15. Справочник по теории корабля: В трех томах. Том 2. Статика судов. Качка судов / Под ред. Войткунского Я.И. - Л.: Судостроение, 1985. - 440 с.
16. Хаскинд М.Д. Гидродинамическая теория качки корабля. - М.: Наука, 1973. - 327 с.
17. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента: Пер. с англ. – М.: Мир, 1977.
18. Російсько-український словник наукової термінології: Математика. Фізика. Техніка. Науки про Землю та Космос /В.В.Гейченко, В.М.Завірюхіна, О.О.Зеленюк та ін. – К.: Наук. думка, 1998.- 892 с.

## **2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХИТАВИЦІ ПЛАВУЧИХ ОБ'ЄКТІВ**

### **2.1. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ УСТАТКУВАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ГІДРОДИНАМІЧНИХ І КІНЕМАТИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПОЗДОВЖНЬОЇ ХИТАВИЦІ МОДЕЛЕЙ СУДЕН**

Експериментальні дослідження гідродинамічних характеристик хитавиці (приєднаних мас і коефіцієнтів опору) проводяться, як правило, методом змушених коливань на тихій воді. Дослідження кінематичних характеристик хитавиці, збурюючих сил виконуються на регулярному хвилюванні. Незважаючи на різні методи, вимір характеристик може бути здійснений за допомогою тих самих датчиків, що суттєво спрощує виготовлення й налагодження експериментального устаткування.

В дослідному басейні ОНМУ виготовлено експериментальне устаткування, призначене для створення змушених вертикальних і кильових коливань моделі в дослідному басейні на тихій воді [4]. Його схему представлено на рис. 2.1.1.

Принцип дії механічної частини експериментального устаткування наступний. Модель (1) через пілони (3) приводиться в коливальний рух від кулісного механізму, змонтованого в силовому блоці (8). Силовий блок складається із двигуна постійного струму, редуктора й кривошипно-кулісного механізму, у якому обертання електродвигуна перетворюється у зворотно-поступальний рух куліс (5) за гармонійним законом.

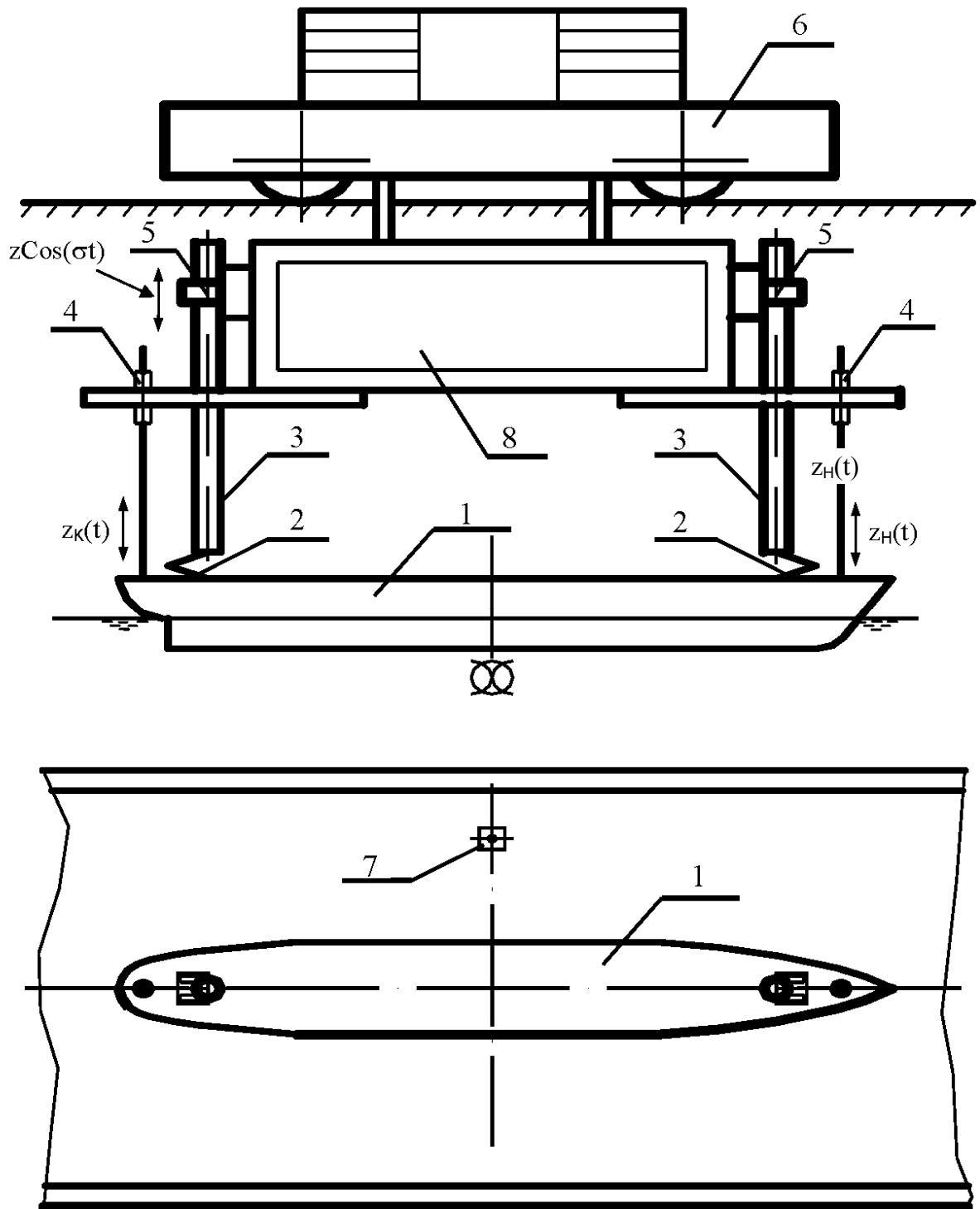


Рис. 2.1.1 Схема експериментального устаткування для дослідження інерційних та демпфівальних характеристик хитавиці судна



Між пілонами (3) і моделлю (1) установлені пружини (2), знаючи жорсткість яких і вимірявши амплітуду змушених коливань моделі, можна визначити приєднану масу й коефіцієнти опору в рівняннях хитавиці. На візку (6) установлені датчики переміщень, а також вимірювальна апаратура, сигнали якої по кабелях подаються на апаратуру, що реєструє.

Розглянемо роботу експериментального устаткування на прикладі вертикальних змушених коливань моделі. Представимо диференціальне рівняння змушених вертикальних коливань у вигляді:

$$(M + \lambda_{33})\ddot{z} + \mu_{33}\dot{z} + (\gamma S + c)z = cr \cos \sigma t, \quad (2.1.1)$$

де  $M$  й  $S$  – маса моделі й площа ватерлінії моделі відповідно;

$c$  – жорсткість пружин;

$r$  – радіус кривошипа (амплітуда верхнього кінця пружини);

$\sigma$  - частота коливань;

$\gamma$  - питома вага води;

$\lambda_{33}$  – приєднана маса;

$\mu_{33}$  – коефіцієнт опору моделі.

З рівняння (2.1.1) визначаються змушені коливання моделі у формі

$$z = A_z \cos(\sigma t - \delta_z), \quad (2.1.2)$$

де  $A_z$  – амплітуда коливань моделі;

$\delta_z$  - зсув по фазі між коливаннями та збурюючою силою.

Визначивши експериментальну амплітуду коливань  $A_z$  і зсув по фазі  $\delta_z$ , можна обчислити  $\lambda_{33}$  й  $\mu_{33}$ :

$$\lambda_{33} = \frac{1}{\sigma^2} \left( \gamma S + c - \frac{cr}{A_z} \cos \delta_z \right) - M, \quad (2.1.3)$$

$$\mu_{33} = \frac{cr}{A_z} \sin \delta_z. \quad (2.1.4)$$

Блок-схему виміру амплітуд змушених коливань моделі наведено на рис. 2.1.2. При вимірі амплітуд змушених коливань на тихій воді модель (1) через пружини (2) приводиться в рух від куліс (3) за гармонійним законом  $r \cos \sigma t$  (верхній кінець пружин), амплітуда коливань моделі (нижній кінець пружин) вимірюється датчиками переміщень (4).

Сигнали від датчиків  $z_H(t)$  і  $z_K(t)$ , пропорційні переміщенням моделі в точках кріплення датчиків, подаються на тензопідсилювач 8АНЧ-7М і далі через аналого-цифровий перетворювач (АЦП) записуються у файл ПЕОМ. Одночасно в цей же файл записується сигнал від спеціального перемикача (5), пов'язаного з кулісою, який фіксує проходження через «0» кулісного механізму.

При реєстрації результатів вимірів числа, пропорційні  $z_H(t)$  й  $z_K(t)$ , записуються послідовно у файл ПЕОМ, однак швидкість перетворення настільки велика, що можна вважати їх записаними одночасно.

Таким чином, після кожного прогону моделі визначалася амплітуда коливань моделі  $A_z$

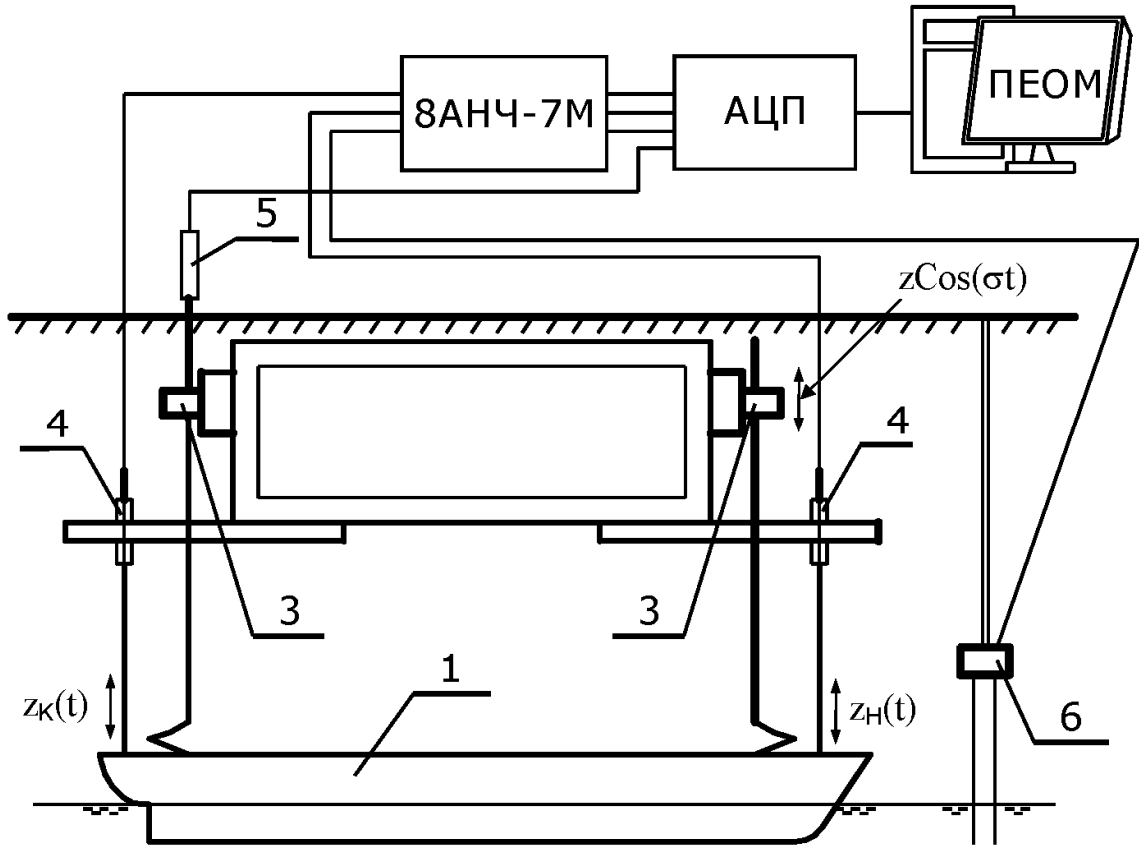


Рис. 2.1.2 Блок-схема вимірювального комплексу

$$A_z = \max\left(\frac{(z_H(t) + z_K(t))}{2}\right) \quad (2.1.5)$$

і зсув по фазі  $\delta_z$ .

Для визначення приєднаного моменту інерції й коефіцієнта опору при чисто кільових коливаннях необхідно один із кривошипів кривошипно-кулісного механізму повернути на 180, урахувати константи для кільової хитавиці, а вся вимірювальна частина залишається без змін.

Частота змушених коливань задається частотою обертання приводного двигуна.

Збурюючі сили від регулярного хвилювання вимірюються на тому ж експериментальному устаткуванні при застопореному приводному двигуні. Для виміру параметрів хвилювання встановлюється датчик хвилі (7) (рис. 2.1.1) і (6) (рис. 2.1.2), у цьому випадку датчики переміщення вимірюють пропорційну цим переміщенням збурюючу силу, тобто

$$z_H(t) \sim F_{z_H(t)}, \quad z_K(t) \sim F_{z_K(t)}. \quad (2.1.6)$$

При цьому попередньо проводиться тарування системи, тобто експериментальне визначення коефіцієнта пропорційності показань датчиків відповідним навантаженням моделі на тихій воді відомими силами.

Експериментальне устаткування змонтоване на візку, що дозволяє проводити випробування як на нерухливій моделі, так і при різних швидкостях руху.

Кінематичні характеристики поздовжньої хитавиці моделі на регулярному хвилюванні представляють у вигляді залежностей амплітуд вертикальної й кільової хитавиці, віднесених до амплітуд хвиль, від частот регулярного хвилювання при різних швидкостях руху моделі.

Для виміру кінематичних характеристик поздовжньої хитавиці моделі не потрібне коливальне обладнання, тому дослідження проводяться на спрощеній експериментальній установці. Її схему представлено на рис. 2.1.3.

Модель (1) встановлена в ромбовидній «запряжці» (6) буксирувальної системи таким чином, що вона має можливість робити вертикальні й кільові коливання. На візку (2) встановлені

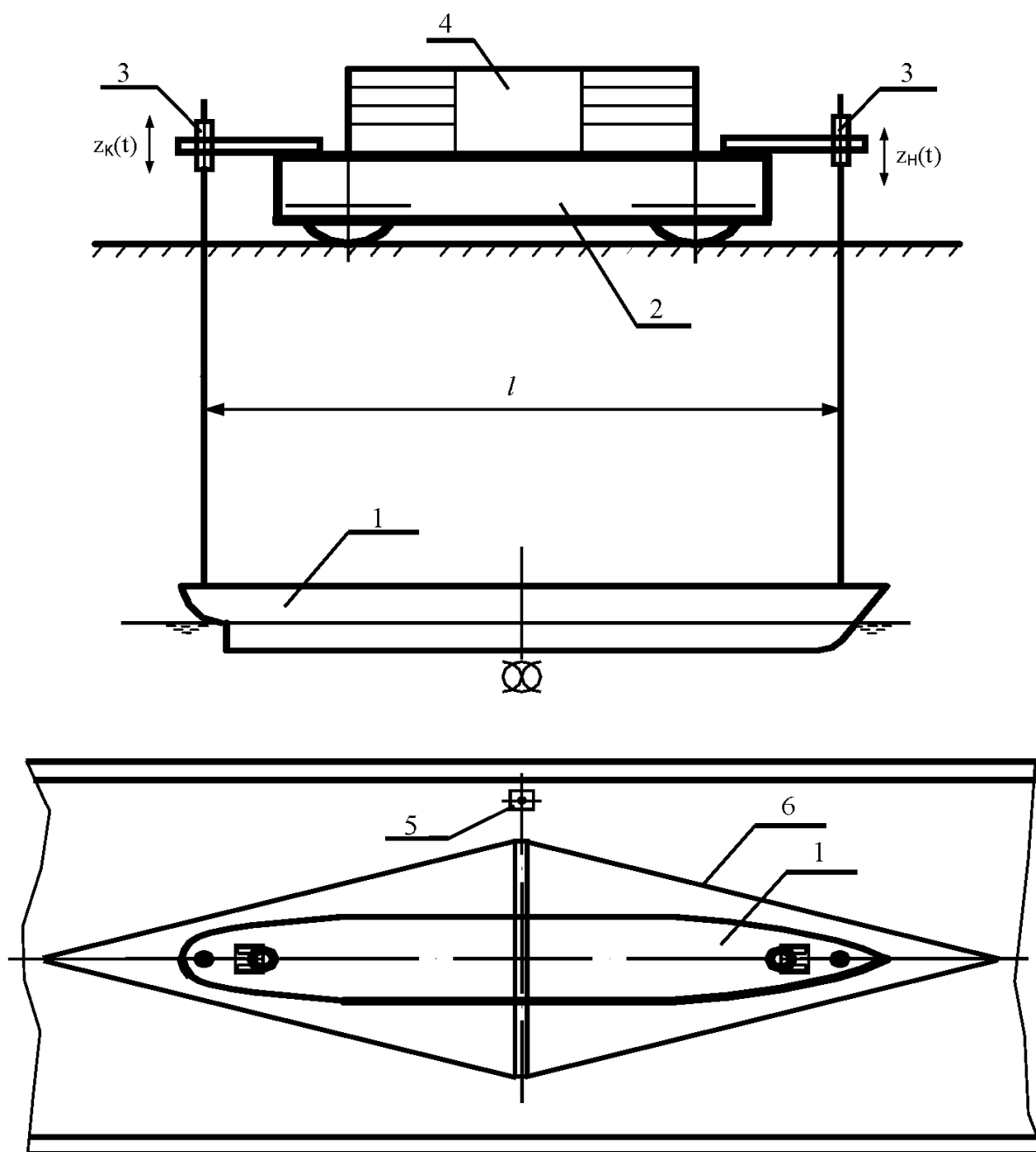


Рис. 2.1.3 Схема експериментального устаткування для виміру кінематичних характеристик поздовжньої хитавиці

датчики переміщень (3), вимірювальна апаратура (4) і датчик хвилі (5), який розташований у площині мідель-шпангоута моделі. Вимірювальна частина експериментального устаткування залишається незмінною (див. опис рис. 2.1.1).

Із записаних у файл ПЕОМ миттєвих значень  $z_H(t)$ ,  $z_K(t)$  і  $h_B(t)$  (де  $h_B(t)$  - висота хвилі) виходять амплітуди вертикальної хитавиці

$$A_z \sim \max\left(\frac{(z_H(t) + z_K(t))}{2}\right), \quad (2.1.7)$$

амплітуди кильової хитавиці

$$A_\psi \sim \max\left(\frac{(z_H(t) + z_K(t))}{l}\right), \quad (2.1.8)$$

а також їх фази для кожного прогону моделі.

Для стандартної моделі довжиною  $L = 2$  м устаткування дослідного басейну дозволяє проводити випробування з визначення гідродинамічних і кінематичних характеристик хитавиці моделей при частотах, відповідних до відносних довжин хвиль від  $\frac{\lambda}{L} = 0,5$  до

$\frac{\lambda}{L} = 2,0$  при відносних швидкостях руху моделі від 0 до  $Fr = 0,3$ .

## 2.2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ХИТАВИЦІ МОДЕЛІ САМОПІДІМАЛЬНОЇ БУРОВОЇ УСТАНОВКИ

Самопідіймальні плавучі бурові установки (СПБУ) - найпоширеніші технічні засоби, призначені для розвідувально-пошукового буріння на глибинах моря до 100 м. При транспортуванні й постановці на точку буріння СПБУ зазнають впливу вітру й хвилювання під довільним курсовим кутом. Наявність опорних колон суттєво ускладнює хвильове поле навколо СПБУ, оскільки при обтіканні потоком рідини групи циліндричних перешкод необхідно враховувати вплив кожного з них.

Визначення параметрів хитавиці для СПБУ суттєво складніше, ніж для тіл звичайних суднових форм, тому в сучасній інженерній практиці найчастіше характеристики хитавиці СПБУ оцінюють експериментально.

У якості об'єкта дослідження була обрана СПБУ " Каспій -100" із трьома опорами. Модель у масштабі 1:75 виготовлена з пінопласту й покрита сплавом воску з парафіном. Водотоннажність моделі  $D=0,035$  т, її головні розмірення:  $L=0,935$  м,  $H=0,117$  м,  $B=1,08$  м,  $T=0,057$  м. Креслення корпусу моделі представлено на рис. 2.2.1.

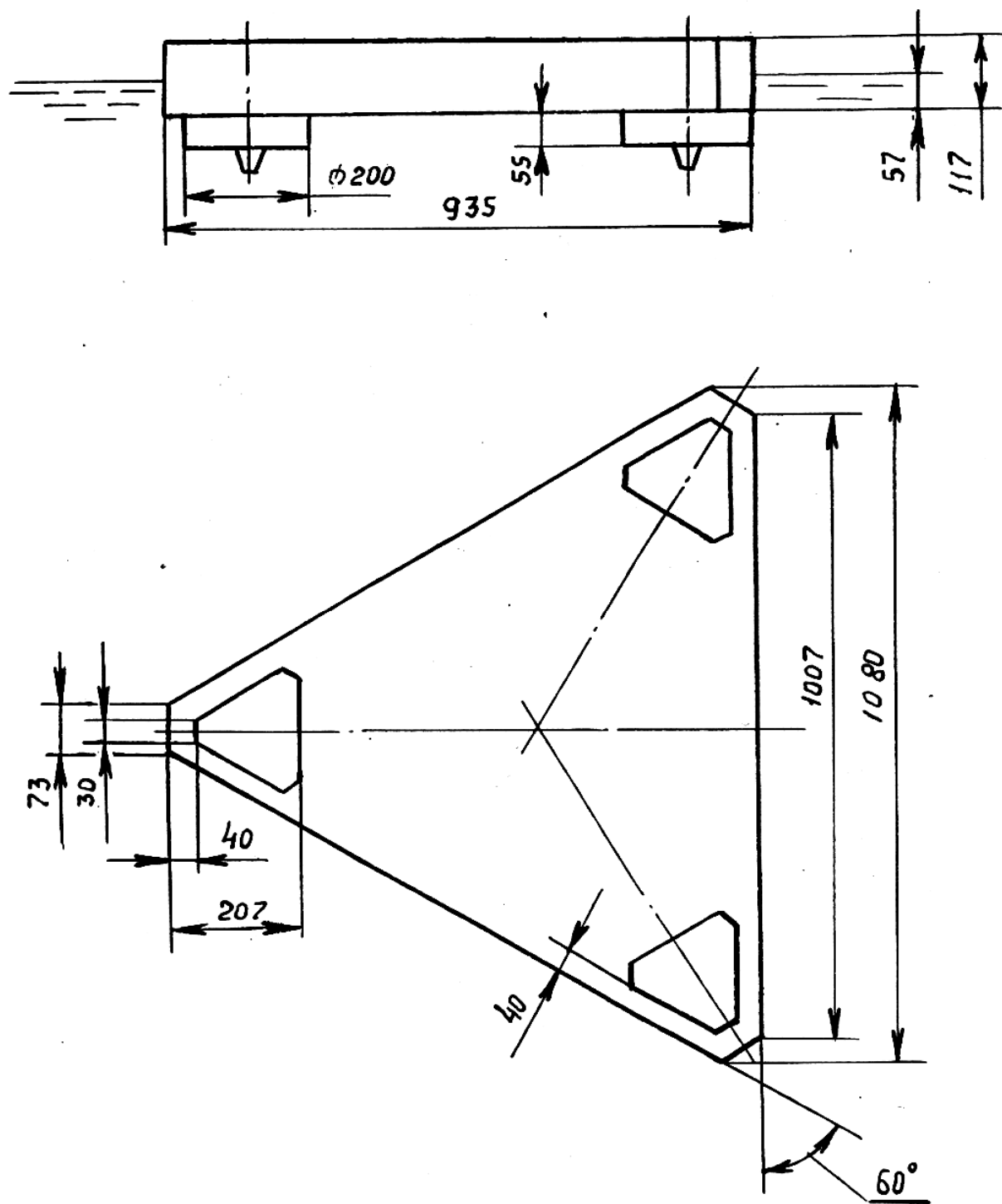


Рис. 2.2.1 Креслення моделі СПБУ



### 2.2.1. Експериментальне визначення кінематичних характеристик вертикальної, бортової й кільової хитавиці моделі СПБУ

Дослідження проведене в дослідному басейні ОНМУ [3] на штатному експериментальному устаткуванні, що складається з датчиків бортової й кільової хитавиці (гіровертикаль ЦГВ-4С), датчика вертикальної хитавиці індуктивного типу, датчика хвилі струнного типу, вимірної апаратури та апаратури, що реєструє – тензопідсилювача 8АНЧ-7М, аналого-цифрового перетворювача L264 і ПЕОМ. Реєстрація й обробка результуючих процесів проводяться на ПЕОМ, для цього створена спеціальна програма.

Для дотримання подоби моделі натурному об'єкту проводилася динамічне тарування моделі (рис. 2.2.1.1).

Випробування проводилися без ходу на вільно плаваючій моделі й моделі в "запряжці" (рис. 2.2.1.2) при курсових кутах хвилювання, що набігає, від 0 до  $\varphi = 180^\circ$  з кроком  $30^\circ$ . Частота регулярного хвилювання змінювалася в межах від  $\sigma = 4$  до  $\sigma = 10 c^{-1}$ , що відповідає відносній довжині хвиль від  $\frac{\lambda}{L} = 0.8$  ( $L$  - довжина моделі,

$\lambda$  - довжина хвилі) до  $\frac{\lambda}{L} = 4$ . Відносна висота хвиль від  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{40}$  ( $h$  -

висота хвилі) до  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{60}$ . Періоди вільних коливань моделі на тихій

воді становили  $\tau_{\theta 0} = 1.76$  с и  $\tau_{\psi 0} = 1.92$  с, що відповідає частотам

вільних коливань  $\omega_{\theta 0} = 3.56 c^{-1}$  і  $\omega_{\psi 0} = 3.27 c^{-1}$ .

На регулярному хвилюванні отримана амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) вертикальної хитавиці (рис. 2.2.1.3). Оскільки



Рис.2.2.1.1 Динамічне тарування моделі в повітрі

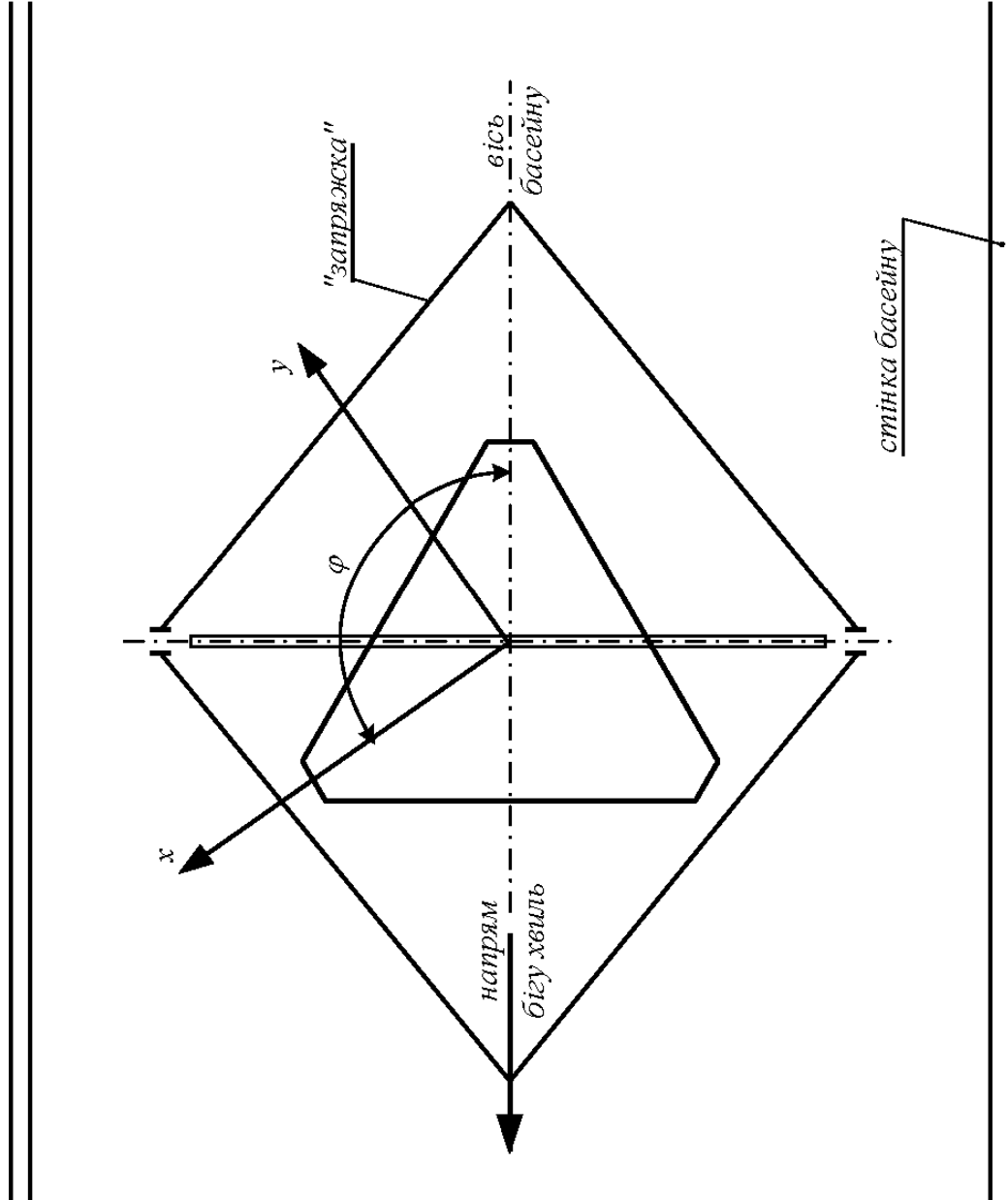


Рис.2.2.1.2 Схема кріплення моделі при випробуванні в "запряжці"

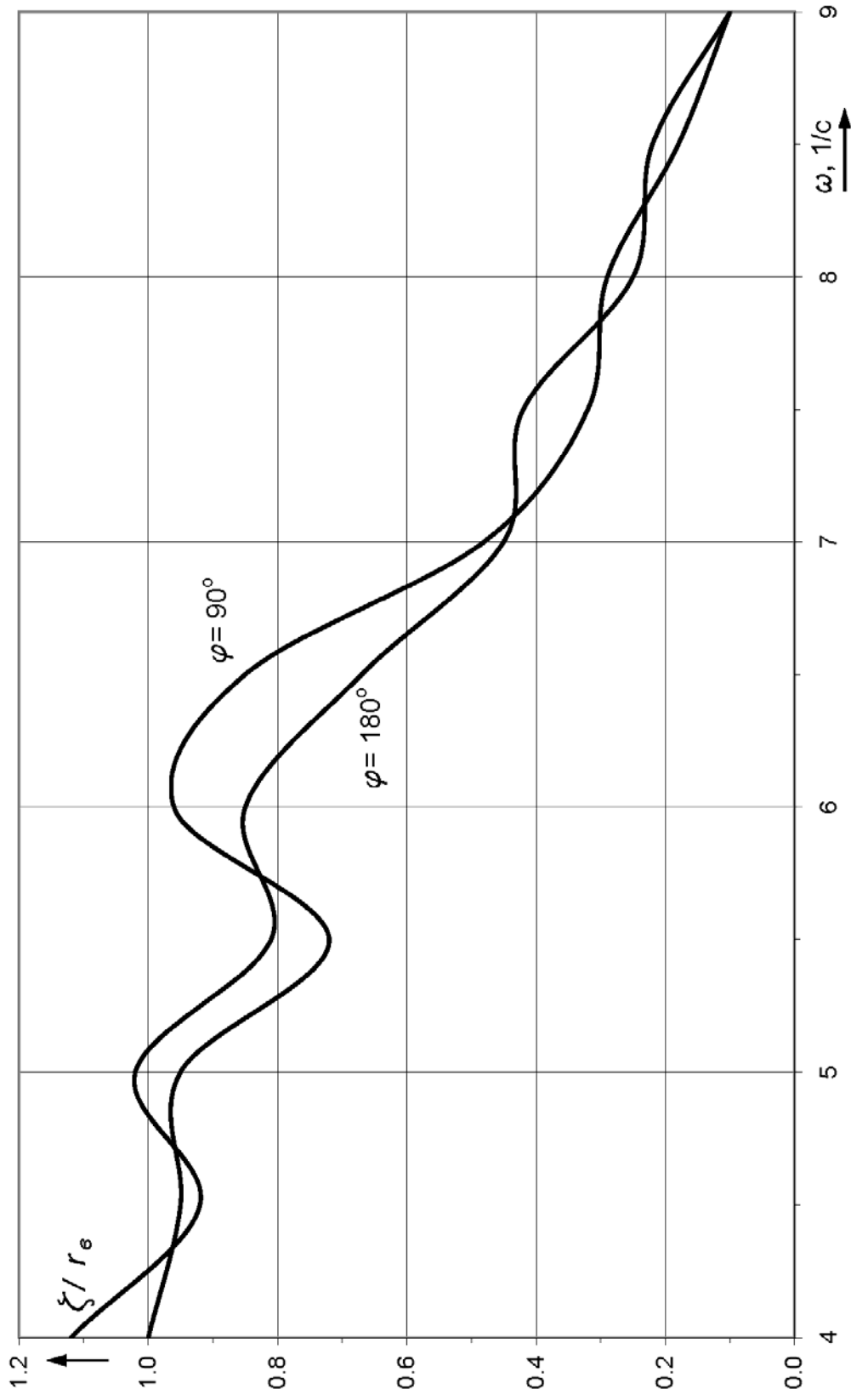


Рис.2.2.1.3 Амплітудно-частотна характеристика вертикальної хитавиці на регулярному хвилюванні при  $\varphi = 90^\circ$  і  $180^\circ$

частота вільних коливань бортової хитавиці моделі близька до мінімально можливої частоти створюваного в басейні стійкого регулярного хвилювання, а частота вільних коливань кільової хитавиці моделі менше цієї частоти, АЧХ цих видів хитавиці були визначені, а АЧХ вертикальної хитавиці була перевірена на короткочасному несталому хвилюванні.

Модель СПБУ встановлювалася на відстані 10 м від хвилеутворювача під кутами  $\varphi = 0^\circ$  і  $\varphi = 90^\circ$ . Варіювалося число коливань хвилеутворювача (0.5 і 1) і радіус кривошипа хвилеутворювача  $R = 100$  мм,  $R = 150$  мм,  $R = 195$  мм (при  $R = 195$  мм щит хвилеутворювача робив 0.5 коливання).

Вільна модель випробовувалася тільки при  $R = 100$  мм і визначалися параметри тільки вертикальної хитавиці. Усі інші випробування проводилися для моделі в "запряжці".

Датчик хвилі розташовувався на відстані 1.75 м перед моделлю. Запис несталого хвилювання виконувався при відсутності моделі. Потім встановлювалася модель і виконувалася запис процесів хитавиці  $\zeta(t)$ ,  $\theta(t)$ ,  $\psi(t)$  і хвилювання  $h(t)$ . Ці процеси є вихідними даними для обчислення спектрів процесів хитавиці й хвилювання, а по відомих спектрах визначаються модулі передатних функцій.

Модулі передатних функцій вертикальної, бортової й кільової хитавиці відповідно визначаються за формулами:

$$|\Phi_{\zeta}(\omega)| = \frac{C_{\zeta}}{C_{\psi}} = \frac{\sqrt{\zeta_c^2 + \zeta_s^2}}{\sqrt{h_c^2 + h_s^2}}; \quad (2.2.1.1)$$

$$\frac{1}{k} |\Phi_{\theta}(\omega)| = \frac{C_{\theta}}{C_{\epsilon}} = \frac{\sqrt{\theta_c^2 + \theta_s^2}}{\sqrt{h_c^2 + h_s^2}}; \quad (2.2.1.2)$$

$$\frac{1}{k} |\Phi_{\psi}(\omega)| = \frac{C_{\psi}}{C_{\epsilon}} = \frac{\sqrt{\psi_c^2 + \psi_s^2}}{\sqrt{h_c^2 + h_s^2}}, \quad (2.2.1.3)$$

де  $C_{\epsilon}, C_{\zeta}, C_{\theta}, C_{\psi}$  - модулі складових спектрів хвилювання, вертикальної, бортової й кільової хитавиці відповідно;

$h_{c(s)}, \zeta_{c(s)}, \theta_{c(s)}, \psi_{c(s)}$  - косинусні (синусні) складові відповідних спектрів;

$$k = \frac{\omega^2}{g} \quad - \text{хвильове число.}$$

Гармонійний аналіз вихідних процесів хвилювання й хитавиці, а також розрахунки передатних функцій проводилися на ПЕОМ по спеціальній програмі. Для гармонійного аналізу визначалися 119 ординат вихідних процесів із кроком 0.1 с.

Як приклад наведені передатні функції вертикальної хитавиці - рис. 2.2.1.4, графіки вихідних спектрів хвилювання й хитавиці - рис. 2.2.1.5 - 2.2.1.7. Порівняння рис. 2.2.1.3 і 2.2.1.4 показує задовільну відповідність характеристик вертикальної хитавиці на регулярному і імпульсному хвилюванні. Отримані результати дозволяють вважати характеристики бортової й кільової хитавиці, отримані на імпульсному хвилюванні, достовірними.

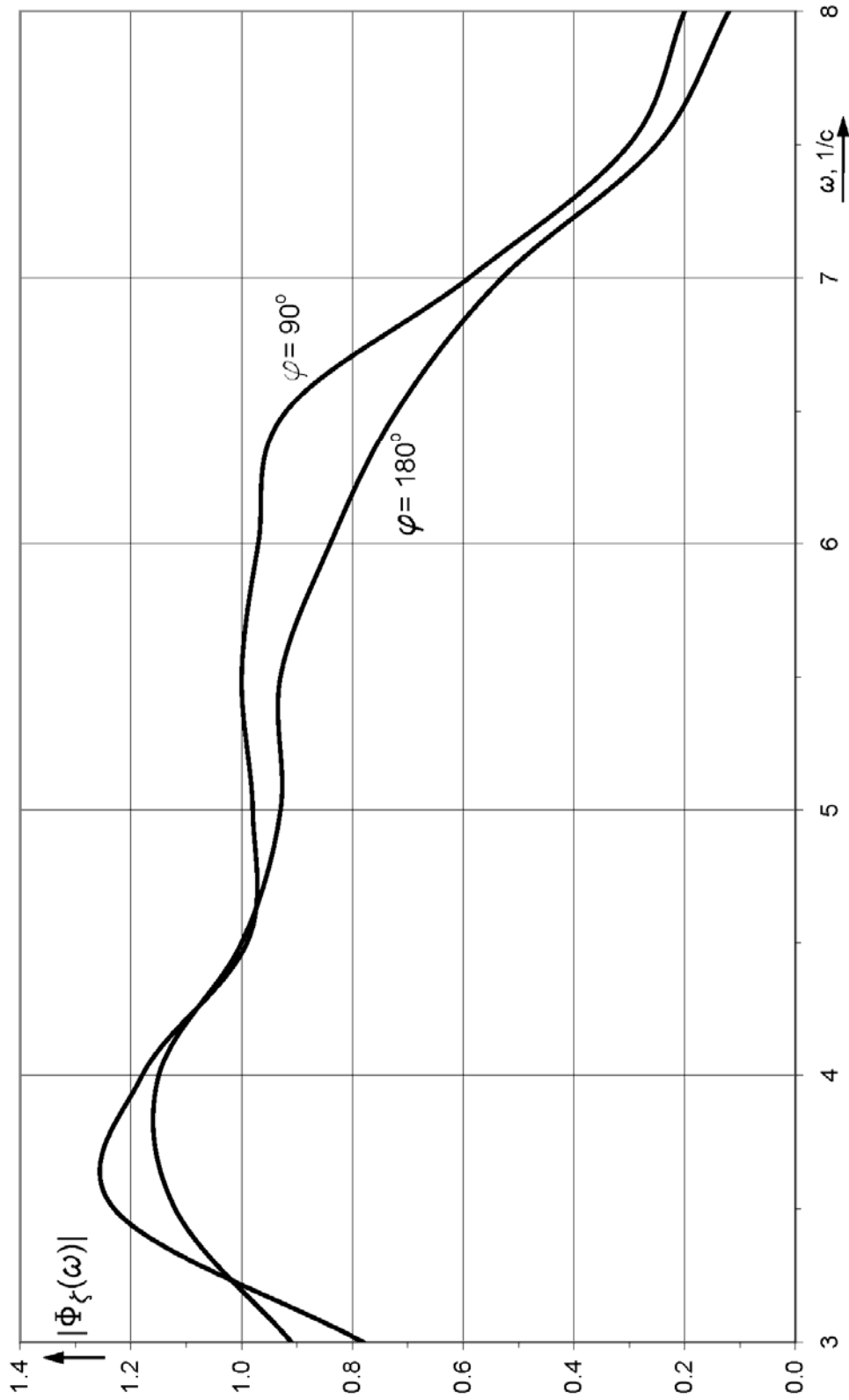


Рис.2.2.1.4 Модуль передатної функції вертикальної хитавиці на імпульсному хвилюванні при  $\varphi = 90^\circ$  і  $180^\circ$

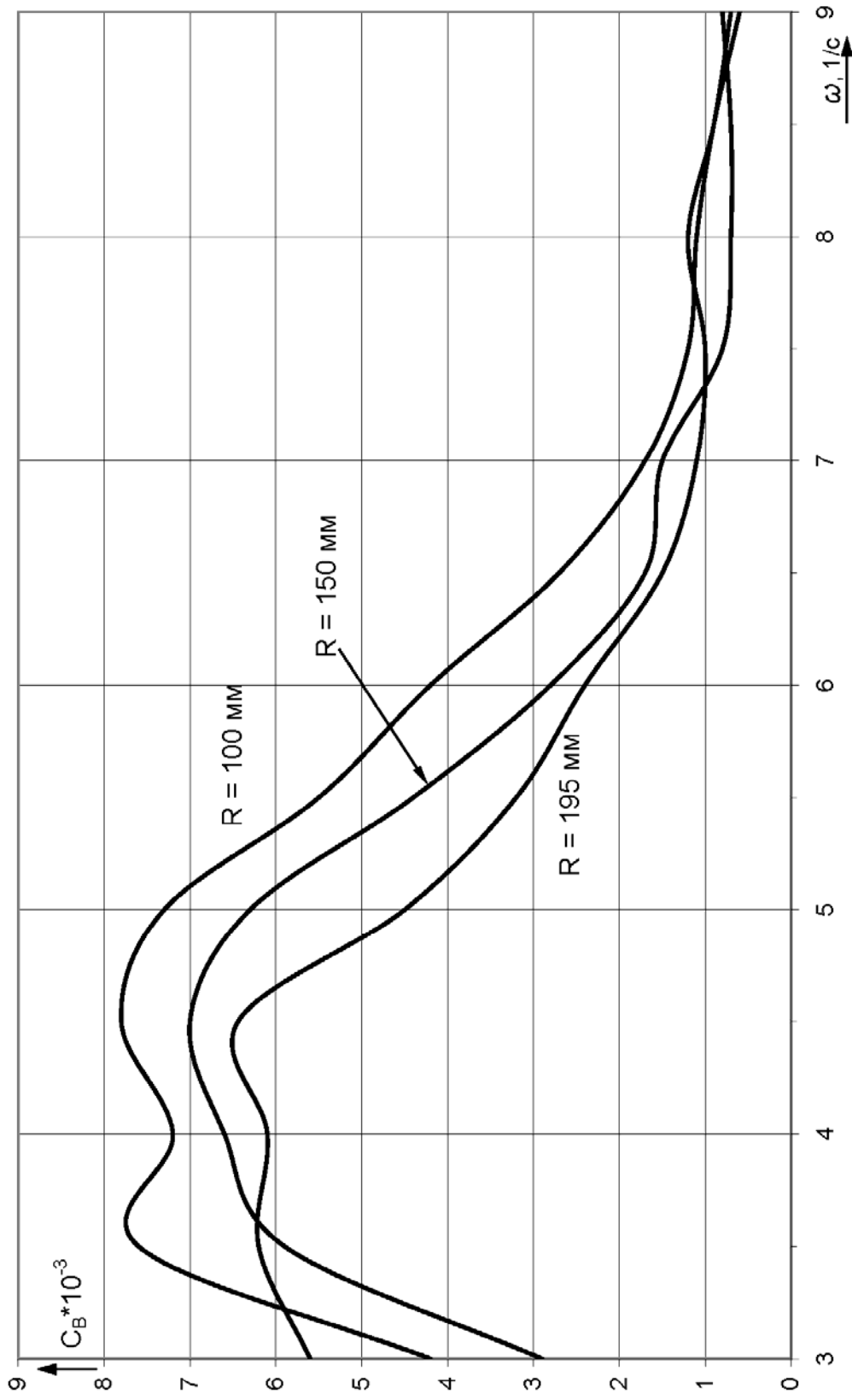


Рис.2.2.1.5 Спектр хвилювання при різних радіусах хвилеутворювача  $R$



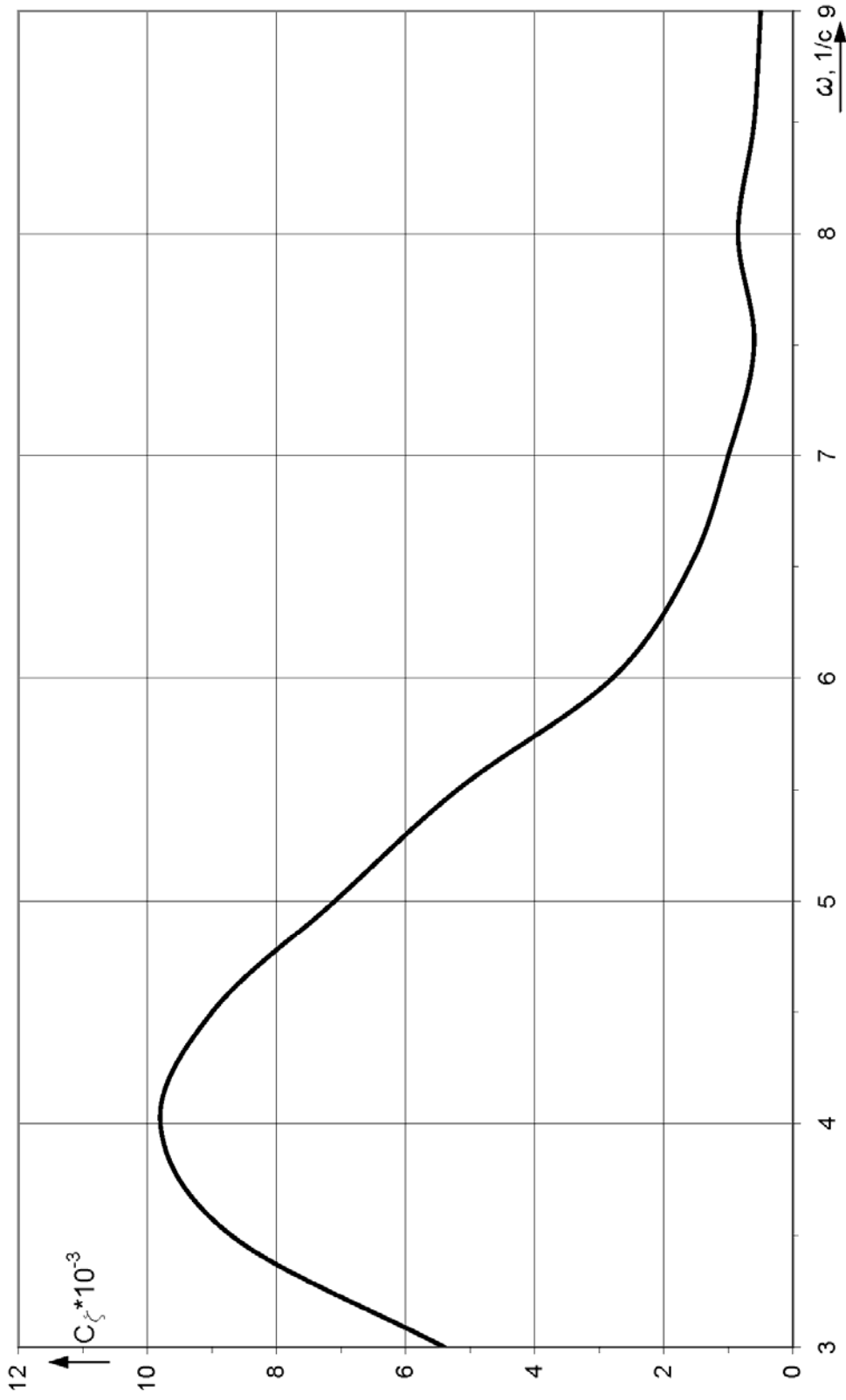


Рис.2.2.1.1.6 Спектр вертикальної хитавиці, радіус хвилеутворювача  $R = 150$  мм

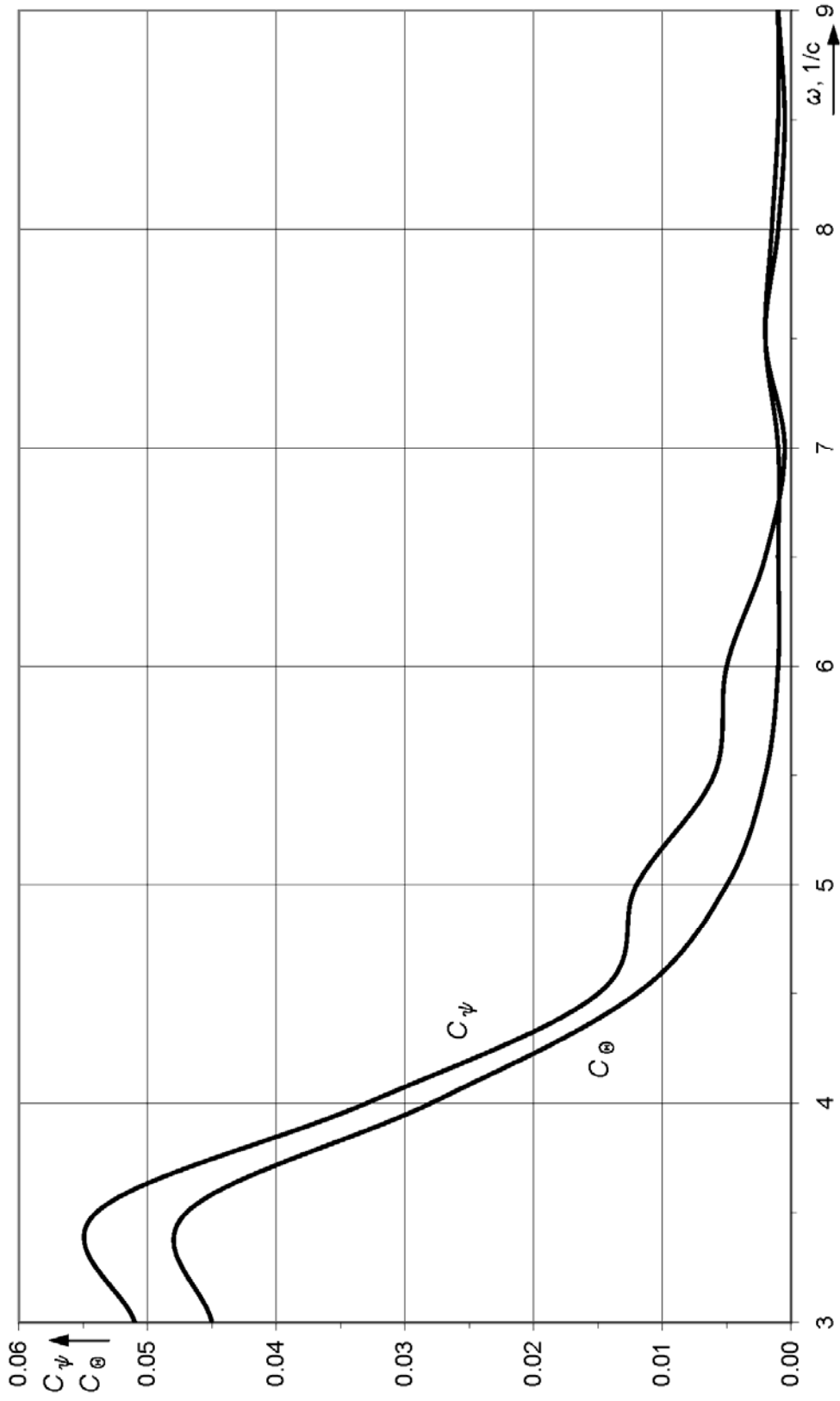


Рис.2.2.1.7 Спектри бортової і кількової хитавиць, радіус хвилеутворювача  $R = 150$  мм

### 2.2.2. Експериментальне визначення приєднаних мас (моментів інерції) і коефіцієнтів опору при поперечно-горизонтальних, вертикальних, бортових і кільових коливаннях моделі СПБУ

В дослідному басейні ОНМУ модифіковано штатне експериментальне устаткування, що дозволяє непрямим методом визначати узагальнені приєднані маси й відповідні коефіцієнти опору моделей, що роблять змушені коливання на тихій воді [2].

Схему устаткування представлено на рис.2.2.2.1. Модель (1) через пілони (4) приводиться в рух електродвигуном (8), установленим на візку (6). Обертання електродвигуна (8) через редуктор (9) за допомогою кулісних механізмів (5) перетворюється у зворотно-поступальний рух пілонів (4) за гармонійним законом. Конструкція кулісних механізмів така, що пілони можуть робити вертикальні або горизонтальні коливання із заданими амплітудою й зсувом фази одного пілона стосовно іншого.

Таким чином, модель може робити вертикальну, кільову, бортову хитавицю, комбінацію вертикальної й кільової хитавиці, поперечно-горизонтальні коливання, рискання й комбінацію поперечно-горизонтальних коливань із рисканням. Між пілонами й моделлю встановлений двокомпонентний динамометр (2) тензометричного типу. Крім того, на візку розташовується спеціальний перемикач (10), що приводиться в рух від вала куліси, і тензопідсилювач (11).

Сигнали з датчиків (3) динамометра (2), пропорційні силам  $F_H(t)$  і  $F_K(t)$ , подаються на тензопідсилювач (11), потім на аналого-цифровий перетворювач (12). Реєстрація й обробка результуючих

процесів проводяться на ПЕОМ, для цього створена спеціальна програма.

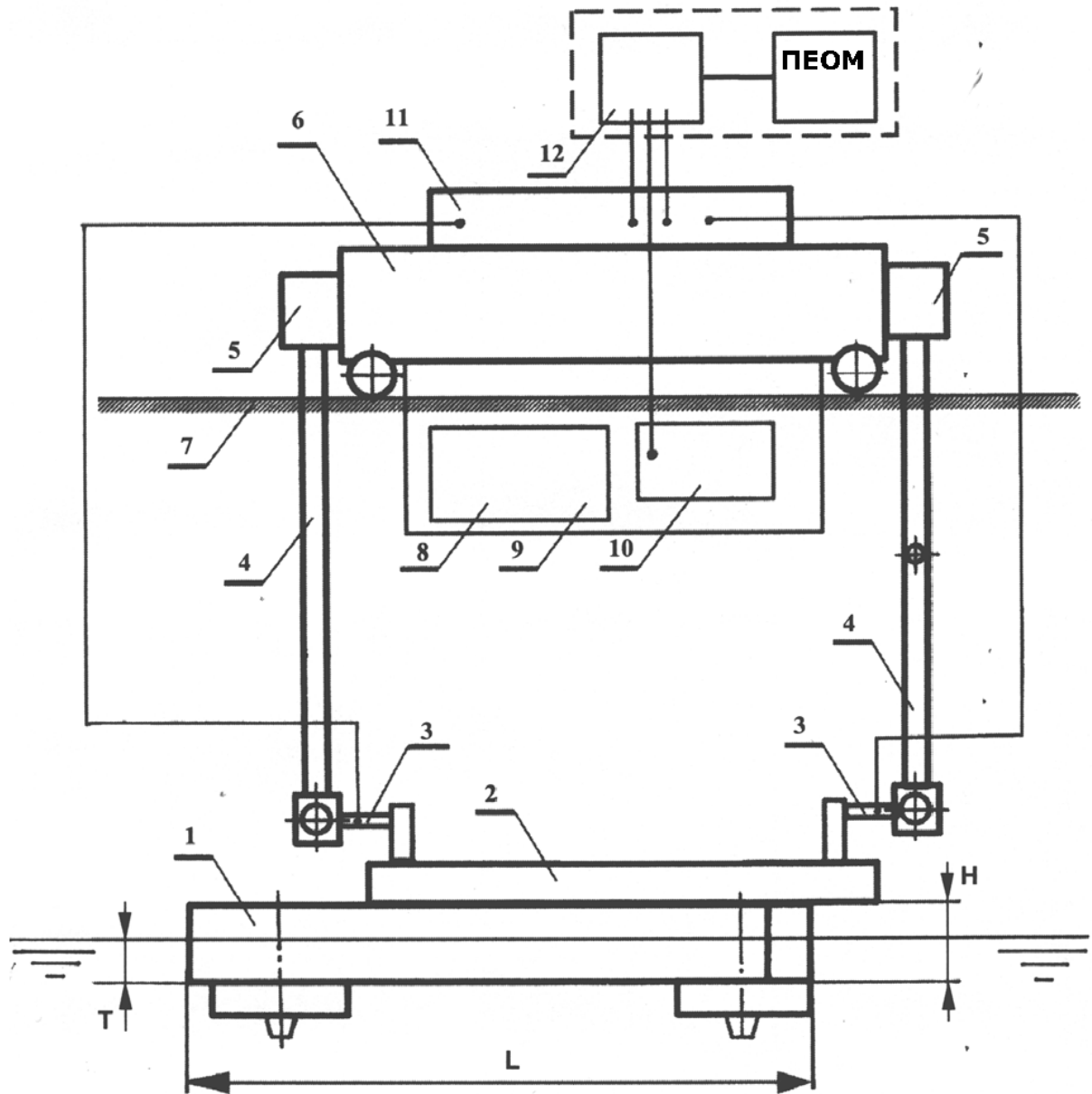


Рис. 2.2.2.1 Схема експериментального устаткування

Диференціальні рівняння змушених коливань моделі мають вигляд:

$$\begin{aligned}
 (M + \lambda_{33})\ddot{z} + \mu_{33}\dot{z} + \rho g S z &= F_3 \cos(\omega t + \alpha_3); \\
 (I_Y + \lambda_{55})\ddot{\psi} + \mu_{55}\dot{\psi} + \rho g I_Y^* \psi &= F_5 \cos(\omega t + \alpha_5); \\
 (M + \lambda_{22})\ddot{y} + \mu_{22}\dot{y} &= F_2 \cos(\omega t + \alpha_2); \\
 (I_X + \lambda_{44})\ddot{\theta} + \mu_{44}\dot{\theta} + \rho g I_X^* \theta &= F_4 \cos(\omega t + \alpha_4),
 \end{aligned}
 \tag{2.2.2.1}$$

де  $M$  - маса моделі;  
 $I_X, I_Y$  - моменти інерції мас моделі відносно відповідних координатних осей;  
 $\lambda_{ii}, \mu_{ii}$  - узагальнені приєднані маси й відповідні коефіцієнти опору,  $i = 1 \dots 4$ ;  
 $S$  - площа ватерлінії;  
 $I_X^*, I_Y^*$  - моменти інерції площі ватерлінії відносно відповідних осей;  
 $F_i$  - амплітуди збурюючих сил (моментів);  
 $\omega$  - частота змушених коливань;  
 $\alpha_i$  - кут зсуву фаз між збурюючими силами (моментами) і відповідними коливаннями моделі.

Миттєві значення лінійних і кутових переміщень моделі представляються у вигляді:

$$\begin{aligned}
 z &= z_0 \cos \omega t; & \psi &= \psi_0 \cos \omega t; \\
 y &= y_0 \cos \omega t; & \theta &= \theta_0 \cos \omega t.
 \end{aligned}
 \tag{2.2.2.2}$$

Підставляючи в рівняння (2.2.2.1) миттєві значення переміщень, їх перші й другі похідні, одержуємо наступні вираження для гідродинамічних коефіцієнтів:

$$\begin{aligned}
\lambda_{33} &= \frac{\rho g S z_0 - F_3 \cos \alpha_3}{\omega^2 z_0} - M; & \mu_{33} &= \frac{F_3 \sin \alpha_3}{\omega z_0}; \\
\lambda_{55} &= \frac{\rho g I_Y^* \psi_0 - F_5 \cos \alpha_5}{\omega^2 \psi_0} - I_Y; & \mu_{55} &= \frac{F_5 \sin \alpha_5}{\omega \psi_0}; \\
\lambda_{22} &= \frac{-F_2 \cos \alpha_2}{\omega^2 y_0} - M; & \mu_{22} &= \frac{F_2 \sin \alpha_2}{\omega y_0}; \\
\lambda_{44} &= \frac{\rho g I_X^* \theta_0 - F_4 \cos \alpha_4}{\omega^2 \theta_0} - I_X; & \mu_{44} &= \frac{F_4 \sin \alpha_4}{\omega \theta_0}.
\end{aligned}
\tag{2.2.2.3}$$

З виражень (2.2.2.3) випливає, що для визначення шуканих гідродинамічних коефіцієнтів необхідно виміряти як амплітуди збурюючих сил (моментів), так і відповідні кути зсуву фаз. Для цього виконаємо перетворення правих частин рівнянь (2.2.2.1) – помножимо їх на допоміжні функції  $f_C(t)$  і  $f_S(t)$  й проінтегруємо за ціле число періодів. Тоді для вертикальних коливань при  $f_C(t) = \cos \omega t$  й  $f_S(t) = \sin \omega t$  одержимо:

$$\begin{aligned}
\int_0^{2\pi/\omega} F_3 \cos(\omega t + \alpha_3) \cos \omega t dt &= \frac{\pi n}{\omega} F_3 \cos \alpha_3; \\
\int_0^{2\pi/\omega} F_3 \cos(\omega t + \alpha_3) \sin \omega t dt &= -\frac{\pi n}{\omega} F_3 \sin \alpha_3;
\end{aligned}
\tag{2.2.2.4}$$

$$n = 1, 2, \dots$$

Аналогічні вираження можна одержати для інших видів коливань. Слід урахувати, що допоміжні функції не обов'язково повинні бути синусоїдальними, це можуть бути будь-які інші періодичні функції періоду  $2\pi/\omega$ , але при цьому в правих частинах формул (2.2.2.4) і аналогічних їм для інших видів коливань будуть

інші коефіцієнти. Найбільш прості функції представлено на рис. 2.2.2.2, при цьому коефіцієнт  $m/\omega$  міняється на  $4\pi/\omega$ . Допоміжні функції даного виду виходять за допомогою спеціального перемикача 10.

Положення центру ваги моделі по висоті, перераховане з натури, моделювалося за допомогою балансувального вантажу на рейці (рис. 2.2.1.1). Визначалися гідродинамічні коефіцієнти хитавиці при вертикальних, кільових, поперечно-горизонтальних і бортових коливаннях. Амплітуда переміщень пілонів для всіх видів коливань була прийнята однаковою, рівною 0,005 м. У результаті динамічного тарування моделі в повітрі (рис. 2.2.1.1) для даного завантаження визначені моменти інерції мас відносно осей  $x$  і  $y$ .

За результатами експериментів побудовані графіки залежностей узагальнених приєднаних мас і коефіцієнтів опору від частоти  $\omega$  (рис. 2.2.2.3 – 2.2.2.6). Гідродинамічні коефіцієнти представлені наступними вираженнями:

$$\begin{aligned} \bar{\lambda}_{ii} &= \frac{\lambda_{ii}}{\rho V}; & \bar{\mu}_{ii} &= \frac{\mu_{ii}}{\rho V \omega}; & (i = 2,3); \\ \bar{\lambda}_{ii} &= \frac{\lambda_{ii}}{\rho V L^2}; & \bar{\mu}_{ii} &= \frac{\mu_{ii}}{\rho V \omega L^2}; & (i = 4,5); \end{aligned} \quad (2.2.2.5)$$

де  $\rho$  - густина води;

$L$  - довжина моделі;

$V$  - об'ємна водотоннажність моделі.

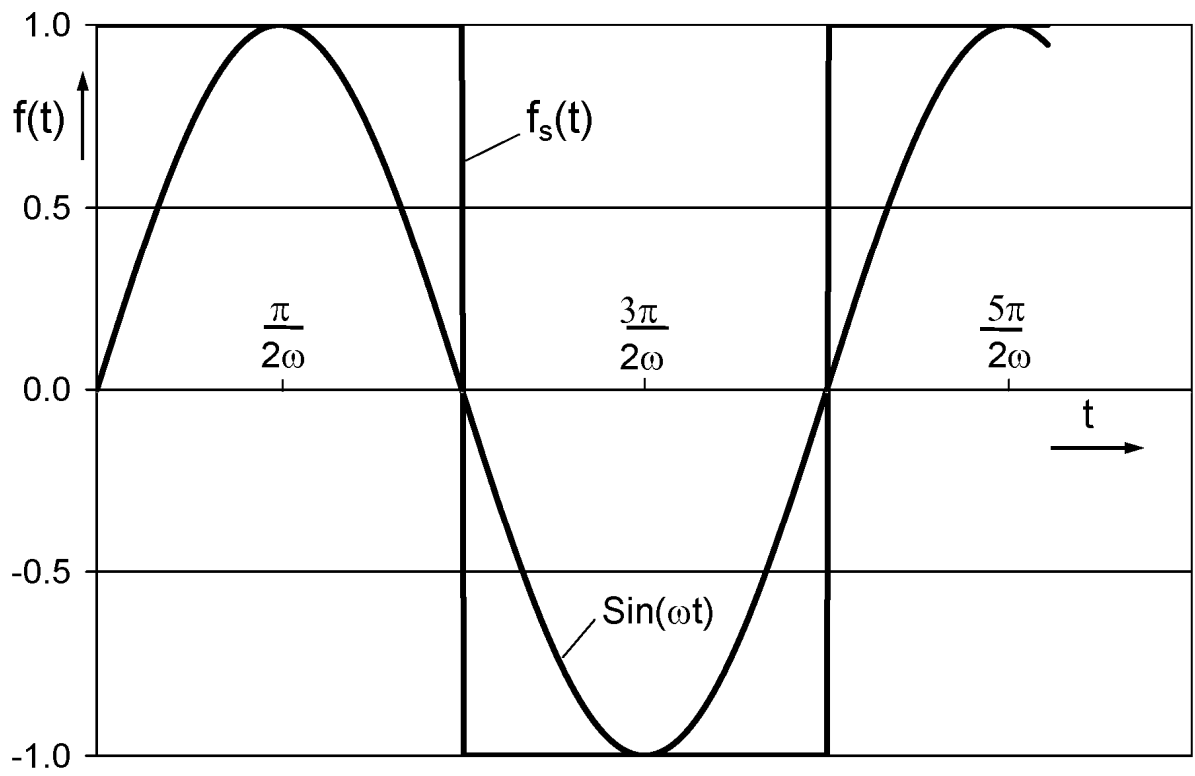
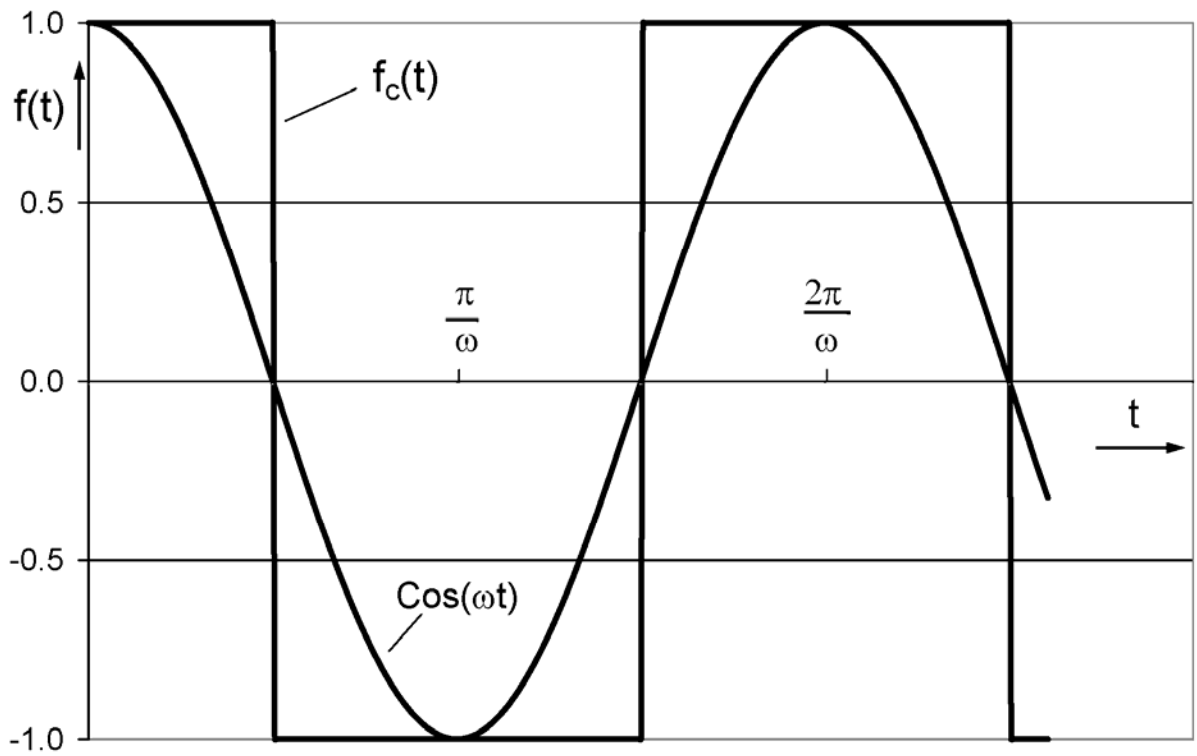


Рис. 2.2.2.2 Допоміжні функції



Отримані в результаті експериментів значення узагальнених приєднаних мас і коефіцієнтів опору для даного об'єкта не можуть бути визначені теоретичним шляхом через відсутність відповідних розрахункових методик. Слід урахувати, що крім наведених у даній роботі гідродинамічних коефіцієнтів на описаному устаткуванні можна визначити ще коефіцієнти зв'язку  $\lambda_{35}, \mu_{35}, \lambda_{26}, \mu_{26}$ . Результати експериментів можуть бути використані для розрахунків кінематичних характеристик хитавиці.

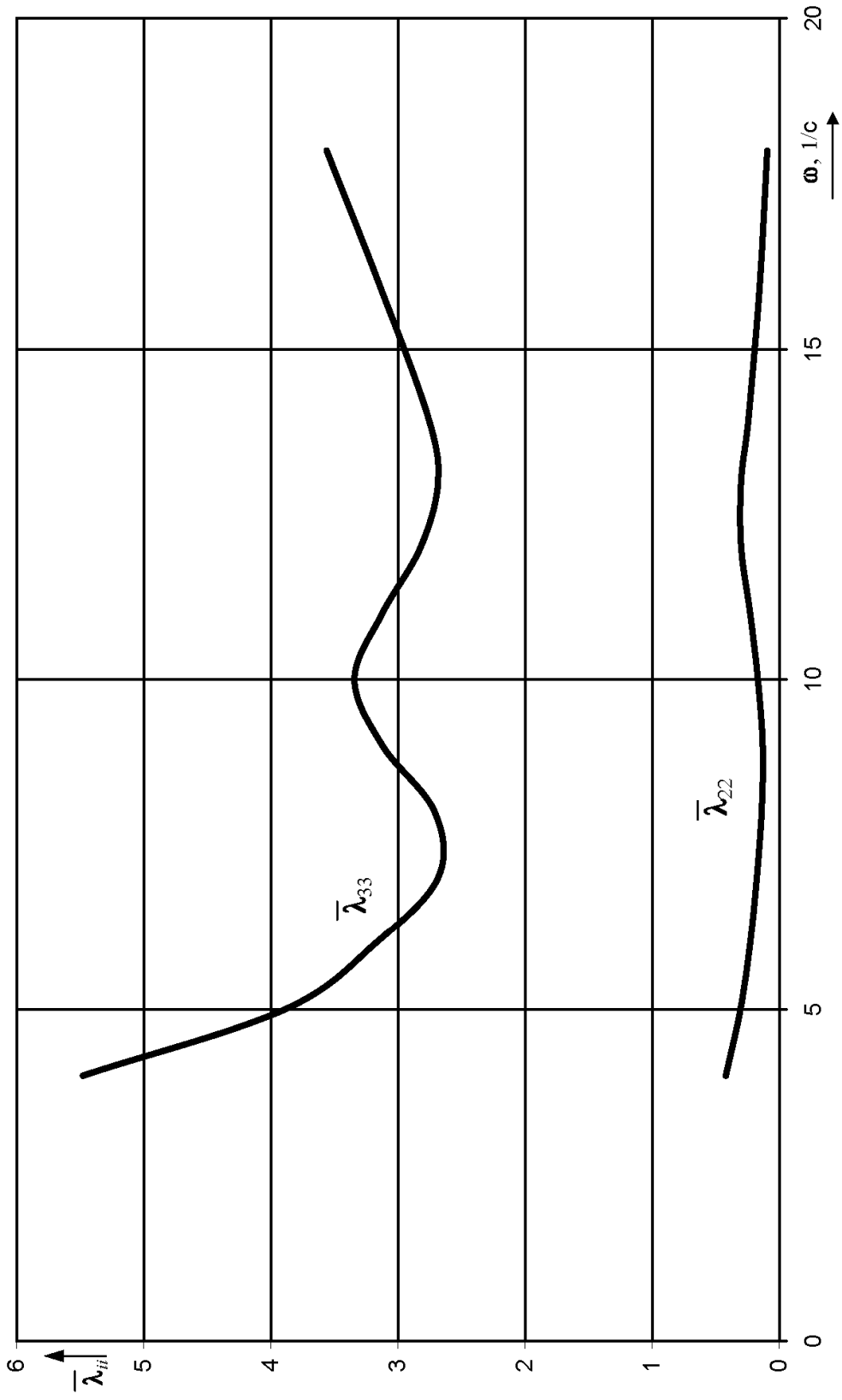


Рис.2.2.2.3 Узагальнені приєднані маси

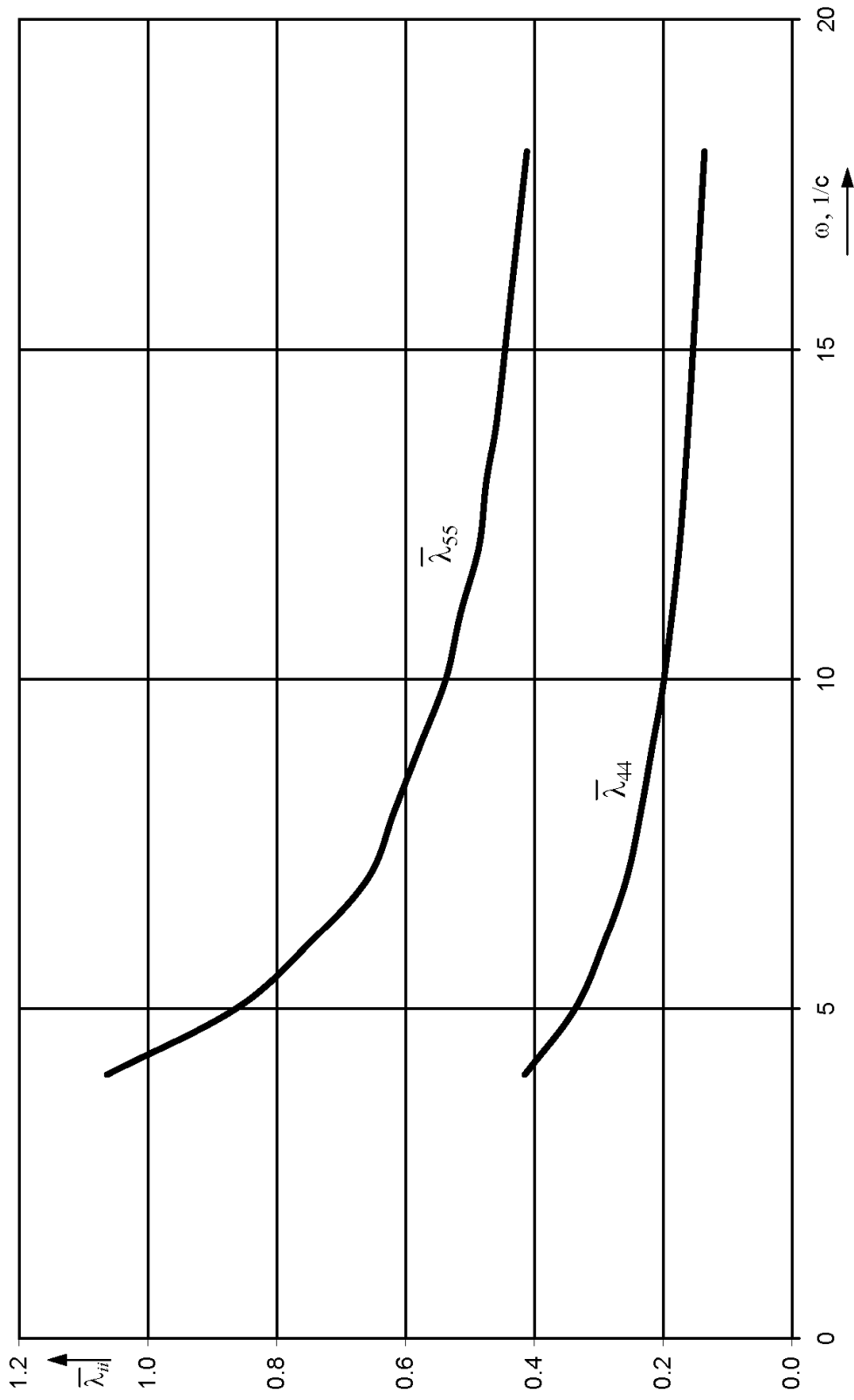


Рис.2.2.2.4 Узагальнені приєднані маси

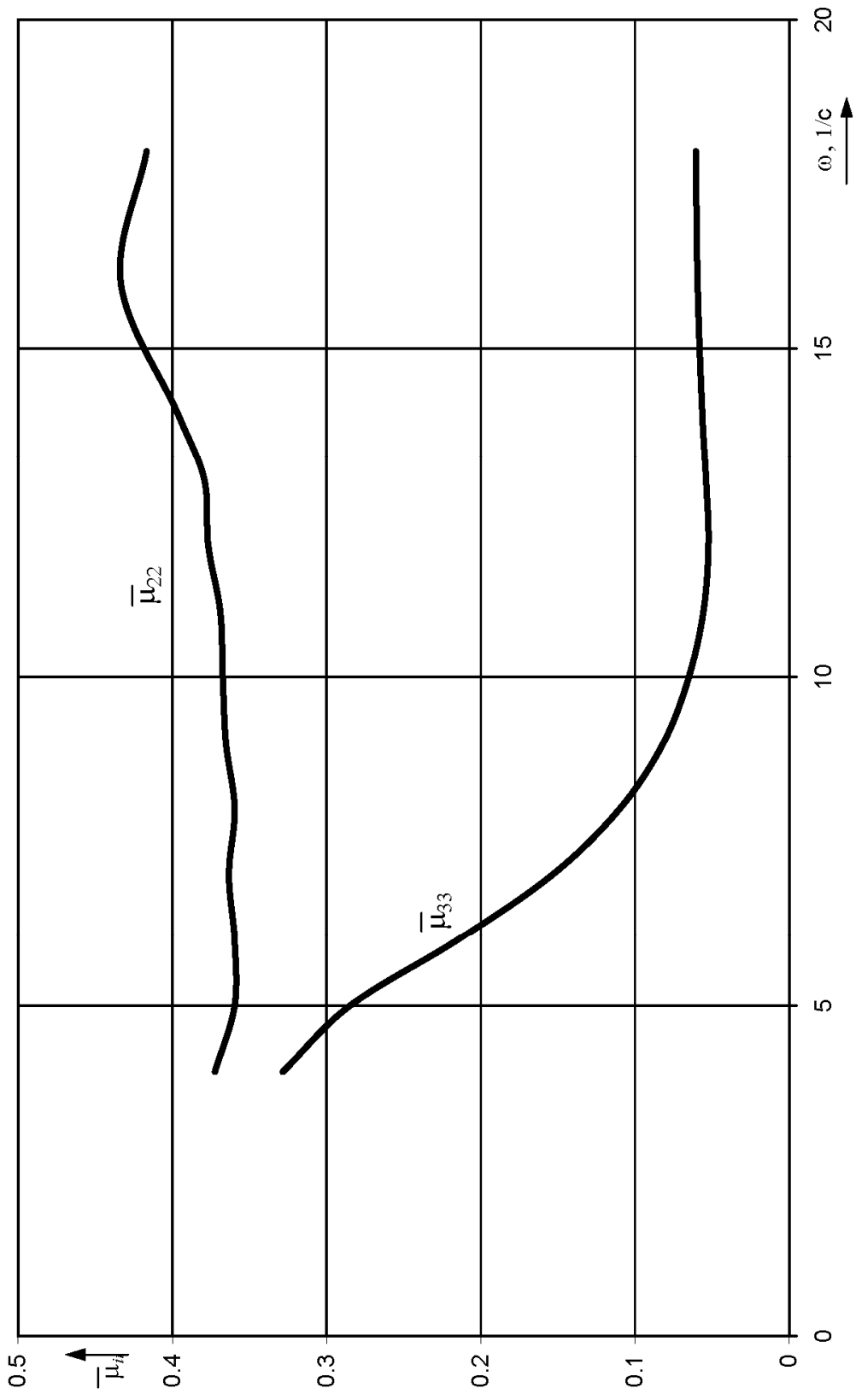


Рис.2.2.2.5 Коэффициенты опоры

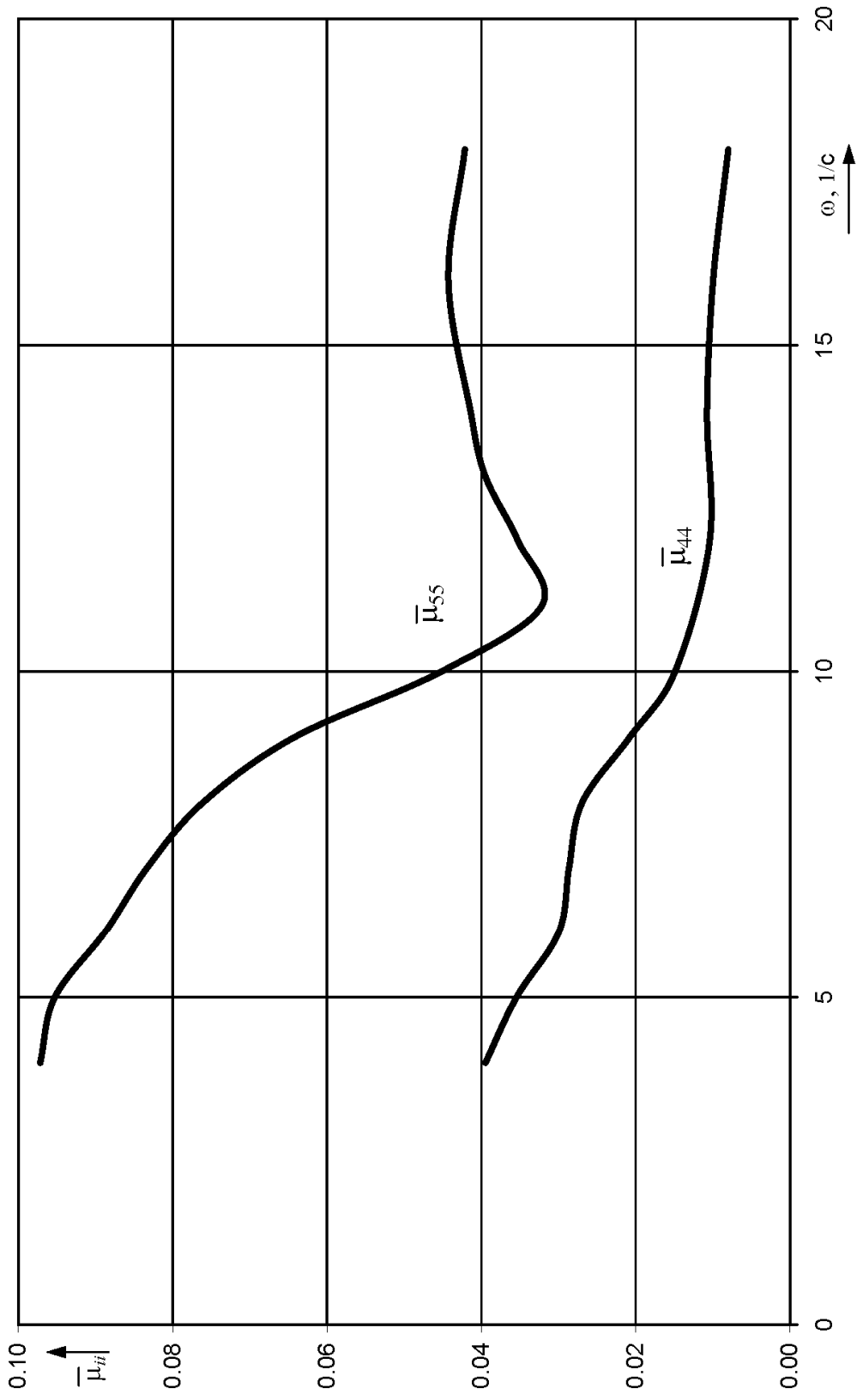


Рис.2.2.2.6 Коэффициенты опоры

### 2.2.3. Експериментальне дослідження збурюючих сил і моментів моделі СПБУ на регулярнім хвилюванні

Для визначення збурюючих сил і моментів, що діють на жорстко закріплену модель СПБУ із боку регулярного хвилювання, що набігає, в дослідному басейні ОНМУ спроектовано й виготовлено спеціальне експериментальне устаткування [1], його кінематичну схему показано на рис. 2.2.3.1.

Шостикомпонентний динамометр установлюється на модель і за допомогою пілонів кріпиться до траверзи. Залежно від рівня води пілони переміщуються вертикально відносно траверзи й фіксуються в потрібному положенні. Траверзу кріпиться до опорних балок і фермі за допомогою шпильок. Траверзу може бути повернена навколо вертикальної осі й зафіксована стосовно фронту хвилювання під кутами від 0 до 90° (через 15°).

Вимірювальне устаткування складається з датчиків і тензометричного підсилювача ТОПАЗ-3, підключеного до персонального комп'ютера.

Розташування датчиків динамометра (усі – тензометричного типу) показано на рис. 2.2.3.1. Датчик хвилі струнного типу встановлений перед моделлю. Реєстрація й обробка результатуючих процесів проводяться на ПЕОМ, для цього створена спеціальна програма. Два датчики вертикальних сил  $F_{ZH}$  і  $F_{ZK}$  визначають вертикальну збурюючу силу  $F_Z \sim F_{ZH} + F_{ZK}$  й збурюючий момент  $M_Y \sim F_{ZH} - F_{ZK}$  відповідно. Два датчики горизонтальних сил  $F_{YH}$  і  $F_{YK}$  визначають горизонтальну збурюючу силу  $F_Y \sim F_{YH} + F_{YK}$  та збурюючий момент  $M_Z \sim F_{YH} - F_{YK}$ .



По одному датчику використовується для фіксації процесів  $F_X(t)$ ,  $M_X(t)$  і  $h_B(t)$ .

Статичне тарування датчиків вертикальних сил  $F_{ZH}$  і  $F_{ZK}$ , горизонтальних сил  $F_X$ ,  $F_{YH}$ ,  $F_{YK}$  і датчика моменту  $M_X$  проводилося навантаженням їх відомими силами й моментами уздовж осей чутливості. Тарування датчиків показало лінійну залежність відхилень у діапазоні вимірюваних величин сил і моментів і відсутність їх взаємного впливу.

Модель закріплюється під заданим курсовим кутом до напрямку розповсюдження хвиль. Система координатних осей  $Oxyz$ , жорстко пов'язана з моделлю, зображено на рис. 2.2.3.1, вісь  $Ox$  проведена через датчики вертикальних сил. Курсовий кут хвилювання  $\varphi$  вимірюється між напрямом розповсюдження хвиль уздовж осі басейну й віссю  $O_1x_1$ , що міститься в площині ватерлінії моделі, її напрям співпадає з віссю  $Ox$ . Регулярне хвилювання створювалося пластинчастим хвилеутворювачем у діапазоні частот від  $\sigma = 5 \text{ с}^{-1}$  до  $\sigma = 10 \text{ с}^{-1}$ , що відповідає відносним довжинам хвиль від  $\frac{\lambda}{L} = 0,7$  до

$\frac{\lambda}{L} = 2,5$ , де  $L$  - довжина моделі,  $\lambda$  - довжина хвилі. При кожному курсовому куті створювалося 8 - 10 хвиль із цього діапазону з відносною висотою хвилі від  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{40}$  до  $\frac{h}{\lambda} = \frac{1}{50}$  ( $h$  - висота хвилі).

Були випробувано два варіанти моделі СПБУ - "голий" корпус (понтон без опорних колон і башмаків) і понтон з колонами й башмаками, причому в обох випадках осадка понтона була однаковою.



За результатами експериментів побудовані графіки залежностей від курсового кута  $\varphi$  відносних амплітуд збурюючих сил (рис. 2.2.3.2 – 2.2.3.7) і моментів (рис. 2.2.3.8 – 2.2.3.13) при різних значеннях відносної довжини хвилі  $\frac{\lambda}{L}$ . Відносні амплітуди збурюючих сил і моментів представлені наступними вираженнями:

$$\begin{aligned}\overline{F_X} &= \frac{F_X^{\max}}{a\rho g\Omega}; & \overline{M_X} &= \frac{M_X^{\max}}{a\rho gV}; \\ \overline{F_Y} &= \frac{F_Y^{\max}}{a\rho gLT}; & \overline{M_Y} &= \frac{M_Y^{\max}}{a\rho gSL}; \\ \overline{F_Z} &= \frac{F_Z^{\max}}{a\rho gS}; & \overline{M_Z} &= \frac{M_Z^{\max}}{a\rho gL^2T},\end{aligned}\tag{2.2.3.1}$$

де  $a$  - амплітуда хвилі;

$\rho$  - густина води;

$g$  - прискорення сили ваги;

$L$  - довжина моделі;

$T$  - осадка моделі;

$S$  - площа ватерлінії;

$V$  - об'ємна водотоннажність моделі;

$\Omega$  - площа перетину, який має максимальну ширину.

Найбільші значення сил  $\overline{F_X}$ ,  $\overline{F_Z}$  і моментів  $\overline{M_X}$ ,  $\overline{M_Y}$  для понтона з колонами й понтона без колон спостерігаються при  $\frac{\lambda}{L} = 2,5$

при всіх кутах набігання хвилювання, сили  $\overline{F_Y}$  - при  $\frac{\lambda}{L} = 2$  або при

$\frac{\lambda}{L} = 2,5$  залежно від цього кута. Мінімальні значення зазначених сил і моментів – при  $\frac{\lambda}{L} = 0,7$ . Виключення становить момент  $\overline{M_Z}$  - максимальне значення при  $\frac{\lambda}{L} = 1,0$  для понтона без колон, при  $\frac{\lambda}{L} = 1,0$  або  $\frac{\lambda}{L} = 0,7$  для понтона з колонами, мінімальне – при  $\frac{\lambda}{L} = 2,5$  в обох випадках. Криві, що представляють збурюючі сили і моменти, для понтона без колон мають більш плавний характер, ніж для понтона з колонами. Кількість максимумів і їх розташування залежно від курсового кута хвилювання різні для понтона без колон і для понтона з колонами.

Результати експериментів показують, що амплітудні значення поперечної й вертикальної сил та моменту, що кренить, для випадків наявності й відсутності колон відрізняються несуттєво. Отже, розрахунки сил можна виконувати без урахування впливу колон. Амплітудні значення поздовжньої сили, моменту, що диферентує й моменту рихання значно відрізняються. Тому експериментальні дослідження збурюючих сил і моментів дозволяють, по-перше, оцінити результати теоретичних розрахунків головної й дифракційної частин збурюючих сил, по-друге - безпосередньо використовувати результати вимірів для розрахунків хитавиці конкретних об'єктів, для яких проводився експеримент.

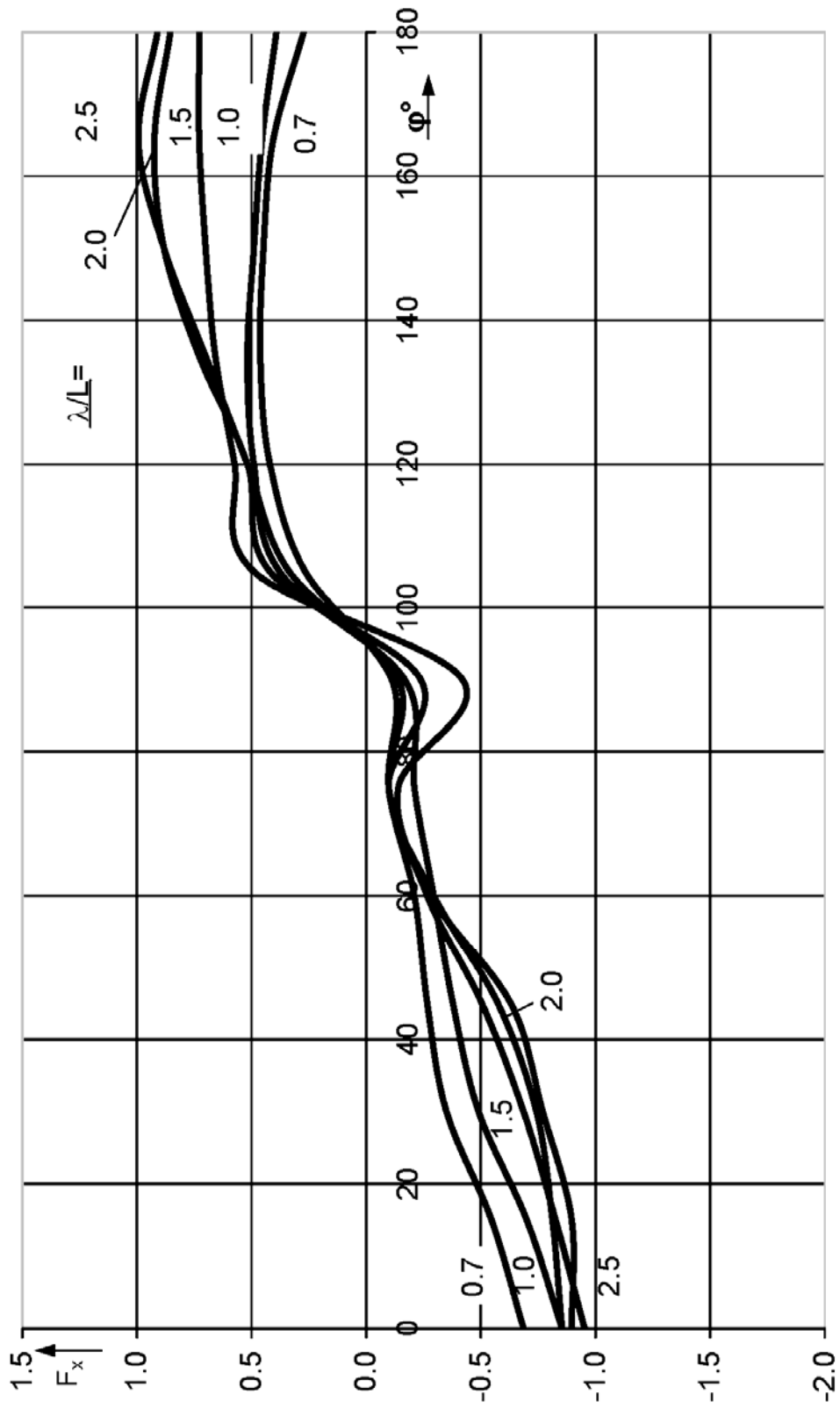
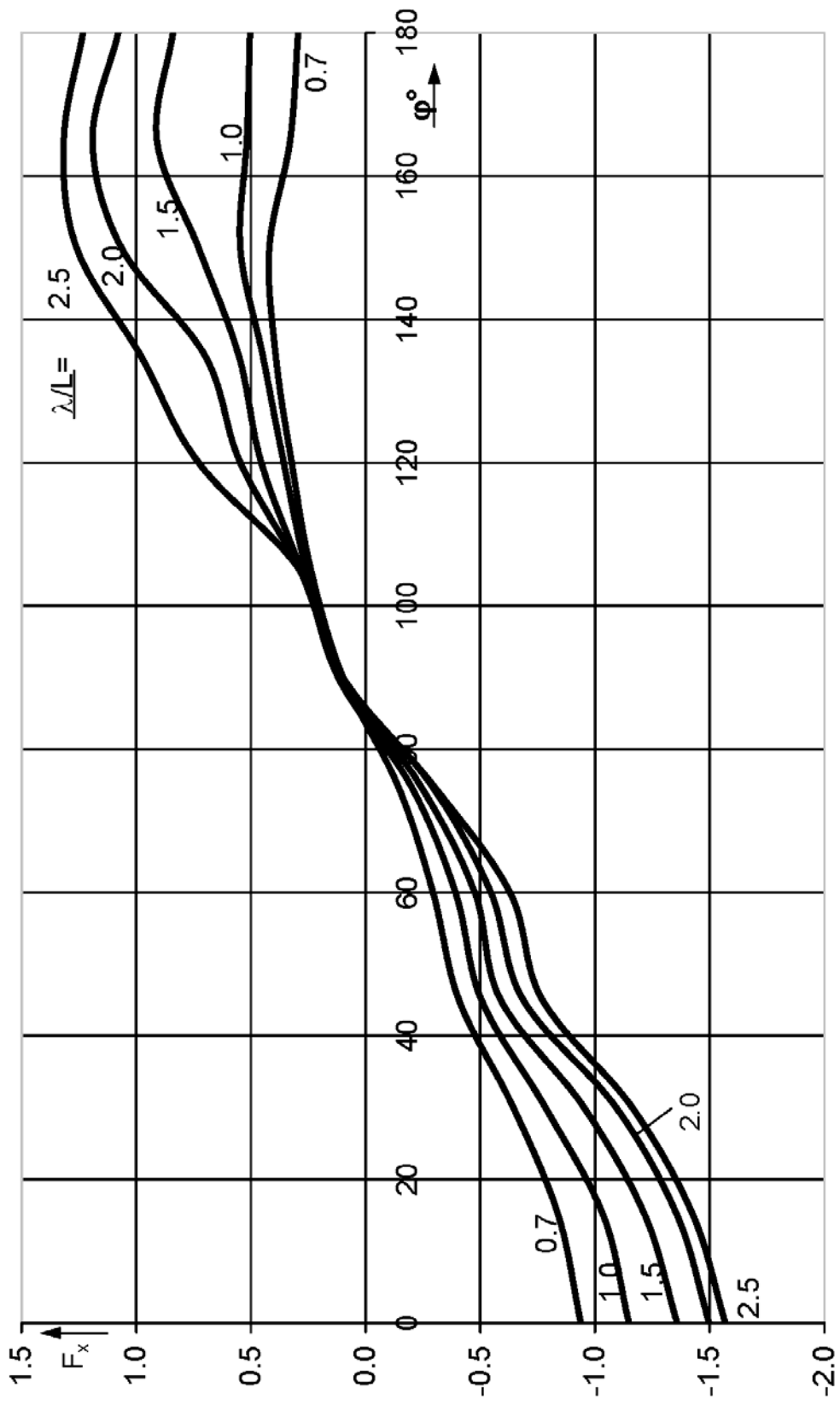


Рис.2.2.3.2 Збурююча сила  $F_x$ , понтон без колон

Рис.2.2.3.3 Збурююча сила  $F_x$ , понтон з колонами

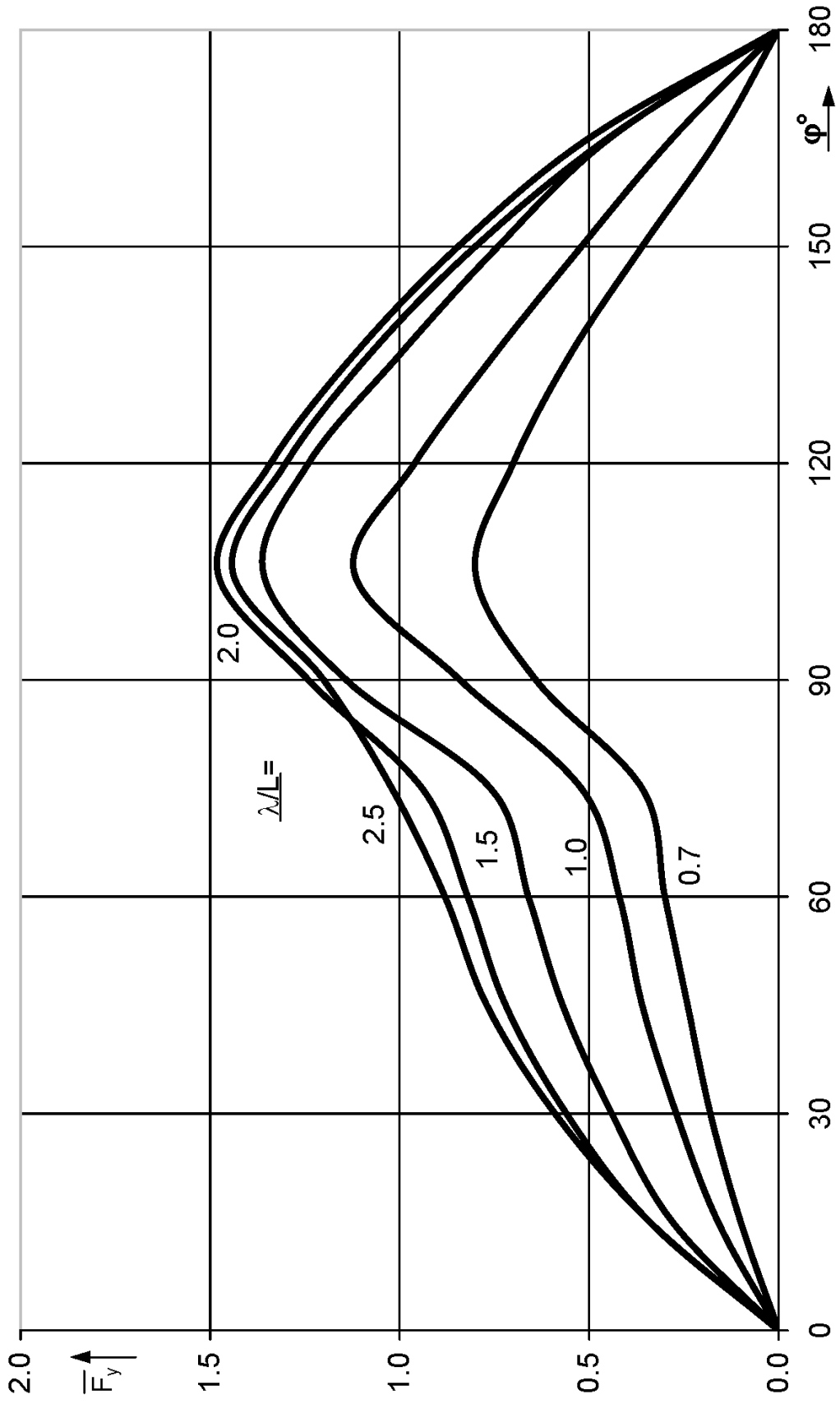
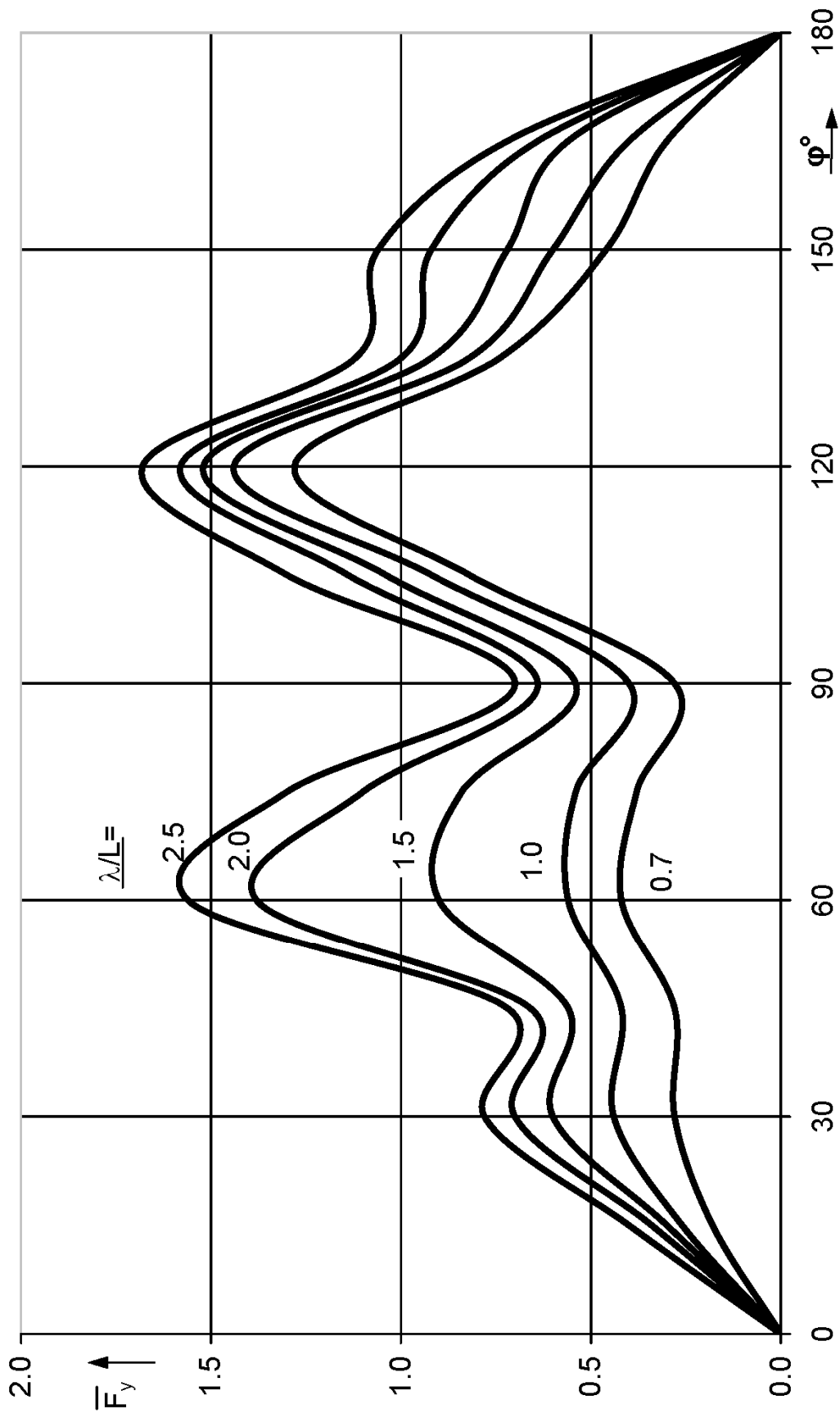
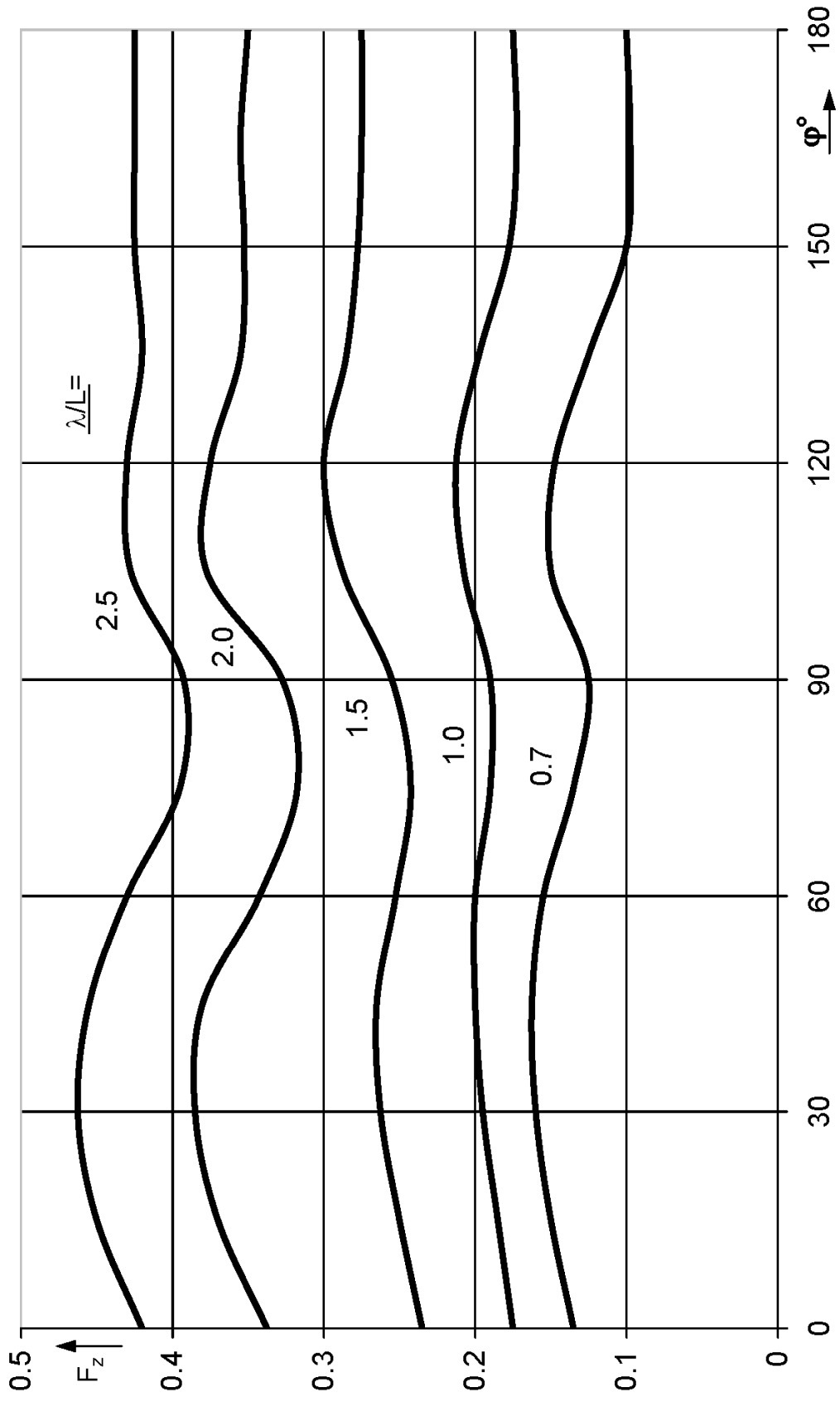


Рис.2.2.3.4 Збурююча сила  $F_y$ , понгон без колон

Рис.2.2.3.5 Збурююча сила  $F_y$ , понтон з колонами

Рис.2.2.3.6 Збурююча сила  $F_z$ , понтон без колон

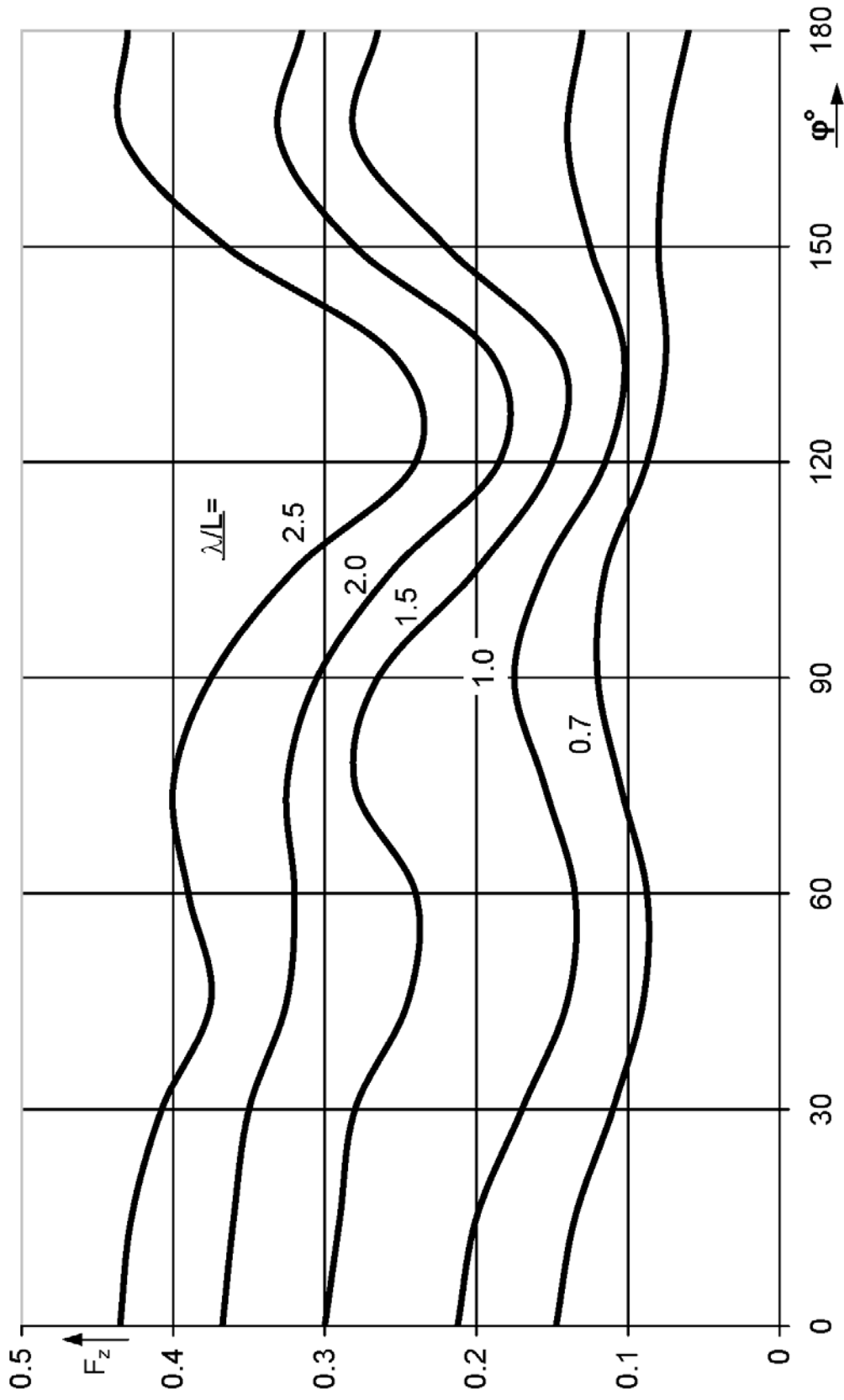


Рис.2.2.3.7 Збурююча сила  $F_z$ , понтон з колонами



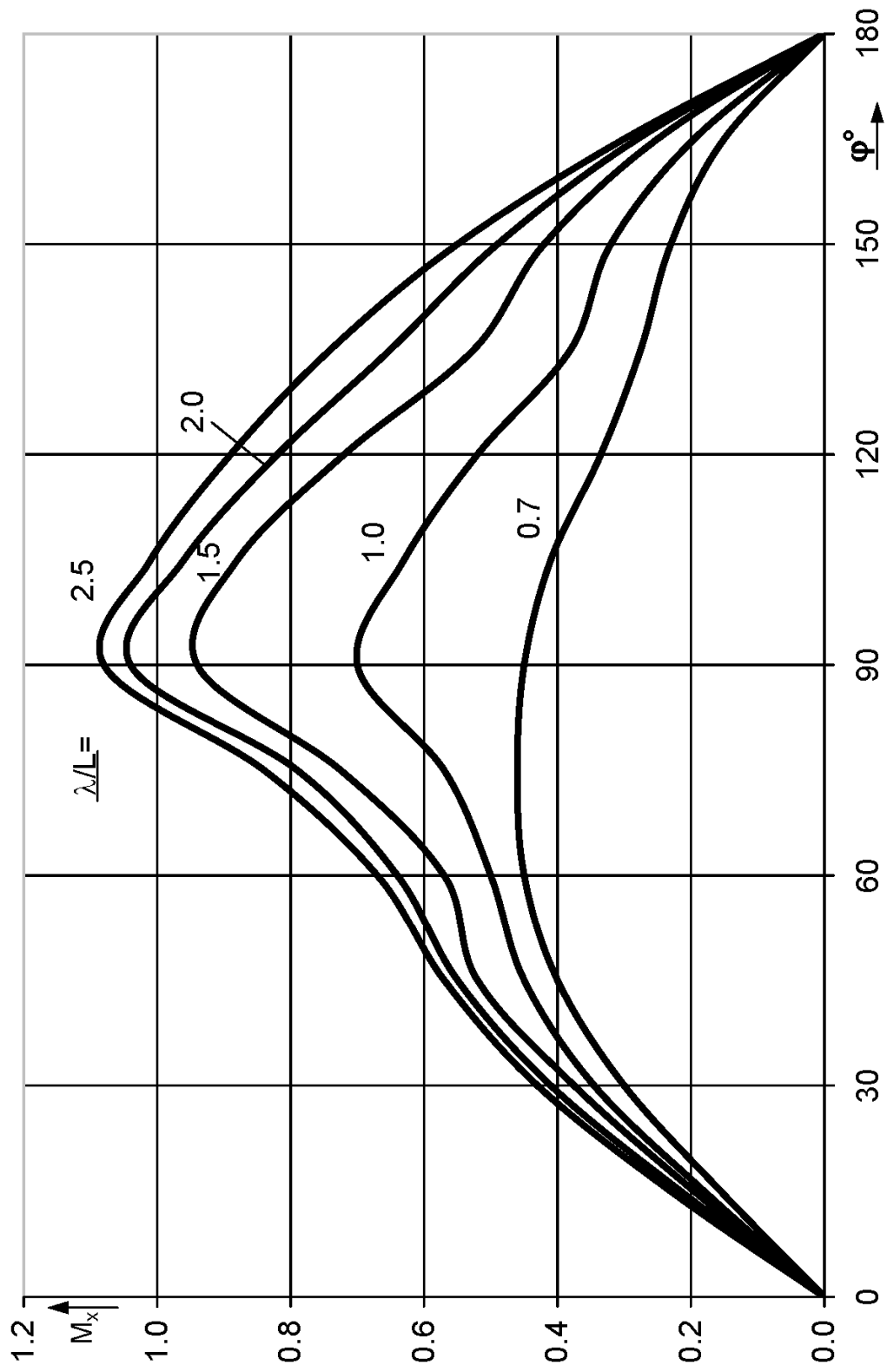


Рис.2.2.3.8 Збурюючий момент  $M_x$ , понтон без колон

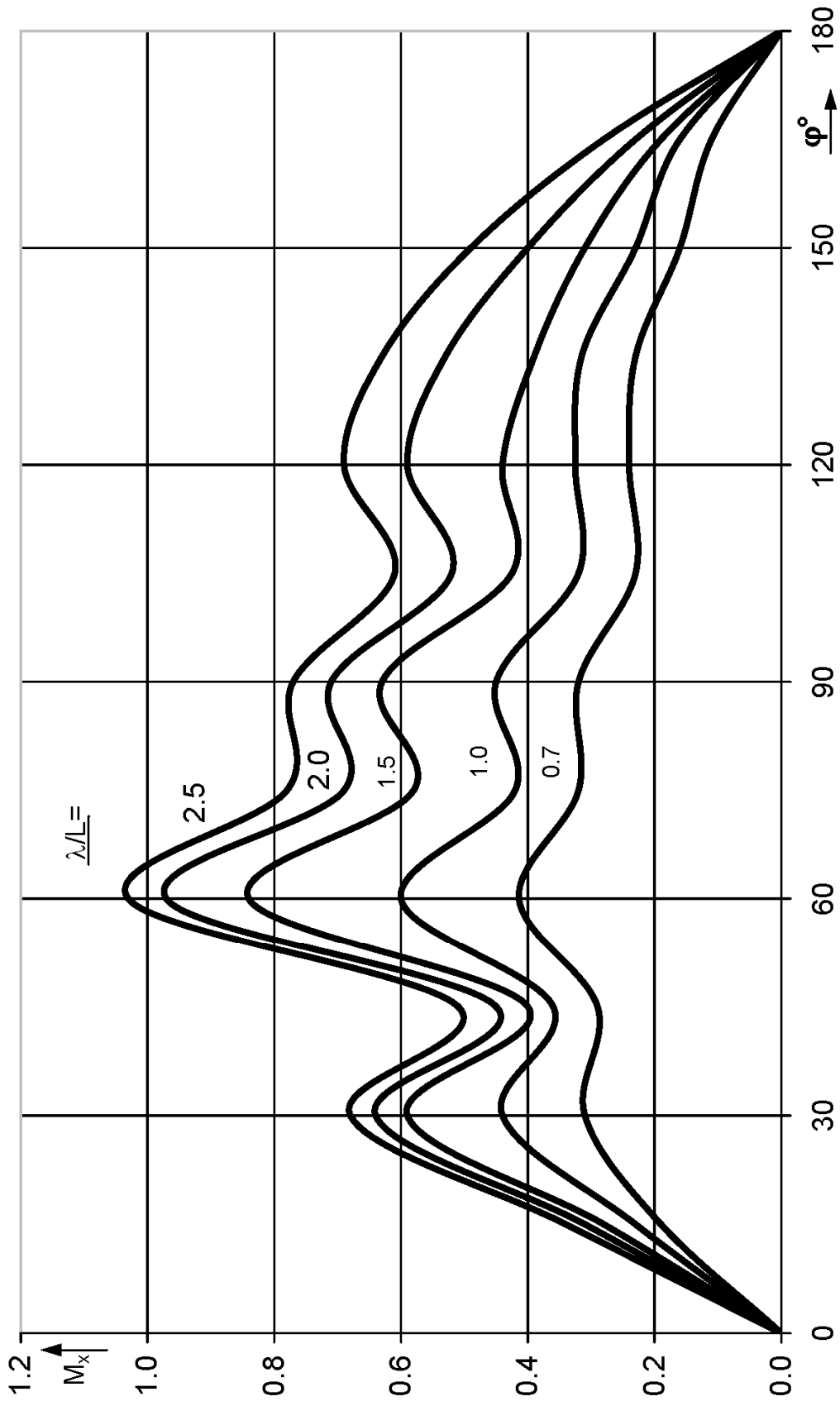
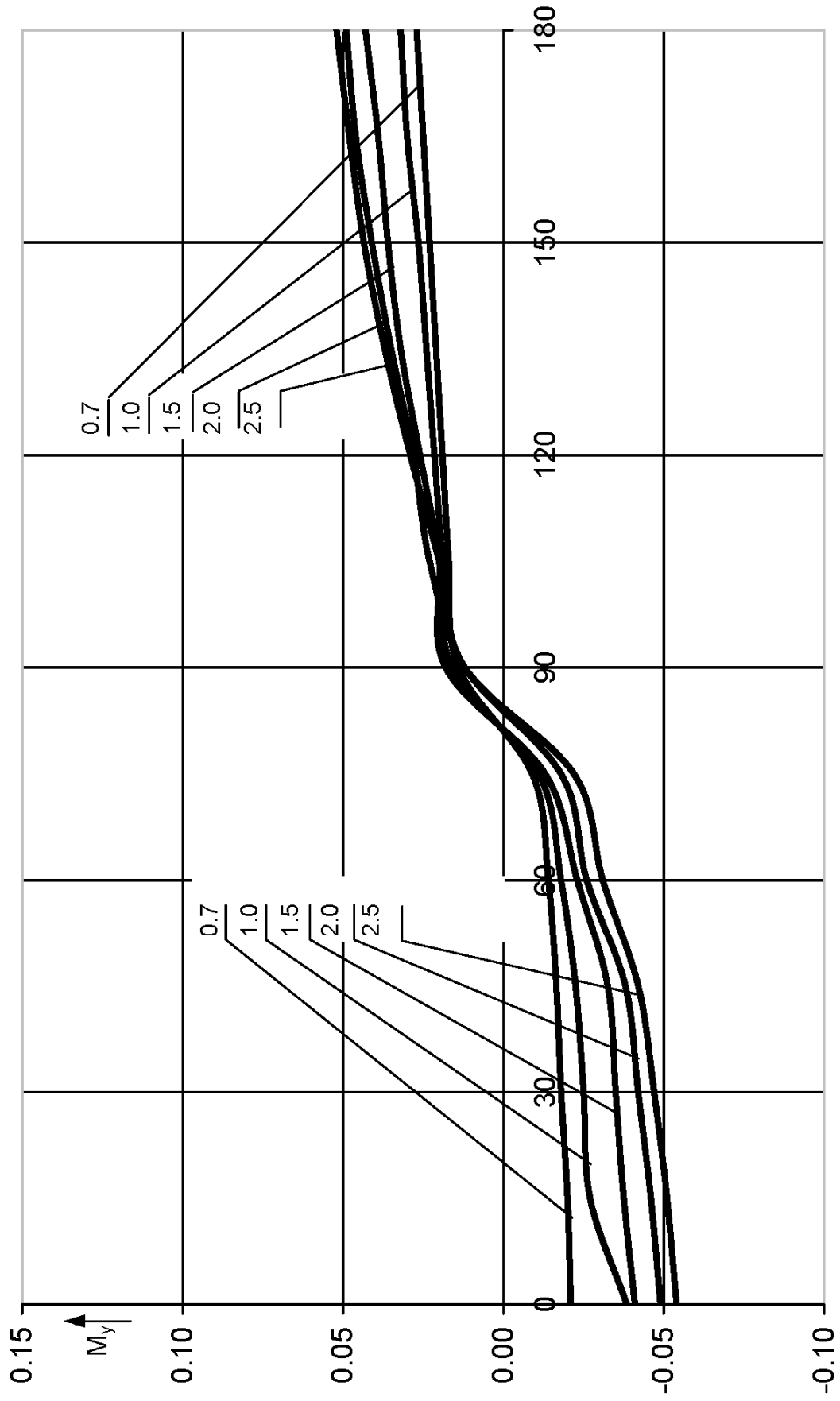


Рис.2.2.3.9 Збурюючий момент  $M_x$ , понтон 3 колонами

Рис.2.2.3.10 Збурюючий момент  $M_y$ , понтон без колон

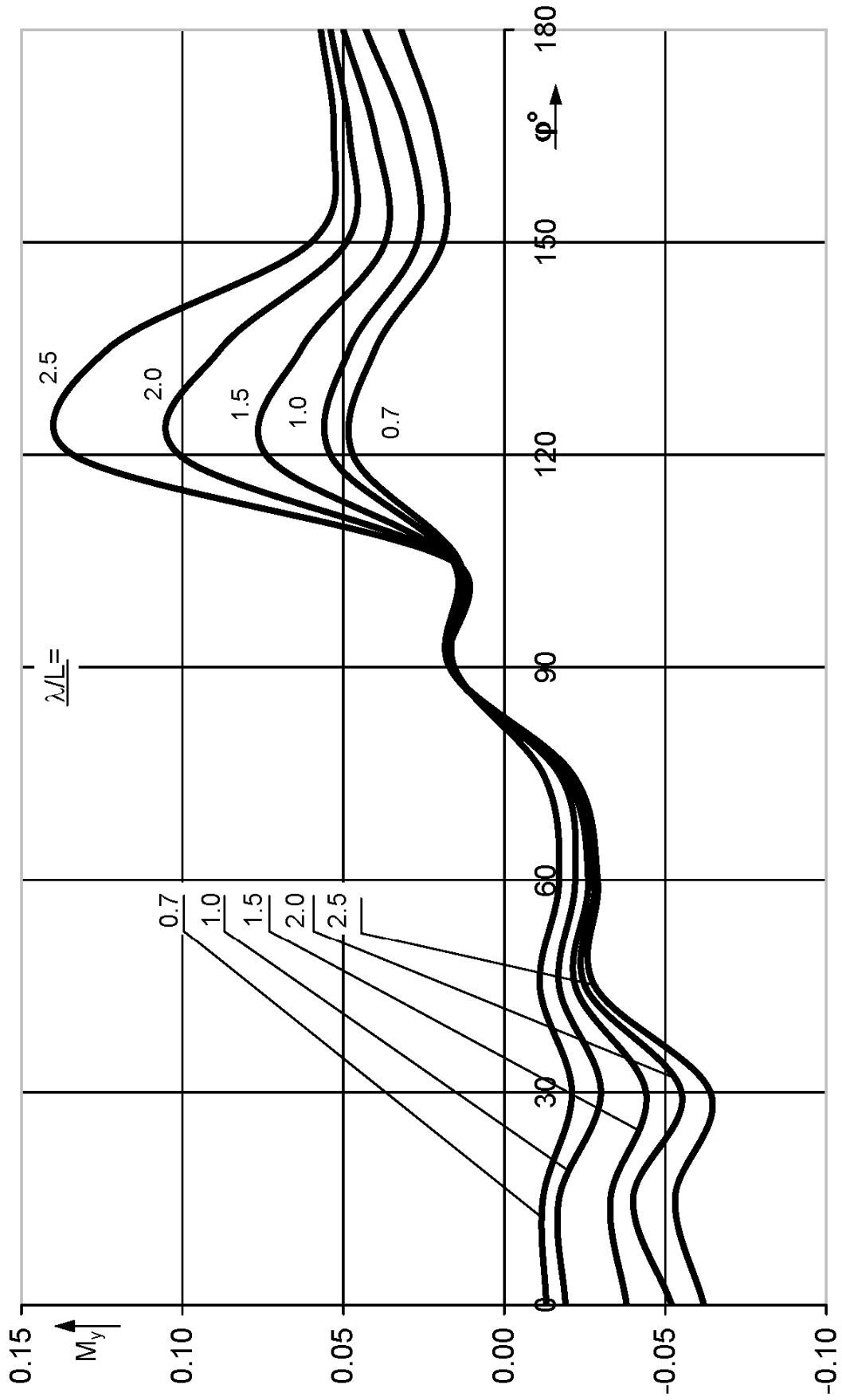


Рис.2.2.3.11 Збурюючий момент  $M_y$ , понтон 3 колонами

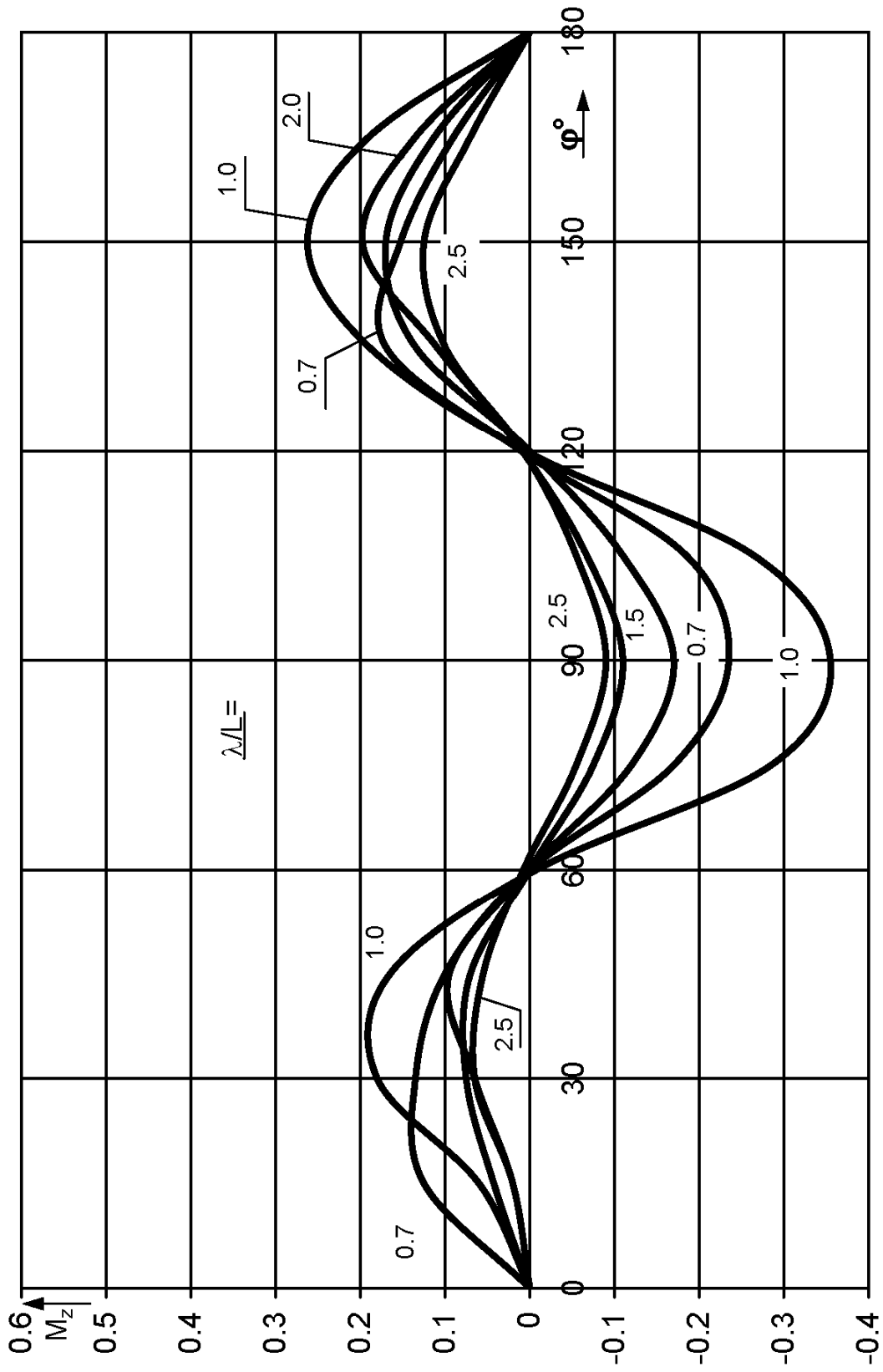


Рис.2.2.3.12 Збурюючий момент  $M_z$ , понтон без колон

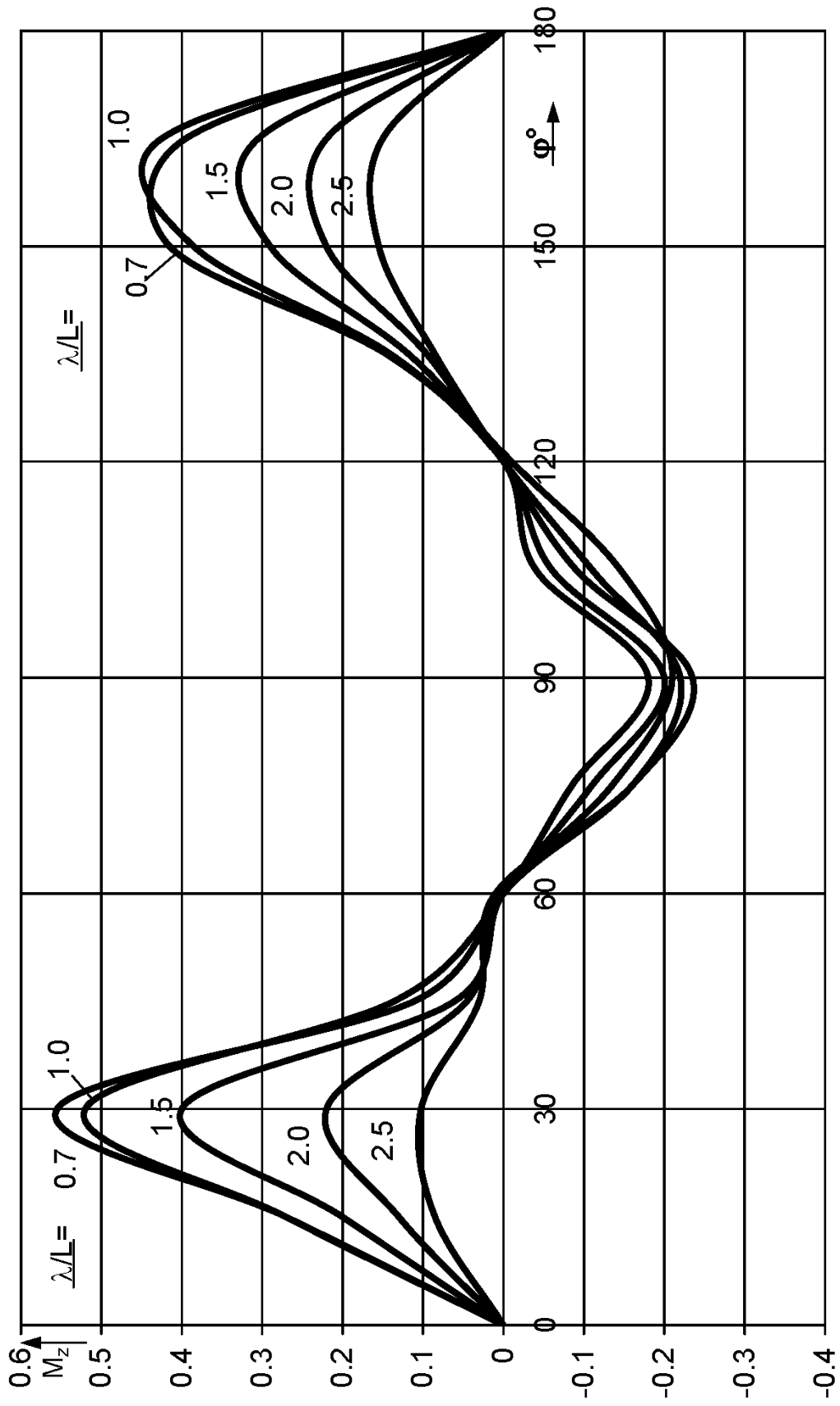


Рис.2.2.3.13 Збурюючий момент  $M_z$ , понтон 3 колонами

**ЛІТЕРАТУРА ДО РОЗДІЛУ 2****Основна**

1. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование возмущающих сил и моментов модели СПБУ на регулярном волнении. // Вісник ОНМУ.- Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. – №11. – С. 78-89.
2. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование гидродинамических характеристик качки модели СПБУ методом вынужденных колебаний. // Вісник ОНМУ. - Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. – №12. – С. 37-45.
3. Ефремова Н.В. Экспериментальное исследование кинематических характеристик качки модели СПБУ на регулярном и импульсном волнении. // Вісник ОНМУ. - Одеса: Вид-во ОНМУ, 2004. – №14. – С. 50-57.
4. Кириллов В.Н., Демидюк А.В., Тонюк В.И. Экспериментальная установка для исследования гидродинамических характеристик продольной качки моделей судов. // Вісник ОДМУ. - Одеса: Вид-во ОДМУ, 1998. – №1. – С. 90-93.

**Додаткова**

5. Демидюк А.В. Экспериментальное исследование распределения гидродинамических давлений на модели качающегося судна. // Вісник ОНМУ. – Одеса: Вид-во ОНМУ, 2003. - №12. - С. 65-69.
6. Демидюк А.В. Модернизация системы измерений опытового бассейна ОНМУ. // Вісник ОНМУ. - Одеса: Вид-во ОНМУ, 2011. - №34.- С. 57-76.
7. Баскаков С.М., Егоров Г.В., Демидюк А.В., Нильва В.А. Буксировочные испытания модели танкера RST27 в условиях регулярного волнения. // Вісник ОНМУ. - Одеса: Вид-во ОНМУ, 2013. - №37.- С. 55-63.

**Форми протоколів лабораторних робіт**

---

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 1  
по курсу «Теорія корабля (Статика)»

**ВИЗНАЧЕННЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛІ**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20 \_\_\_\_



**1.1. Мета роботи** - визначити в заданому діапазоні осадок характеристики моделі: - площу діючої ватерлінії  $S$ ; об'ємну водотоннажність  $V$ ; аплікату центру величини  $z_c$ ; момент інерції ватерлінії відносно поздовжньої осі  $I_x$ ; поперечний метацентричний радіус  $r$ .

**1.2. Схема установки** (рис. 1.1.1)

**Ватерлінія моделі** (рис. 1.1.2)

**1.3. Величини, що обчислюються**

Таблиця 1.1 (1.1.2) Розрахунки вагової й об'ємної водотоннажності, аплікати центру величини та поперечного метацентричного радіуса

$$S = \text{см}^2; \quad I_x = \text{см}^4 \quad \gamma = \frac{\kappa z}{\text{см}^3},$$

$T_i, \text{см}$	$z_{ci} = \frac{T_i}{2}, \text{см}$	$V_i = ST_i, \text{см}^3$	$r_i = \frac{I_x}{V_i},$ см	$D_i = \gamma V_i, \text{кг}$
2				
4				
...				
...				
$H$				

**1.4. Криві елементів теоретичного креслення моделі**

(рисунок)

**1.5. Висновок**

**1.6. Література**

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 2  
по курсу «Теорія корабля (Статика)»

## **РІШЕННЯ ДЕЯКИХ ЗАДАЧ ПОЧАТКОВОЇ ОСТІЙНОСТІ**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20\_\_

**2.1. Мета роботи** – визначення положення центру ваги моделі судна по висоті дослідним шляхом (дослід кренування), а також оцінка впливу на початкову остійність переміщення вантажу по вертикалі та підвішеного вантажу.

**2.2. Схема установки** (рис. 1.1.1)

**2.3. Вимірювані величини та величини, що обчислюються**

Таблиця 2.1 (1.2.2) Визначення аплікати центру ваги моделі

$T_{CP} =$  см;       $D =$  кг;       $z_m =$  см.

№ дослід	$P_i$ , кг	$l_{yi}$ , см	$\theta_i$ , град	$h_{0i} = \frac{P_i \cdot l_{yi} \cdot 57,3}{D\theta_i}$ , см
1				
2				
$n-1$				
$n$				
$\sum_{i=1}^n h_{0i}$				

Таблиця 2.2 (1.2.3) Оцінка впливу на початкову остійність моделі вертикального переміщення вантажу,  $l_z =$  см.

№ дослідю	$P_i$ , кг	$l_{yi}$ , см	$\theta_i$ , град	$h_{1i} = \frac{P_i \cdot l_{yi} \cdot 57,3}{D\theta_i}$ , см
1				
2				
$n-1$				
$n$				
$\sum_{i=1}^n h_{1i}$				

Таблиця 2.3 (1.2.4) Оцінка впливу на початкову остійність моделі підвішеного вантажу,  $l_n =$  см.

№ дослідю	$P_i$ , кг	$l_{yi}$ , см	$\theta_i$ , град	$h_{2i} = \frac{P_i \cdot l_{yi} \cdot 57,3}{D\theta_i}$ , см
1				
2				
$n-1$				
$n$				
$\sum_{i=1}^n h_{2i}$				

#### **2.4. Висновок**

#### **2.5. Література**

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 3  
по курсу «Теорія корабля (Статика)»

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ОСТІЙНОСТІ  
МОДЕЛІ СУДНА НА ВЕЛИКИХ КУТАХ КРЕНУ**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20\_\_\_\_

**3.1. Мета роботи** – експериментальне дослідження поперечної остійності моделі судна в області значних кутів крену.

**3.2. Схема установки** (рис. 1.3.1)

**3.3. Вимірювані величини та величини, що обчислюються**

Таблиця 3.1 (1.3.1-1) Значення моментів, що кренять, і кутів крену

$$D = 35 \text{ кг}, \quad z_g = \text{___ см}$$

№ досліду	$P_i, \text{ кг}$	$M_{KPi} = P_{KPi} \frac{d}{2}, \text{ кг} \cdot \text{см}$	$\theta_i, \text{ град}$	$\theta'_i, \text{ град}$
1				
2				
$n-1$				
$n$				

Коефіцієнт остійності  $Dh_1 = \text{___}, \text{ кг} \cdot \text{см}$

Метацентрична висота  $h_1 = \text{___}, \text{ см}$

Максимальний момент, що кренить  $M_{кр \max} = \text{___}, \text{ кг} \cdot \text{см}$

Кут максимуму діаграми  $\theta_{\max} = \text{___}, \text{ град}$

Кут заходу  $\theta_{зак} = \text{___}, \text{ град}$

Таблиця 3.2 (1.3.1-2) Значення моментів, що кренять, і кутів крену

$$D = 35 \text{ кг}, \quad P_{\delta} = 3,5 \text{ кг}, \quad z_g = \text{---} \text{ см}$$

№ дослідю	$P_i, \text{ кг}$	$M_{KPi} = P_{KPi} \frac{d}{2}, \text{ кг} \cdot \text{см}$	$\theta_i, \text{ град}$	$\theta'_i, \text{ град}$
1				
2				
$n-1$				
$n$				

Коефіцієнт остійності  $Dh_1 = \text{---}, \text{ кг} \cdot \text{см}$

Метацентрична висота  $h_1 = \text{---}, \text{ см}$

Максимальний момент, що кренить  $M_{кр \max} = \text{---}, \text{ кг} \cdot \text{см}$

Кут максимуму діаграми  $\theta_{\max} = \text{---}, \text{ град}$

Кут заходу  $\theta_{зак} = \text{---}, \text{ град}$

### **3.4. Діаграми статичної остійності моделі** (зразок. рис. 1.3.2)

#### **3.4. Висновок**

#### **3.5. Література**

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 4  
по курсу «Теорія корабля (Ходовість)»

### **БУКСИРУВАЛЬНІ ВИПРОБУВАННЯ МОДЕЛІ СУДНА**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20 \_\_\_\_



**4.1. Мета роботи** - експериментальне визначення опору моделі як функції її швидкості, а також буксирувального опору і буксирувальної потужності натурального судна шляхом перерахування результатів модельних випробувань.

**4.2. Схема установки** (рис. 1.4.1)

**4.3. Вимірювані величини та величини, що обчислюються**

Таблиця 4.1 Характеристики моделі та натурального судна

<b>Характеристики моделі</b>		
Довжина, м	$L_M$	
Ширина, м	$B_M$	
Осадка, м	$T_M$	
Коефіцієнт загальної повноти	$\delta$	
Змочена поверхня, м <sup>2</sup>	$\Omega_M$	
Температура води в басейні, °С	$t$	
Густина води в басейні	$\rho_M$	
Масштаб моделі	$\lambda$	
<b>Характеристики натурального судна</b>		
Довжина, м	$L_H$	
Ширина, м	$B_H$	
Осадка, м	$T_H$	
Коефіцієнт загальної повноти	$\delta$	
Змочена поверхня, м <sup>2</sup>	$\Omega_H$	
Температура морської води, °С	$t$	
Густина морської води	$\rho_H$	

Таблиця 4.2 (1.4.2) Перерахування результатів модельних випробувань на натурне судно

Номер досліду	1	2	3	4	5
Швидкість моделі $V_M$ , м/с					
Опір моделі $r$					
$Fr_M = \frac{V_M}{\sqrt{gL_M}}$					
$\zeta_M = \frac{2r}{\rho_M \Omega_M V_M^2}$					
$Re_M = \frac{V_M L_M}{\nu_M}$					
$(\zeta_{fo})_M = \frac{0.455}{(\lg Re_M)^{2.58}}$					
$\zeta_{OM} = \zeta_M - (\zeta_{fo})_M$					
$V_H = V_M \sqrt{\lambda}$					
$Re_H = \frac{V_H L_H}{\nu_H}$					
$(\zeta_{fo})_H = \frac{0.455}{(\lg Re_H)^{2.58}}$					
$\zeta_H = (\zeta_{fo})_H + \zeta_O + \Delta\zeta_{III}$					
$R = \zeta_H \frac{\rho_H V_H^2}{2} \Omega_H$ , кН					
$N_{\delta} = R V_H$ , кВт					
$V_S = 1.945 V_H$ , вуз.					

**4.4. Криві залежності буксирувального опору та буксирувальної потужності судна від швидкості у вузлах**

(зразок див. рис. 1.4.2)

**4.5. Висновок**

**4.6. Література**

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 5  
по курсу «Теорія корабля (Ходовість)»

### **ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕМЕНТІВ ГРЕБНОГО ГВИНТА**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20\_\_

**5.1. Мета роботи** – визначення геометричних елементів готового гребного гвинта.

**5.2. Схема установки** (рис. 1.5.2)

**5.3. Вимірювані величини та величини, що обчислюються**

Діаметр гвинта  $D =$

Крок гвинта  $H_{CP} =$

Діаметр маточини  $d =$

Довжина маточини  $l =$

Число лопатей  $z =$  Дисккове відношення  $\theta = \frac{4zA}{\pi D^2} =$

Таблиця 5.1 (1.5.1)

Радіус перетину лопаті $r_i$ , мм					
Кут $\alpha_{bi}$ , град					
Відстань по вертикалі $h_{bi}$ , мм					
Кут $\alpha_{ai}$ , град					
Відстань по вертикалі $h_{ai}$					
$h =  h_{bi} - h_{ai} $ , мм					
$h^2$ , мм <sup>2</sup>					
$\alpha =  \alpha_{bi} - \alpha_{ai} $ , град					
$H_{ri} = \frac{360^\circ}{\alpha^\circ} h$ , мм					
$ab = \sqrt{h^2 + \left(r \frac{\alpha^\circ}{57.3^\circ}\right)^2}$					

**5.4. Креслення спрямленої лопаті** (зразок - рис. 1.5.3)

**5.5. Висновок**

**5.6. Література**

Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 6  
по курсу «Теорія корабля (Ходовість)»

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ВИВЧЕННЯ РОБОТИ ГРЕБНОГО  
ГВИНТА**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20\_\_\_\_

**6.1. Мета роботи** – вивчення гідродинамічних характеристик гребних гвинтів за допомогою модельних випробувань в дослідному басейні.

**6.2. Схема установки** (рис. 1.6.1)

**6.3. Вимірювані величини та величини, що обчислюються**

(див. нижче)

**6.4. Криві дії моделі гребного гвинта** (зразок - рис. 1.6.5)

**6.5. Висновок**

**6.6. Література**



Міністерство освіти і науки України  
Одеський національний морський університет  
Кафедра теорії корабля ім. проф. Ю.Л. Воробйова

Протокол лабораторної роботи № 7  
по курсу «Теорія корабля (Хитавиця та керованість)»

## **ДОСЛІДЖЕННЯ БОРТОВОЇ ХИТАВИЦІ МОДЕЛІ СУДНА**

Студент \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи \_\_\_\_\_ ФСІТІС ОНМУ

Викладач:

Дата:

Одеса – 20\_\_



**7.1. Мета роботи** – визначення водотоннажності  $D$  моделі судна, координат його центра ваги  $x_g$  і  $z_g$ , приєднаного моменту інерції мас води  $\lambda_{44}$ , періоду вільних коливань  $T_{44}$ , коефіцієнту опору при бортовій хитавиці  $\mu_{44}$ .

**7.2. Вихідні дані по моделі** (див. п. 1.7.1)

**7.3. Визначення абсциси центра ваги моделі і його переміщення на одну вертикаль з центром величини**

Схема експерименту з визначення  $x_{gM}$  (рис. 1.7.1)

Таблиця 7.1 (1.7.1) Розрахунок абсциси центра ваги моделі судна

№ п/п	Розрахункові величини	Одиниці виміру	«к» (номер наближення)			
			1	2	3	4
1	$P$	кг				
2	$d = \frac{P_l}{D_M}$	м				
3	$x_{gM}^K = x_B + d$	м				
4	$\Delta x_{gM} = x_{cM} - x_{gM}$	м				
5	$\Delta P = \frac{ \Delta x_{gM} }{2b} D_M$	кг				

**7.4. Визначення періоду коливань моделі в повітрі**

Схема підвісу моделі в повітрі (рис. 1.7.2)

Таблиця 7.2 (1.7.2) Період вільних коливань моделі в повітрі

№ п/п	Розрахункові величини	Одиниці виміру	«к» (номер досліду)			
			1	2	3	4
1	$t_i$	с				
2	$n_i$					
3	$T_i = \frac{t_i}{n_i}$	с				
4	$T_M = \sum_{i=1}^k \frac{T_i}{k}$	с				

### 7.5. Визначення власного моменту інерції

Схема досліду кренування (рис. 1.7.3)

Таблиця 7.3 (1.7.3) Дослід кренування

№ п/п	Розрахункові величини	Одиниці виміру	«к» (номер досліду)			
			1	2	3	4
1	$P_{2i}$	кг				
2	$M_{KPMi}$	кгм				
3	$\theta$	умовні коди				
4	$\theta$	градуси				
5	$h_{Mi}$	м				
6	$h_{Mi} = \sum_{i=1}^k \frac{h_{Mi}}{k}$	м				
7	$z_{CM}$	м				
8	$r_M$	м				
9	$z_{gM}$	м				

Тарувальна крива (зразок – рис. 1.7.4)

Таблиця 7.4 (1.7.4) Розрахунок власного моменту інерції мас моделі

№ п/п	Розрахункові величини	Одиниці виміру	Чисельні значення
1	$T$	с	
2	$H$	м	
3	$l_1 = H - Z_{gM}$	м	
4	$I_{xM} = D_M l_1 \left[ \left( \frac{T}{2\pi} \right)^2 - \frac{l_1}{g} \right]$	кгмс <sup>2</sup>	

### **7.6. Визначення приєднаного моменту інерції мас моделі**

Таблиця 7.5 (1.7.5) Період вільних коливань моделі у воді

№ п/п	Розрахункові величини	Одиниці виміру	«к» (номер досліду)			
			1	2	3	4
1	$t_i$	с				
2	$n_i$	-				
3	$T_i = \frac{t_i}{n_i}$	с				
4	$T_{4M} = \sum_{i=1}^k \frac{T_i}{k}$	с				

Приєднаний момент інерції  $\lambda_{44} = D_M h_M \left( \frac{T_{4M}}{2\pi} \right)^2 - I_{xM} =$

### **7.7. Визначення коефіцієнта опору при бортовій хитавиці**

Таблиця 7.6 (1.7.6) Розрахунок коефіцієнта загасання бортової хитавиці

№ п/п	Амплітуда коливань, умов. коди	Амплітуда коливань, градуси	$\ln \frac{(\theta_{i-1})}{(\theta_i)}$	Період загасаючих коливань $T_{4M}$	$v_{44Mi} = \frac{(4)}{(5)}$
(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)

Коефіцієнт опору бортовій хитавиці  $\mu_{44} = v_{44}(I_M + \lambda_{44M}) =$

### Перерахунок характеристик хитавиці на натурне судно

$L_{\perp\perp H} = \lambda L_{\perp\perp M}$		$D_H = \lambda^3 D_M$	
$B_H = \lambda B_M$		$I_{xH} = \lambda^5 I_{xM}$	
$T_H = \lambda T_M$		$\lambda_{44H} = \lambda^5 \lambda_{44M}$	
$x_{gH} = \lambda x_{gM}$		$T_{4H} = \sqrt{\lambda} T_{4M}$	
$z_{gH} = \lambda z_{gM}$		$\mu_H = \lambda^{4,5} \mu_M$	

Геометричний масштабний множник  $\lambda = \frac{L_{\perp\perp H}}{L_{\perp\perp M}} =$

### 7.8. Висновок

### 7.9. Література

До протоколу додаються осцилограма вільних коливань моделі у воді і запис графіка залежності кута крену від часу при досліді кренування.

**Е457** **Експериментальні дослідження морехідних якостей судна :**  
навчальний посібник для студентів спеціальності 135 «суднобудування» / авт. : Н. В. Єфремова, О. В. Демідюк, М. В. Дрига, Н. Н. Котовська. — Одеса: Астропринт, 2018. — 156 с.  
ISBN 978–966–927–455–7

Навчальний посібник містить опис лабораторних робіт з дисципліни «Теорія корабля та технічних засобів освоєння океану» та деяких експериментальних досліджень морехідних якостей моделей плавучих споруд у дослідному басейні Одеського національного морського університету.

Посібник буде корисним для студентів-кораблебудівників, а також аспірантів та фахівців кораблебудівної галузі.

**УДК 629.51/.58(075.8)**

*Навчальне видання*

**ЄФРЕМОВА Ніна Володимирівна  
ДЕМІДЮК Олександр Володимирович  
ДРИГА Марина Віталіївна  
та ін.**

**ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ  
МОРЕХІДНИХ ЯКОСТЕЙ СУДНА**

Навчальний посібник  
для студентів спеціальності 135  
«Суднобудування»

Надруковано в авторській редакції  
з готового оригінал-макета

Формат 60x84/16. Ум. друк. арк. 9,07.  
Тираж 300 прим. Зам. № 707 (125).

Видавництво і друкарня «Астропринт»  
65091, м. Одеса, вул. Разумовська, 21  
Тел.: (048) 37-14-25, 37-07-17, (048) 7-855-855  
e-mail: [astro\\_print@ukr.net](mailto:astro_print@ukr.net); [www.astroprint.ua](http://www.astroprint.ua); [www.stranichka.in.ua](http://www.stranichka.in.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1373 від 28.05.2003 р.