

УДК 629.12.073+681.3

В.В. Челабчи

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ХВИЛЬОВОЇ ГІДРОМЕХАНІКИ

Розглянуто створення методичного забезпечення обчислювального експерименту в області хвильової гідродинаміки. Об'єкт – хитавиця судна. Розроблено методику спільного застосування кінцево-різницевого і проекційно-сіткового методів. Проведено порівняння результатів експериментів і математичного моделювання.

Ключові слова: обчислювальний експеримент, хвильова гідродинаміка, методичне забезпечення.

Рассмотрено создание методического обеспечения вычислительного эксперимента в области волновой гидродинамики. Объект – качка судна. Разработана методика совместного применения конечно-разностного и проекционно-сеточного методов. Проведено сравнение результатов экспериментов и математического моделирования.

Ключевые слова: вычислительный эксперимент, волновая гидродинамика, методическое обеспечение.

We consider the creation of methodical maintenance of computer simulations in the field of wave hydrodynamics. The object – a pitching ship. The technique of joint use of the finite-difference and projection-grid methods is designed. A comparison of the results of experiments and mathematical modeling is done.

Keywords: computational experiment, wave hydrodynamics, methodological support.

Вступ. Отримання достовірної інформації про процеси взаємодії корпусу плаваючого засобу з хвилями представляє практичний інтерес, як при прогнозуванні динаміки зануреного в рідину корпусу, так і при визначенні динамічної дії на його поверхню. Не менш важливими є завдання про дію штормових хвиль і цунамі на берегові споруди. Рішення подібних задач можливе методами фізичного або математичного моделювання.

Нині дуже актуальними є питання дослідження процесів хитавиці мілкосидячих судів. Інтегральні параметри хитавиці визначаються гідродинамічними коефіцієнтами: приєднаних мас і демпфування [1]. Визначення названих коефіцієнтів можливе на основі модельного [2] чи натурального експерименту. Альтернативою експериментальним методам являється комп'ютерне моделювання.

© Челабчи Р.Г., 2016

Математична модель процесу, найчастіше, базується на асимптотичній теорії хитавиці судна, використання якої для вирішення різноманітних задач описане в роботах [3-4]. Гідродинамічні коефіцієнти хитавиці судна визначаються за результатами рішення систем диференціальних рівнянь в частинних похідних з відповідними крайовими умовами першого або другого роду. У деяких специфічних випадках, для замикання математичної моделі використовуються відповідні диференціальні і алгебраїчні рівняння.

Найчастіше, рішення шукається за допомогою Фур'є перетворень, що приводить до розрахунку нескінченних знакозмінних рядів. Автором розроблялися прийоми ефективних обчислення подібних рядів [5].

Ці перетворення вдається вписати в замкнутому (формульному) виді тільки для областей канонічної форми (прямокутник, еліпс). Проте для реальної форми корпусу судна відбити подібні перетворення кінцевою аналітичною залежністю не вдається.

Задачу можна вирішувати на основі варіаційного підходу використовуючи проєкційно-сітковий метод [6-7]. Має рацію використання комбінації проєкційних і різницевих методів, що пропонується в [8].

Методика проведення обчислювального експерименту. У загальному випадку розглядається генерація хвиль у важкій ідеальній рідині викликаних гармонійними коливаннями корпусу судна будь-якої конфігурації. Приймається, що амплітуда хвиль, що генеруються, і переміщення корпусу відносно необуреної поверхні сумірні з осадкою. Хвилі поширюються в нескінченному напівпросторі без відображення і поглинання. У загальному випадку розглядається модель (1).

Розглядалися граничні умови Дирихле (2) та Неймана (умова непротікання) (3) на поверхні області S.

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial X^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial Z^2} \right) = 0 \quad (1)$$

де Φ – потенціал обурених швидкостей рідини в моделях хвильової гідродинаміки.

$$\Phi_s = f(S) \quad (2)$$

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial N} \right|_s = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial X} \cdot \cos(\alpha) + \frac{\partial \Phi}{\partial Y} \cdot \cos(\beta) + \frac{\partial \Phi}{\partial Z} \cdot \cos(\gamma) \right) \Big|_s = 0 \quad (3)$$

де N – нормаль до поверхні S;

$\cos(\alpha)$, $\cos(\beta)$, $\cos(\gamma)$ – направляючі косинуси вузла на поверхні S.

Відповідно до особливостей методики вся область розбивається на кінцеву кількість локальних областей, в яких шукаються рішення за умови зшивання рішень в локальних областях, які можуть перекривати одна одну.

З кожною з локальних областей, зв'язується локальна система відносних координат з осями x, y, z найчастіше орієнтованими паралельно до осей відповідно X, Y, Z .

Призначається кілька типових (базових) видів локальних областей зі своїми локальними координатними системами x_{nz}, y_{nz}, z_{nz} . Форма локальної області, розташування початку локальних координат і розміщення вузлів всередині локальної області в достатній мірі довільні.

Значення глобальних координат X, Y, Z і значення локальних (відносних) координат x, y, z вузлових точок окремої локальної області пов'язані залежностями (4).

$$X = x \cdot m_{x_{nz}} + X_{0nz}, \quad Y = y \cdot m_{y_{nz}} + Y_{0nz}, \quad Z = z \cdot m_{z_{nz}} + Z_{0nz}, \quad (4)$$

де $m_{x_{nz}}, m_{y_{nz}}, m_{z_{nz}}$ – масштабні коефіцієнти локальної області з індексом nz ;

$X_{0nz}, Y_{0nz}, Z_{0nz}$ – глобальні координати початку локальної системи координат області).

В принципі коефіцієнти m_x, m_y, m_z можуть приймати не однакові значення. Але для зручності викладок та з метою економії обчислювальних ресурсів має сенс приймати однакові значення масштабних коефіцієнтів, де kz – єдиний масштабний коефіцієнт локальної області.

На рис. 1 показана схема розміщення локальної області в системі глобальних координат.

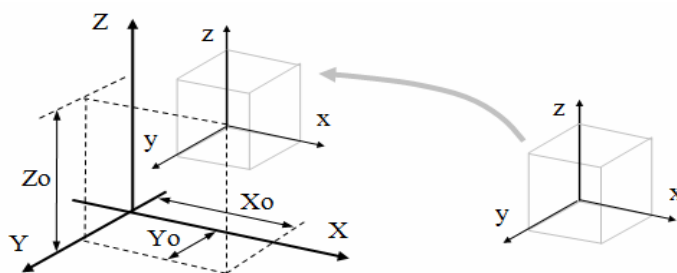


Рис. 1. Схема зв'язку глобальних і локальних координат

При переході від глобальній системі координат до системи локальних координат отримаємо (5), (6), (7).

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = 0 \quad (5)$$

$$\Phi_S = f(S) \quad (6)$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial n} \Big|_s = \left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \cdot \cos(\alpha) + \frac{\partial \Phi}{\partial y} \cdot \cos(\beta) + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \cdot \cos(\gamma) \right) \Big|_s = 0 \quad (7)$$

Функція, що апроксимує рішення в будь-якій локальній області може мати різний вигляд. Головне щоб вона та її похідні були безперервними і досить гладкими. У даній розробці розглядалися апроксимуючі функції: (8) для стаціонарних процесів і (9) для нестаціонарних процесів.

$$\Phi = \sum_{k=0}^{k_{\max}} \sum_{j=0}^{j_{\max}} \sum_{i=0}^{i_{\max}} a_{ijk} \cdot x^i \cdot y^j \cdot z^k \quad (8)$$

$$\Phi = \sum_{e=0}^{e_{\max}} \sum_{k=0}^{k_{\max}} \sum_{j=0}^{j_{\max}} \sum_{i=0}^{i_{\max}} a_{ijk e} \cdot x^i \cdot y^j \cdot z^k \cdot \tau^e, \quad (9)$$

де Φ – функції, що апроксимуються;
 x, y, z – координати;
 τ – час.

При підстановці виразів для перших і других похідних апроксимуючої функції в рівняння математичної моделі (6) отримуємо (10). Тут і далі, для простоти викладу, індекс що відносить величину до конкретного вузлу опущений.

$$\left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right) = \sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz})) = 0 \quad (10)$$

$$\text{де } \left\{ \begin{array}{ll} i < 2 & c_{lx} = 0; & i \geq 2 & c_{lx} = i \cdot (i-1) \cdot x^{i-2} \cdot y^j \cdot z^k \\ j < 2 & c_{ly} = 0; & j \geq 2 & c_{ly} = j \cdot (j-1) \cdot x^i \cdot y^{j-2} \cdot z^k \\ k < 2 & c_{lz} = 0; & k \geq 2 & c_{lz} = k \cdot (k-1) \cdot x^i \cdot y^j \cdot z^{k-2} \end{array} \right\}.$$

Середнє значення квадрата нев'язки для вузлових точок всередині локальної області (11).

$$\delta_1 = \frac{1}{m_n} \sum_{m=1}^{m_n} \left(\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz})) \right)^2, \quad (11)$$

де m_n – кількість вузлових точок всередині локальної області.

Для задоволення умови (7) в кожному вузлі ($x_{msn}, y_{msn}, z_{msn}$) нерухомого кордону S де реалізуються умови непротікання повинно виконуватися (12).

$$\left. \frac{\partial \Phi}{\partial n} \right|_S = \sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} [a_{ijk} \cdot (c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + c_{fz} \cdot \cos(\gamma))] = 0 \quad (12)$$

$$\text{де } \left\{ \begin{array}{ll} i = 0, & c_{fx} = 0; & i \geq 1, & c_{fx} = i \cdot x^{i-1} \cdot y^j \cdot z^k \\ j = 0, & c_{fy} = 0; & j \geq 1, & c_{fy} = j \cdot x^i \cdot y^{j-1} \cdot z^k \\ k = 0, & c_{fz} = 0; & k \geq 1, & c_{fz} = k \cdot x^i \cdot y^j \cdot z^{k-1} \end{array} \right\}.$$

Середнє значення квадрата нев'язки для вузлів $(x_{msn}, y_{msn}, z_{msn})$ на границі S згідно (12) має вигляд (13).

$$\delta_2 = \frac{1}{m_{smn}} \sum_{m_{sn}=1}^{m_{smn}} \left[\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} a_{ijk} \cdot \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \right]^2 = 0 \quad (13)$$

де m_{smn} – кількість вузлових точок на границі S.

Для задоволення умови (6) в кожному вузлі (x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) умовної границі G і для реалізації умов зшивання повинно виконуватися (14).

$$\Phi(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) = \sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot c_{fg}) = F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \quad (14)$$

де $c_{fg} = x^i \cdot y^j \cdot z^k$;

F – значення функції Φ в подібній точці сусідній локальної області.

Середнє значення квадрата нев'язки для вузлів на границі G (15).

$$\delta_3 = \frac{1}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} \left(\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot c_{fg}) - F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \right)^2, \quad (15)$$

де m_{gn} – кількість вузлових точок, де реалізується умови (4) та зшивання.

Для спільного задоволення розв'язувати рівняння, граничним умовам і умовам зшивання рішень в суміжних локальних областей підсумовуються середні значення квадратів нев'язок (11), (13), (15) з урахуванням ступеня впливу окремих складових (16).

$$\delta_\Sigma = \sum_{i=1}^{n_k} k_{fi} \cdot \delta_i, \quad (16)$$

де k_f – вагові коефіцієнти впливу.

Таким чином, вираз для функціонала δ_Σ має вигляд (17)

Надалі для зручності викладу використовується позначення (18).

$$\begin{aligned} \delta_\Sigma = & k_{f1} \cdot \frac{1}{m_n} \sum_{m=1}^{m_n} \left(\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz})) \right)^2 + \\ & + k_{f3} \cdot \frac{1}{m_{smn}} \sum_{m_{sn}=1}^{m_{smn}} \left[\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} a_{ijk} \cdot \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \right]^2 + \\ & + k_{f5} \cdot \frac{1}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} \left(\sum_{k=0}^{k_n} \sum_{j=0}^{j_n} \sum_{i=0}^{i_n} (a_{ijk} \cdot c_{fg}) - F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \right)^2 \\ & \mathbf{a_R} = \mathbf{a_{ijk}} \end{aligned} \quad (17)$$

де $R = i+(i_n+1) \cdot j+(j_n+1) \cdot k$, $R_m = i_n+(i_n+1) \cdot j_n+(j_n+1) \cdot k_n - 1$.

При $0 \leq i \leq i_n$, $0 \leq j \leq j_n$, $0 \leq k \leq k_n$, $0 \leq R \leq R_m$,
Отже, вираз (17) з урахуванням (18) набуде вигляду (19).

$$\begin{aligned} \delta_{\Sigma} = & k_{f1} \cdot \frac{1}{m_n} \sum_{m=1}^{m_n} \left(\sum_{R=0}^{R_m} a_R \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz}) \right)^2 + \\ & + k_{f3} \cdot \frac{1}{m_{smm}} \sum_{m_{sn}=1}^{m_{smm}} \left[\sum_{R=0}^{R_m} a_R \cdot \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \right]^2 + \\ & + k_{f5} \cdot \frac{1}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} \left(\sum_{R=0}^{R_m} a_R \cdot c_{fg} \cdot F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \right)^2 \end{aligned} \quad (19)$$

Умови мінімуму для функціоналу δ_{Σ}

$$\frac{\partial \delta_{\Sigma}(R_0, R_1, R_2, \dots, R_m)}{\partial a_L} = 0, \quad (20)$$

де $a_L = a_{ijk}$, $L = i + (i_n + 1) \cdot j + (i_n + 1) \cdot (j_n + 1) \cdot k$.

При $0 \leq i \leq i_n$, $0 \leq j \leq j_n$, $0 \leq k \leq k_n$, $0 \leq L \leq R_m$.

Таким чином, створюється система лінійних алгебраїчних рівнянь порядку R_m кожне з яких має вигляд (21).

$$\begin{aligned} \sum_{R=0}^{R_m} a_R \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{k_{f1}}{m_n} \sum_{m=1}^{m_n} (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz}) \Big|_R \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz}) \Big|_L + \\ & + \frac{k_{f3}}{m_{smm}} \sum_{m_{sn}=1}^{m_{smm}} \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \Big|_R \cdot \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \Big|_L + \\ & + \frac{k_{f5}}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} c_{fg} \Big|_R \cdot c_{fg} \Big|_L \end{aligned} \right\} = \\ = \frac{k_{f5}}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \cdot c_{fg} \Big|_L \end{aligned} \quad (21)$$

Використовуючи позначення R – індекс стовпця матриці і L – індекс рядка матриці, отримаємо вираження (22) для вектору правих частин $B(L)$ і (23) для коефіцієнтів матриці $A(L, R)$ системи лінійних алгебраїчних рівнянь.

Рішення отриманих систем лінійних алгебраїчних рівнянь здійснюється одним з прямих методів.

Пошук рішення у всій області ведеться шляхом ітераційної зшивання рішень одержуваних для кожної локальної області [7].

$$\sum_{R=0}^{R_m} a_R \cdot \left\{ \begin{aligned} & \frac{k_{f1}}{m_n} \sum_{m=1}^{m_n} (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz}) \Big|_R \cdot (c_{lx} + c_{ly} + c_{lz}) \Big|_L + \\ & \frac{k_{f3}}{m_{snm}} \sum_{m_{sn}=1}^{m_{snm}} \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \Big|_R \cdot \begin{pmatrix} c_{fx} \cdot \cos(\alpha) + \\ + c_{fy} \cdot \cos(\beta) + \\ + c_{fz} \cdot \cos(\gamma) \end{pmatrix} \Big|_L + \\ & + \frac{k_{f5}}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} c_{fg} \Big|_R \cdot c_{fg} \Big|_L \end{aligned} \right\} = \quad (22)$$

$$= \frac{k_{f5}}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \cdot c_{fg} \Big|_L$$

$$B(L) = \frac{k_{f5}}{m_{gn}} \sum_{m_g=1}^{m_{gn}} F(x_{mg}, y_{mg}, z_{mg}) \cdot c_{fg} \Big|_L \quad (23)$$

Рішення в області рідини поблизу корпусу судна і в зоні можливих переміщень вільної поверхні відносно її необуреного стану ($Z=0$) знаходиться з використанням проєкційних методів, а в іншій області використовуються різницеві методи. У області різницевого рішення використовується центральна триточкова різницева апроксимація. Декомпозиція досліджуваної області показана на рис. 2.

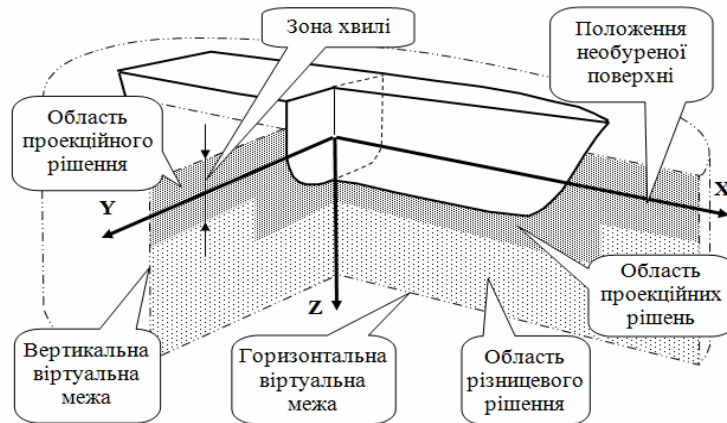


Рис. 2. Декомпозиція досліджуваної області

На видаленні від корпусу (5-10 характерних розмірів корпусу) призначаються віртуальні межі, що виділяють розрахункову область. На вертикальних віртуальних межах приймаються невідбиваючі граничні умови коли хвилі поширюються в нескінченному напівпросторі без відображення і поглинання. [8]. На нижній віртуальній межі використовуються умови що відповідають глибокій воді [3]. На поверхні корпусу,

що коливається, використовуються звичайні граничні умови непротікання і прилипання.

Умова на нижній віртуальній межі розрахункової області повинна відбивати хитавицю на глибокій воді. В цьому випадку зазвичай використовується умова (24).

$$\lim_{z \rightarrow \infty} \text{grad}\Phi = 0. \quad (24)$$

Для нижньої віртуальної межі допустиме припущення, що амплітуда хвиль в рідині поблизу нижньої віртуальної межі зменшується з глибиною по експоненціальній залежності (25)

$$\Phi = B \cdot e^{-kz} \quad \text{або} \quad \Phi = A + B \cdot e^{-kz}. \quad (25)$$

При цьому параметри A , B , k відбивають реальний процес і залежать від координат граничного вузла. На практиці умови (25) відображаються у різницевої формі.

Для вертикальної віртуальної межі прийнято допущення [8], що зміна значення потенціалу Φ по осях X і Y далеко від корпусу відбивається гармонійною залежністю і описується рівняннями виду (26) або (27).

$$\Phi = B \cdot e^{-kz} \quad \text{або} \quad \Phi = A + B \cdot e^{-kz} \quad (26)$$

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial L^2} + B \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial L} + A \cdot \Phi = 0, \quad (27)$$

де L – координатна вісь (X чи Y);

A , B – параметри, величини яких поблизу віртуальної вертикальної межі практично постійні. На практиці умови (26),(27) відображаються у різницевої формі.

Рівняння (26) зручно використати при рішенні плоских задач (визначення поля потенціалу Φ в площині $0yz$ або $0xz$). Рівняння (27) орієнтоване на рішення задач в тривимірній постановці.

Слід зазначити, що при розглянутих математичних моделях значення коефіцієнтів A і B по напрямку осі Z практично не змінюються.

Гранична умова на вільній поверхні відображається у вигляді (28), (29).

$$\frac{\partial \Phi_s}{\partial t} + \frac{1}{2} \left(\left(\frac{\partial \Phi}{\partial x} \right)_s^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial y} \right)_s^2 + \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)_s^2 \right) - g \cdot h = 0, \quad (28)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial h}{\partial x} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial x} \Big|_s + \frac{\partial h}{\partial y} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial y} \Big|_s + \frac{\partial \Phi}{\partial z} \Big|_s = 0, \quad (29)$$

де h – відхилення поверхні рідини від положення рівноваги.

Значення потенціалу Φ і його похідних в (28) і (29) відповідають переміщенню вільної поверхні (індекс s).

Рішення (28) і (29) виконуються проекційним методом в локальних областях, що включають зони можливих переміщень необуреної поверхні.

При зшиванні рішень в локальних областях значення потенціалу (перетин a) і першої похідної по X (перетин b) одній локальній області (А) розглядаються як граничні значення для сусідньої (В).

Схема зшивання рішень в локальних областях А В показана на рис. 3.

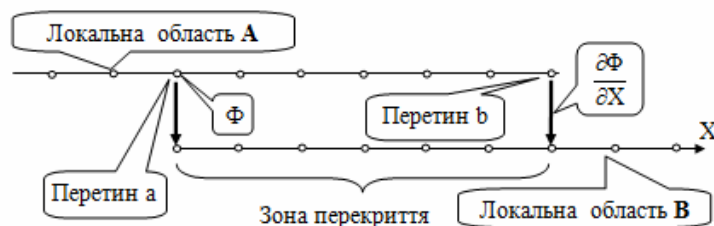


Рис. 3 Схема зшивки рішень у локальних областях

Аналогічно виконується зшивання рішень в локальних зонах і в області, де виконується рішення кінцево-різницею методом.

Результати досліджень. Для оцінки ефективності запропонованого спільного використання проекційних і сіткових методів розглядався обчислювальний експеримент при дослідженні хитавиці корпусу корабля в нерухомій рідині [2].

Найдетальніше описані результати експериментів по вивченню вертикальних вимушених коливань зразка з прямокутним контуром .

Оскільки дані про результати експерименту були обмежені, порівняння результатів розрахунку і експерименту проводилося по ряду інтегральних показників таких як: коефіцієнти демпфування, приєднаних мас і відношення амплітуди генерованої хвилі до амплітуди вимушених коливань корпусу на глибокій воді. Розрахунок значень гідродинамічних коефіцієнтів хитавиці проводився аналогічно [2] з урахуванням явищ гідростатики. У випадку вертикальних коливань шпангоутного контура коефіцієнт приєднаної маси λ_{33} і коефіцієнт демпфування μ_{33} визначалися по формулах (30).

$$\lambda_{33} = -2 \cdot \rho \cdot \int_0^{B/2} \Phi_s(y, T) dy$$

$$\mu_{33} = -2 \cdot \rho \cdot \int_0^{B/2} \Phi_c(y, T) dy$$
(30)

Результати досліджень представлені на рис. 4 та рис. 5.

На рисунках використовуються наступні позначення:
 B, T – відповідно ширина і осадка корпусу;
 λ_{33}, μ_{33} – коефіцієнти приєднаної маси і демпфування шпангоутного контура;
 σ – задана частота коливань контура;
 h_w, h – відповідно амплітуди виникаючої хвилі і коливання контура.

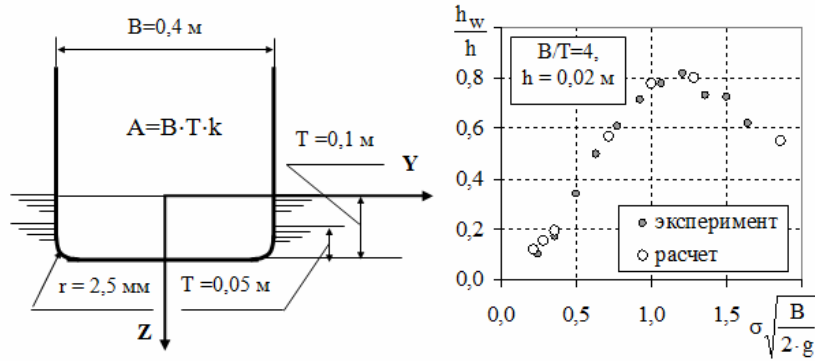


Рис. 4. Характеристики контуру, що коливається, і залежність амплітуди хвилі від частоти коливань контуру

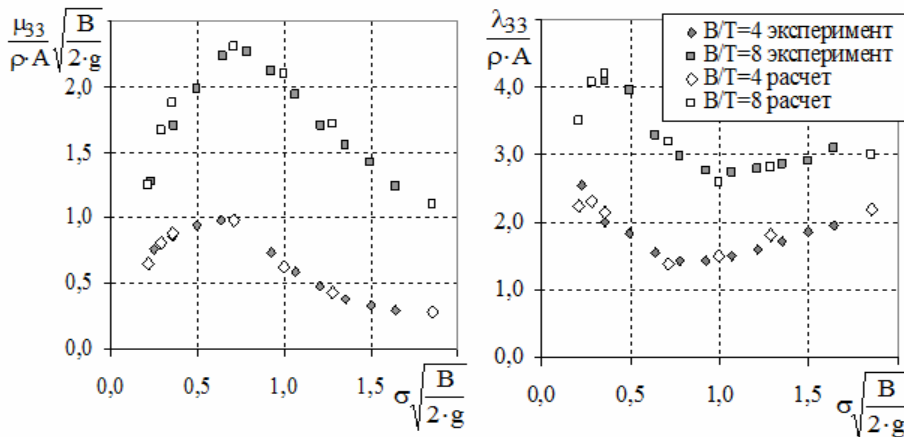


Рис. 5. Порівняння значень гідродинамічних коефіцієнтів хитавиці

Порівняння проводилося з результатами експерименту [2]. Відхилення не перевищували 5 %.

Як видно з рисунків спостерігається задовільне узгодження результатів фізичного експерименту і комп'ютерного моделювання з використанням розробленої методики.

Висновки. Запропоновані методики декомпозиції досліджуваної області, спільного використання проєкційних і різницевих методів та реалізації невідбиваючих граничних умов на віртуальних межах показали свою ефективність. Спостерігається задовільне узгодження результатів фізичного експерименту і комп'ютерного моделювання з використанням розроблених методик.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Басин А.М. Качка судов / А.М. Басин. –М.: Транспорт, 1969. – 272 с.
2. Vugts J.H. The hydrodynamic coefficients for swaying, heaving and rolling cylinders in a free surface / J.H. Vugts // *International Shipbuilding Progress*. – July 1968. – V.15. – № 167. – P. 251-276.
3. Воробьев Ю.Л. Потенциал скоростей при вертикальной качке плоского судна, плавающего без хода на глубокой воде / Ю.Л. Воробьев // *Актуальні проблеми теорії корабля. Проектування суден та їх конструкції: Вісник Одеського державного морського університету*. – Одеса: ОДМУ, 1999. – № 3. –С. 3-19.
4. Воробьев Ю.Л. Гидродинамические задачи о качке прямобортных понтонов / Ю.Л. Воробьев, С.Н. Баскаков, И.Ф. Давыдов // *Вісник Одеського національного морського університету*. – Одеса: ОНМУ, 2002. – № 8. – С. 8-24.
5. Челабчи В.В. О вычислении некоторых интегралов, используемых в асимптотической теории качки / В.В. Челабчи // *Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць*. – Одеса: ОНМУ, 1999. – № 3. – С 73-77.
6. Merkt R.V. Projection approaching solving hydrodynamics problems / R.V. Merkt, V.N. Chelabchi // *Proceedings of the VI-th Congress of IMAM*. – Varna, Bulgaria, 1993. – P. 13-16.
7. Chelabchy V.V. Adapting of methods of a solution of applied problems to the distributed calculations. *Вісник Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут»: Зб. наук. праць, Тематичний випуск «Системний аналіз, управління та інформаційні технології»*. –Харків: НТУ «ХПИ», 2004. – № 1. – С. 15-23.
8. Ильгамов М.А. Неотражающие условия а границах расчетной области / М.А. Ильгамов, А.Н. Гильманов. –М.: ФИЗМАТЛИТ, 2003.