

ISSN 2521-6643

Системи та технології



№ 2 (62)

2021

Системи та технології

(правонаступник наукового журналу “Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”)

№ 2 (62)

Науковий журнал включено до Переліку наукових фахових видань України категорії “Б”, в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів з галузі “Технічні науки”, спеціальності 113, 122, 123, 275 (наказ Міністерства освіти і науки України від 17.03.2020 р. № 409, додаток 1)

Дніпро
Університет митної справи та фінансів
2021

УДК 62

Системи та технології
(правонаступник наукового журналу
“Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”)
Науковий журнал. Видається двічі на рік. Заснований у травні 1999 р.

Рекомендовано до друку та до поширення через мережу Інтернет вченою радою Університету митної справи та фінансів (протокол № 15 від 25.04.2022 р.)

Редакційна колегія:

Поночовний Ю. Л. – к.т.н., с.н.с. (<i>головний редактор</i>);	Доценко С. І. – д.т.н., доц.;
Іванченко О. В. – к.т.н., доц. (<i>заступник головного редактора</i>);	Дрозд О. В. – д.т.н., проф.;
Кузьменко А. І. – к.т.н., доц. (<i>заступник головного редактора</i>);	Защолкін К. В. – к.т.н., доц.;
Прокопович-Ткаченко Д. І. – к.т.н. (<i>заступник головного редактора</i>);	Змисний М. М. – к.т.н.;
Йозеф Костолни – доц., PhD;	Кабак Л. В. – к.т.н., доц.;
Ян Рабчан – PhD;	Колісник М. О. – к.т.н., доц.;
Анджей Клос – д.т.н., проф.;	Мартинюк О. М. – к.т.н., доц.;
Бондаренко І. О. – д.т.н., доц.;	Пасічник А. М. – д.ф.-м.н., проф.;
Боярчук А. В. – к.т.н.;	Фесенко Г. В. – к.т.н., доц.;
Брежнєв Є. В. – д.т.н., с.н.с.;	Халіпова Н. В. – к.т.н., доц.;
Гордєєв О. О. – к.т.н., доц.;	Шапорін Р. О. – к.т.н., доц.;
	Шкілюк О. П. – к.т.н.;
	Щербовських С. В. – д.т.н., с.н.с.;
	Яремчук С. О. – к.т.н.

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021-2-62>
ISSN 2521-6643

Коректори: Т. П. Дерев'янка, О. О. Смирнова
Комп'ютерна верстка: О. О. Іщенко

Свідоцтво про державну реєстрацію: серія КВ № 21857-11757ПР від 21.12.2015 р.
Тираж 100 прим. Замовлення № 18.

Адреса редакції та видавця: вул. Володимира Вернадського, 2/4, Дніпро, 49000
Тел.: (056) 756-05-05. Електронна адреса: redactor.umsf@gmail.com
Інформаційний сайт: <https://st-journal.com/index.php/journal/issue/view/2>

Підписано до друку 26.04.2022. Формат 60×84/16. Папір офсетний.
Гарнітура Таймс. Ум. друк. арк. 15,00. Обл.-вид. арк. 13,33.

Засновник і видавець: Університет митної справи та фінансів
(Свідоцтво про видавничу діяльність ДК № 6198 від 24.05.2018 р.)

© Університет митної справи та фінансів, 2021

ЗМІСТ

Сохацький А. В. До проблеми математичного моделювання турбулентних течій навколо транспортних апаратів	5
Леснікова І. Ю., Халіпова Н. В., Сазонець О. М., Рудянова Т. М. Оптимізація маршрутів вантажних автомобільних перевезень на основі модифікованого мурашиного алгоритму	37
Зінченко А. Ю. Використання ін'єкції залежностей у розробці інформаційної технології дослідження параметричних методів VAR	63
Ульяновська Ю. В., Яковенко В. О., Мала Ю. А., Яковенко Т. Ю., Авілова В. О. Визначення ступеня ризику виникнення аварійних ситуацій на основі нечіткої логіки	76
Бразалук О. К., Гоман О. Г., Бразалук Ю. В. Застосування методу граничних елементів до розв'язування крайових задач в областях з рухомими межами	94
Огієнко М. М., Огієнко А. В., Багрій М. М. Мультимодальні схеми контейнерної доставки вантажів	104
Кузьменко А. І., Музикін М. І., Нестеренко Г. І., Стрелко О. Г. Аналіз впливу плану та поздовжнього профілю колії на умови експлуатації контейнерних поїздів	116

CONTENTS

Sokhatsky A. V. To problem of mathematical modeling of turbulent flows around vehicles	5
Lesnikova I. Y., Khalipova N. V., Sazonets O. M., Rudyanova T. M. Optimization of cargo routes based on the modified ant algorithm	37
Zinchenko A. Yu. Dependency injection using for the develop of information technology for investigation of parametric VAR methods	63
Ulianovska Yu. V., Yakovenko V. O., Mala Yu. A., Yakovenko T. Y., Avilova V. O. Determination of the degree of risk of emergencies on the basis of fuzzy logic	76
Brazaluk A. K., Goman O. G., Brazaluk I. V. Features of boundary element method application for solutions of boundary-value problems in moving boundary domains	94
Ohienko M., Ohienko A., Bahrii M. Multimodal container schemes freight delivery	104
Kuzmenko A. I., Muzykin M. I., Nesterenko H. I., Strelko O. G. Analysis of the influence of the plan and longitudinal profile of the track on the conditions of operation of contrailer trains	116

Сохацький А. В., доктор технічних наук,
професор, завідувач кафедри транспортних
технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів

ДО ПРОБЛЕМИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ТУРБУЛЕНТНИХ ТЕЧІЙ НАВКОЛО ТРАНСПОРТНИХ АПАРАТІВ

Реальні течії навколо транспортних апаратів є турбулентними. На сьогодні в обчислювальній аеродинаміці відсутні універсальні математичні моделі турбулентності. Надійне передбачення характеристик турбулентних потоків – це винятково важлива наукова проблема, пов'язана зі складністю та недостатнім вивченням турбулентності як фізичного явища.

У статті розглянуто підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса (Reynolds Averaged Navier–Stokes–RANS); два класичних підходи – пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES методів для різних областей течії.

Виходячи з можливостей сучасної обчислювальної техніки, найбільш доступними залишаються гібридні методи. Вони ґрунтуються на сумісному використанні RANS і LES підходів у різних областях течії.

Ключові слова: аеродинаміка транспортних апаратів; числове моделювання; рівняння Нав'є–Стокса; моделі турбулентності.

Real flows around vehicles are turbulent. To date, there are no universal mathematical models of turbulence in computational aerodynamics. Reliable prediction of the characteristics of turbulent flows is an extremely important scientific problem and is associated with the complexity and insufficient study of turbulence as a physical phenomenon.

The paper considers approaches based on the use of Reynolds Averaged Navier–Stokes–RANS equations; two classical approaches – Direct Numerical Simulation (DNS) and Large Eddy Simulation (LES); hybrid approaches based on the joint use of RANS and LES methods for different flow regions.

Based on the capabilities of modern computing technology, hybrid methods remain the most accessible. They are based on the joint use of RANS and LES approaches in different areas of the flow.

Key words: aerodynamics of vehicles; numerical simulation; Navier–Stokes equation; turbulence models.

© А. В. Сохацький, 2021

Постановка проблеми. Створення перспективних транспортних засобів, що працюють на нових фізичних принципах є надзвичайно складною проблемою [1, 2]. Необхідні розробки нових транспортних технологій. Подальший їх розвиток пов'язаний з формуванням нової інтегрованої транспортної системи в контексті концепції сталого розвитку, що передбачає перехід на екологічно чисті та безпечні технології. Необхідне ефективне розв'язання проблеми кардинального підвищення швидкості та пропускну здатності транспортних систем за малих витрат енергії [1–4]. Крім традиційних вимог до безпеки, доступності та якості перевезень, найбільш чітко ставляться вимоги до екологічності, мультимодальні та швидкості транспортних послуг, що надаються. Підвищення швидкості перспективних транспортних засобів потребує ефективного розв'язування проблем, що пов'язані з динамікою руху та експлуатаційними характеристиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Зараз гостро порушуються питання про надання перспективним транспортним засобам оптимальних аеродинамічних характеристик. Високошвидкісні транспортні засоби рухаються в суцільному повітряному середовищі, для якого характерні невизначеності їхніх параметрів.

Реальний рух транспортного засобу відбувається в турбулентному повітряному середовищі. Моделювання турбулентних рухів повітряних мас є фундаментальною проблемою як теоретичної фізики, так і практичної аеродинаміки [3–6]. Відсутність універсальної теорії опису турбулентних течій створює проблеми з визначенням аеродинамічних навантажень [3–6]. Це питання одне з ключових моментів у проектуванні високошвидкісних наземних транспортних засобів, оскільки за високих швидкостей руху тільки на подолання опору повітря може припадати до 90 % загальних енергетичних витрат. Таким чином, необхідні фундаментальні дослідження в аеродинаміці високошвидкісного наземного транспорту [1, 2].

Методи моделювання турбулентних течій з певною мірою умовності можна розділити на три групи: підходи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса (Reynolds Averaged Navier–Stokes–RANS); два класичних підходи – пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES); гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів для різних областей течії [6, 7].

Найпоширенішими підходами нині є методи, що базуються на використанні осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав'є–Стокса (Reynolds Averaged Navier – Stokes – RANS). Вони замикаються за допомогою тієї або іншої напівемпіричної моделі турбулентності.

Класичні вихоророзрізнявальні підходи найбільш досконалі. Це пряме числове моделювання турбулентності (Direct Numerical Simulation – DNS) і метод моделювання великих вихорів (Large Eddy Simulation – LES). Метод DNS базується на безпосередньому прямому числовому розв’язуванні тривимірних нестационарних рівнянь Нав’є–Стокса з розрізненням усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Він ґрунтується на фізичних принципах аеродинаміки і повністю вільний від емпіричних припущень.

У рамках методу LES ті ж рівняння розв’язуються безпосередньо після їх попередньої просторової фільтрації. Це уможливорює виключити з розгляду частину просторово-часових масштабів. Проведена операція дає можливість значно знизити вимоги до просторово-часового розрізнення. Так знижуються вимоги до необхідних обчислювальних ресурсів.

Для врахування впливу відфільтрованих (“підсіткових”) масштабів турбулентності притягуються ті або інші напівемпіричні моделі.

У науковій літературі для підкреслення кардинальних відмінностей методу LES від підходів, що використовуються для замикання RANS, їх називають “підсітковими”.

До третьої групи належать гібридні підходи, що спираються на спільне використання RANS і LES підходів в різних областях течії. Вони найпоширеніші для практичного використання, виходячи з можливостей обчислювальної техніки.

Мета статті – проаналізувати сучасний стан моделювання турбулентних течій.

Виклад основного матеріалу. Моделювання на основі осереднених за Рейнольдсом рівнянь Нав’є–Стокса. Напівемпірична теорія турбулентності бере початок з класичної праці О. Рейнольдса [8], де було сформульовано підхід для опису турбулентної течії, який згодом назвали його іменем. Так з’явилися рівняння Рейнольдса. Або, як їх ще називають, усереднені за Рейнольдсом рівняння Нав’є–Стокса. У випадку нестисливої рідини рівняння Рейнольдса виходять з рівнянь Нав’є–Стокса з використанням такої процедури осереднювання:

$$\bar{f}(t) = \frac{1}{2T} \int_{t-T}^{t+T} f(\tau) d\tau, \quad (1)$$

де f – осереднювана функція;

t – час;

$2T$ – період осереднювання.

Період осереднювання передбачається досить великим порівняно з часовими масштабами всіх турбулентних неоднорідностей, властивих даній течії, й досить малим порівняно з характерним часовим масштабом осередненої течії. Відповідно до праці Рейнольдса [8], процедура осереднювання припускає виконання природних умов, а саме:

$$\overline{f + g} = \overline{f} + \overline{g}, \quad \overline{c} = c, \quad \overline{cf} = c\overline{f}, \quad \overline{\partial f / \partial s} = \partial \overline{f} / \partial s, \quad (2)$$

де f, g – довільні функції, які можуть бути представлені як суми середніх і пульсаційних змінних $f = \overline{f} + f'$ та $g = \overline{g} + g'$;

c – довільна константа;

s – просторова координата або час.

У випадку моделювання течії газу, що є стисливим, використовують більш досконалий спосіб осереднювання. Він називається осереднювання за Фавром. При цьому густина ρ і тиск p осереднюються за Рейнольдсом, а для інших змінних вводяться так звані середньозважені значення

$$\tilde{f} = \frac{\overline{\rho f}}{\overline{\rho}}. \quad (3)$$

Згідно з даним підходом розрахунок турбулентних течій стислої рідини проводиться шляхом безпосереднього розв'язування рівнянь Нав'є–Стокса, осереднюються за Рейнольдсом для густини та тиску.

Використання осереднювання за Фавром приводить вихідну систему рівнянь до дещо простішого вигляду, оскільки не з'являються додаткові доданки в рівнянні нерозривності. Крім цього, нестационарний член у рівнянні для кількості руху не потребує додаткового моделювання [5–6]. У праці [9] на основі числового моделювання шару зміщення показано, що в діапазоні малих чисел Маха обидва способи осереднювання приводять до однакових результатів. Вважають, що використання усереднювання за Фавром у ряді випадків призводить до чисельної нестійкості через форму рівняння нерозривності [10]. Для подолання нестійкості в праву частину рівняння нерозривності необхідно додавати дифузійний член.

Незважаючи на характер осередненої течії, її вимірність та стаціонарність чи нестационарність, необхідно розв'язувати тривимірні нестационарні рівняння Нав'є–Стокса. Це пов'язано з тим, що турбулентність є принципово тривимірним і нестационарним явищем. Слід звернути увагу на те, що для ряду моделей (наприклад, DNS) необхідно забезпечити достатню точність розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

Осереднені рівняння Нав'є–Стокса (рівняння RANS) для досконалого стисливого газу можуть бути записані в такому вигляді:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k H)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} [u_i (\tau_{ik} + \tau_{t,ik}) - (q_k + q_{t,k})], \\ \rho = pm/(RT), \end{cases} \quad (4)$$

де x_i – декартові координати ($i=1, 2, 3$);

u_i – компоненти вектора швидкості осередненої течії;

$$E = C_v T + u_k u_k / 2 \quad H = E + p / \rho = E_p T + u_k u_k / 2;$$

E – відповідно питома повна енергія та повна ентальпія газу;

T – температура;

$$C_v, C_p = C_v + R/m,$$

m – питомі теплоємності за сталого об'єму та постійного тиску;

$R = 8314,34$ Дж/моль·К – універсальна газова стала;

m -го – молекулярна маса.

Для спрощення запису знаку осереднювання за часом використовується правило підсумовування за індексами, що повторюються.

Компоненти тензора молекулярної в'язкої напруги і вектора щільності теплового потоку за рахунок молекулярної теплопровідності визначаються відповідно за допомогою закону реології Ньютона та закону Фур'є:

$$\tau_{ij} = 2\mu(T) \left[S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right], \quad q_i = \mu(T) \frac{\partial T}{\partial x_k}, \quad (5)$$

де $S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$ – тензор швидкостей деформацій;

δ_{ij} – символ Кронекера;

$\mu(T)$ і $\lambda(T)$ – коефіцієнти молекулярної динамічної в'язкості і теплопровідності.

Компоненти тензора рейнольдсових (турбулентних) напружень $\tau_{t,ij} = -\rho \overline{u'_i u'_j}$ та вектора рейнольдсового (турбулентного) теплового потоку $q_{t,i} = -\rho C_p \overline{u T'}$ записуються в рівняннях (1.4) при осереднюванні нелінійних конвективних членів вихідних рівнянь Нав'є–Стокса і перенесення енергії.

Їх безпосередній зв'язок з параметрами осередненого руху залишається невідомим.

Перевагою рівнянь RANS перед вихідними Нав'є–Стокса є те, що вони сформульовані безпосередньо відносно осереднених за часом характеристик течії, що становлять основний інтерес в задачах аеродинаміки. Таким чином можна виключити необхідність розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків шляхом інтегрування тривимірних нестационарних рівнянь Нав'є–Стокса (DNS) в реальних умовах течії розвитку сучасної обчислювальної техніки проведення розрахунку локальних нестационарних характеристик турбулентних потоків вважається абсолютно неможливим. Слід зазначити, що рівняння RANS є незамкнутими, оскільки вони містять невідомий тензор рейнольдсових напружень та вектор турбулентного теплового потоку. Тому для їх практичного використання потрібні додаткові співвідношення, що зв'язують ці величини з характеристиками осередненого руху. Вони можуть бути отримані тільки з використанням тієї або іншої емпіричної інформації. Ці співвідношення прийнято називати моделями турбулентності для напружень Рейнольдса або для інших моментів.

Альтернативний підхід до розв'язання проблеми замикання рівнянь Рейнольдса полягає у використанні рівнянь перенесення рейнольдсових напружень, які формально можуть бути отримані з рівнянь Нав'є–Стокса за допомогою процедури осереднювання за часом аналогічно тому, як це робиться під час виведення рівнянь Рейнольдса. Проте ці рівняння містять так звані моменти третього порядку ($\overline{u'_i u'_j u'_k}$). Їх зв'язок із параметрами осередненого руху і компонентами тензора рейнольдсових напружень (моментами другого порядку) невідомий, для їх визначення потрібне використання рівнянь перенесення для моментів третього порядку. Ці рівняння, зі свого боку, містять кореляції четвертого порядку і т. д., так що отримання чіткої замкненої системи рівнянь відносно статистичних характеристик турбулентності в принципі неможливе. У цій ситуації розумним компромісом було б обмеження моделювання рівняннями перенесення інших моментів [5, 6].

Слід урахувати те, що отримання надійної емпіричної інформації про значення кореляційних членів високих порядків необхідно для замикання відповідних моделей. Це питання надзвичайно проблематичне. Таким чином, як зазначається в [11], “обрив” описаного вище нескінченного “ланцюжка” на рівняннях перенесення других моментів неявно ґрунтується на тому, що не має теоретичних підтверджень про те, що зі зростанням порядку модельованих кореляцій їх вплив на основні статистичні характеристики турбулентних потоків зменшується (“принцип послаблення впливу”) [12].

Значні успіхи в області побудови різноманітних напівемпіричних моделей турбулентності були досягнуті в 60–70-х рр. минулого століття. Вони дали оманливу надію на створення універсальної RANS моделі, що може

бути придатною для розрахунку будь-якої, в крайньому випадку, більшості турбулентних течій.

Упродовж другої половини минулого століття науковими установами були проведені численні експериментальні і розрахункові дослідження турбулентних течій. Вони переконливо засвідчили, що локальні осереднені характеристики турбулентних потоків піддаються суттєвому глобальному впливу стійких, великомасштабних, з розмірами порядку макромасштабу течій, принципово тривимірних і нестационарних структур (рис. 1).

Характеристики цих структур залежать від конкретної геометрії даної течії і межових. Таким чином, гіпотеза локальності та осереднених характеристик турбулентних потоків, на якій у неявній формі передбачалось побудувати RANS моделі турбулентності, не виконується [11].

Це в принципі унеможливує побудову ідеальної моделі такого типу і робить згадані вище надії на можливість побудови універсальної RANS моделі турбулентності, по суті, нездійсненними. Дане твердження в рівній мірі стосується як простих моделей, що базуються на гіпотезі Буссинеска про лінійний зв'язок між тензорами рейнольдсових напружень і швидкостей деформацій, так і моделей перенесення рейнольдсових напружень.

Найбільш яскравим прикладом течій, для яких характерне формування когерентних турбулентних структур з розмірами порядку розмірів обтічного тіла, є течії з великими зонами відриву (рис. 1 а, с). Саме з цієї причини результати розрахунків таких течій з використанням RANS моделей виявляються, як правило, незадовільними [5, 6, 7].

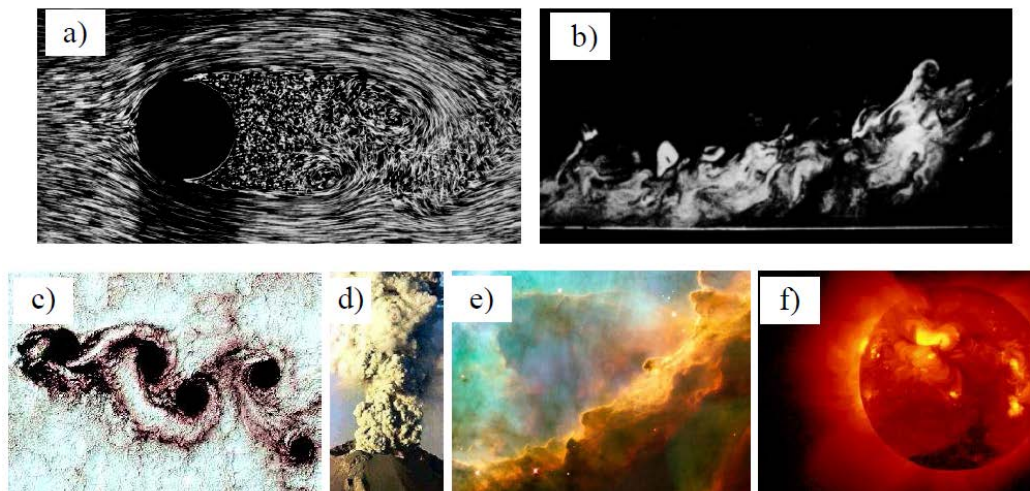


Рис. 1. Приклади когерентних вихрових структур [5, 6]:
а – обтікання циліндра; б – турбулентний прикордонний шар за наявності позитивного подовжнього градієнта тиску; с – “слід” острова в океані;
д – виверження вулкана; е – галактичні хмари; ф – Сонце

Певні ознаки недосконалості напівемпіричної теорії турбулентності з'явилися вже в кінці 60-х на початку 70-х рр. минулого століття,

Значна кількість публікацій, що присвячені вдосконаленню відомих та створенню нових напівемпіричних моделей турбулентності підтверджували цілий ряд їх недоліків. Незадовільні результати з розрахунку відривних течій спричинили масу питань про їх коректність. У зв'язку з цим виникло багато питань про межі застосування напівемпіричних моделей турбулентності. Багаточисельні дослідження призвели до появи значної кількості нових RANS моделей. Порушилось гостре питання про обґрунтований вибір тієї або іншої з них для розрахунку турбулентних течій.

У зв'язку з цим почалися систематичні дослідження, спрямовані на визначення меж застосування напівемпіричних моделей турбулентності.

Ця робота проводилася і продовжує проводитись як окремими дослідницькими групами, так і в рамках масштабних міжнародних програм, координуваних NASA та Європейською комісією з розвитку наукових досліджень. Зокрема, NASA був створений спеціальний постійно оновлюваний інтернет-портал [13], на якому приведені формулювання найбільш поширених моделей турбулентності, "еталонні" результати розрахунків різних течій, отримані з їх використанням, та експериментальні дані, які можуть служити для валідації цих моделей. Аналогічний ресурс був створений і підтримується "Європейською спільнотою з течій, турбулентності і горіння" (ERCRAFT) [14]. На розв'язання тієї ж проблеми (вдосконалення і валідацію моделей турбулентності) спрямована значна кількість великих міжнародних проектів, що фінансуються Євросоюзом ECARP [15], FLOMANIA [16] і АТААС [17].

Важлива роль у цій сфері належить спеціальним робочим семінарам, на яких результати розрахунків, отримані окремими дослідницькими групами із застосуванням різних моделей турбулентності, порівнюються зі спеціально дібраними експериментальними даними і з результатами розрахунків у рамках LES і DNS.

У результаті таких цілеспрямованих зусиль накопичено велику і, що особливо важливо, об'єктивну (практично вільну від обчислювальних неточностей) інформацію про можливості різних RANS моделей.

Ця інформація є виключно важливою, оскільки, незважаючи на зазначені серйозні недоліки цих моделей, саме вони аж до нинішнього часу є і ще довго залишатимуться основним робочим інструментом для проведення практичних розрахунків турбулентних течій. Значні потреби в розв'язуванні таких задач відчувають багато галузей науки і техніки.

Фізичні особливості моделювання турбулентних течій. До класичних вихоророзрізнявальних підходів прийнято зараховувати пряме числове

модельовання (DNS) турбулентних течій і метод модельовання великих вихорів (LES). За їх допомогою можуть бути розраховані не лише статистичні параметри турбулентних потоків, а також і їхня нестационарна вихрова структура.

Пряме числове модельовання (DNS). На відміну від RANS моделей, у побудові яких використовуються ті або інші, а іноді досить довільні допущення і великий об'єм емпіричної інформації. Єдине загальноприйняте на сьогодні припущення, на якому базується DNS, полягає в тому, що рівняння Нав'є–Стокса адекватно описують не лише ламінарні, але й перехідні і турбулентні течії. Розрахунок турбулентних течій у методі DNS робиться шляхом безпосереднього прямого розв'язування диференціальних рівнянь Нав'є–Стокса у частинних похідних.

При цьому, незалежно від характеру осередненої течії (тобто незалежно від того, чи є воно двовимірним або тривимірним, стаціонарним або нестационарним), повинні використовуватися тривимірні нестационарні рівняння Нав'є–Стокса, оскільки турбулентність є принципово тривимірним і нестационарним явищем. Застосування DNS передбачає необхідність досить точного розрізнення усіх просторово-часових масштабів турбулентності.

На рис. 2 показано типовий енергетичний спектр турбулентності як залежність спектральної щільності кінетичної енергії турбулентності E від хвильового числа k за досить високих чисел Рейнольдса [5, 6].

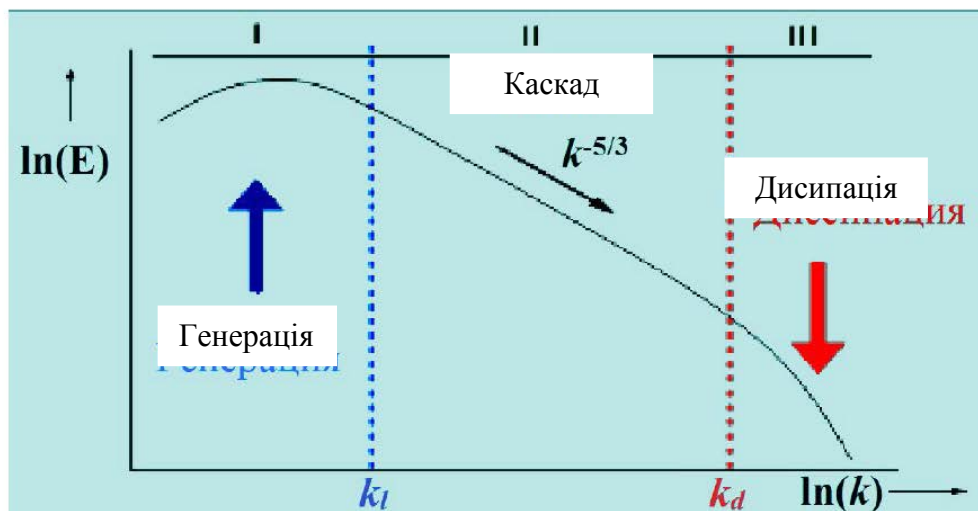


Рис. 2. Области енергетичного спектра турбулентності для високих значень числа Рейнольдса [5, 6]

Цей спектр має три області.

Область I відповідає великомасштабним турбулентним вихорам, що несуть енергію, з розмірами порядку інтегрального лінійного масштабу даної течії L (йому відповідає хвильове число $k_I = 2\pi/L$), що відбирає енергію з осередненої течії.

В області III спектра домінують дрібні вихори з розмірами менше колмогоровського масштабу

$$\eta = (\nu^3/\varepsilon)^{1/4},$$

де $\nu = \mu/\rho$ – кінематична в'язкість;

ε – швидкість дисипації енергії турбулентності і хвильовими числами $k > k_d = 2\pi/\eta$.

В'язка дисипація таких вихорів переводить кінетичну енергію турбулентності в тепло.

Область II – це так званий інерційний інтервал спектра. Він лежить між областями I і III, що відповідає вихорим структурам з розмірами в діапазоні $\eta < l < L$.

Вплив молекулярної в'язкості в інерційному інтервалі спектра ніяк не виявляється, енергія турбулентності не генерується, її дисипація не відбувається. Вона передається від більших вихорів до менших. Це так званий енергетичний каскад турбулентності. В результаті енергетичний спектр в області II вважають універсальним і описують законом Колмогорова $E \sim k^{5/3}$ [5, 6, 7].

Відношення максимального L і мінімального η лінійних масштабів турбулентності L/η пропорційно числу Рейнольдса в степені $3/4$ $L/\eta \sim Re^{3/4}$. Внаслідок цього розмір просторової сітки, необхідної для проведення розрахунків за допомогою DNS, зростає зі збільшенням числа Рейнольдса як $(L/\eta)^3$ або як $Re^{9/4}$. Разом зі зростанням числа Рейнольдса збільшується також відношення інтегрального часовому масштабу τ_I і мінімального. Це відповідає колмогоровським вихорам та часовому масштабу $\tau_\eta = (\nu/\varepsilon)^{1/2}$, що визначає кількість кроків за часом, необхідних для проведення розрахунку: $\tau_I/\tau_\eta \sim Re^{1/2}$.

У результаті сумарні витрати на проведення розрахунків методом DNS зростають зі зростанням числа Рейнольдса як $Re^{11/4}$. Вони виявляються величезними за значень цього параметра (близько 10^6 і вище), що становлять практичний інтерес.

Отже, незважаючи на бурхливе зростання продуктивності комп'ютерів, яке трапляється останнім часом, використання DNS залишається обмеженим в основному фундаментальними дослідженнями течій із відносно простою геометрією і низькими числами Рейнольдса, метою яких є отримання детальної інформації про структуру та основні закономірності турбулентності.

Це, проте, ніскільки не зменшує важливості такого підходу, оскільки отримані за допомогою DNS результати разом з експериментальними даними становлять основу для розробки, калібрування й тестування напівемпіричних моделей турбулентності. Більше того, слід мати на увазі, що в майбутньому DNS стане, мабуть, домінуючим підходом не лише в аеродинаміці, але й у суміжних галузях техніки, скажімо, у хімічній технології, атомній енергетиці тощо.

Метод моделювання великих вихорів (LES). Метод моделювання великих вихорів (LES) сформувався на початку 70-х рр. минулого століття [18]. Він базується на проміжному між RANS і DNS рівні опису турбулентних течій. Ідея LES полягає в заміні “глобального” осереднювання характеристик реальної турбулентної течії за часом, на якому ґрунтуються рівняння Рейнольдса (1.4), “фільтрацією” цих характеристик від короткохвильових неоднорідностей або, іншими словами, їх просторовим осереднюванням в областях з розмірами порядку розміру фільтра. Цю процедуру ілюструє рис. 3. У його лівій частині показаний результат фільтрації одновимірного сигналу за допомогою фільтра одиничної ширини, а в правій – деяка реальна течія, сітка, використовувана для його локального просторового усереднювання, та інформація, що втрачається при цьому, про вихори з розмірами менше розмірів комірок цієї сітки.

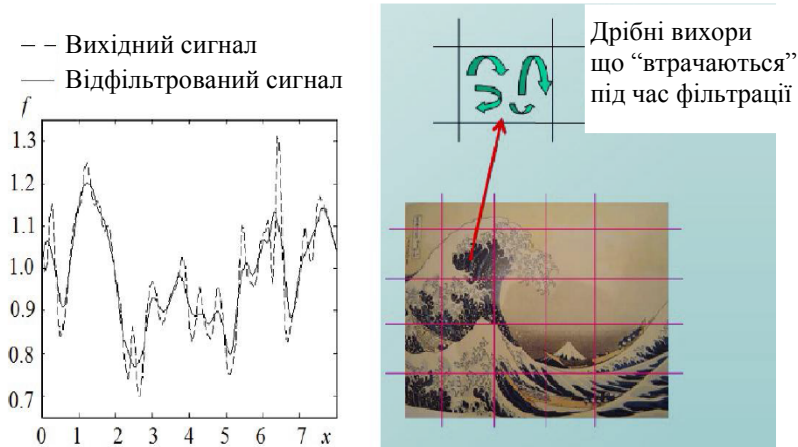


Рис. 3. Порівняння вихідного і відфільтрованого сигналів [5, 6]

Для виведення рівнянь LES актуальні змінні f у рівняннях Нав'є–Стокса замінюються сумою відповідних “відфільтрованих” і “підсіткових” змінних $f = \tilde{f} + f'$. Потім до отриманих в результаті рівнянь застосовується операція фільтрації. При цьому величина \tilde{f} визначається виразом

$$\tilde{f}(t, x) = \int_V G(x - x', \Delta) f(t, x') dx'^3, \quad (6)$$

де $G(x - x', \Delta)$ – функція фільтра;

x – координата даної точки потоку;

Δ – ширина фільтра.

На рис. 4 показано два приклади часто використовуваних фільтрів [5, 6].

У цілій низці наукових праць наводяться приклади використовуваних фільтрів. Наприклад, [7], [19]:

$$G(x, x') = \begin{cases} 1/\Delta & \text{для } |x - x'| < \Delta/2 \\ 0 & \text{для } |x - x'| > \Delta/2 \end{cases}, \quad G(x, x') = \frac{6}{\pi\Delta} \exp\left[-\frac{6(x - x')^2}{\Delta^2}\right].$$

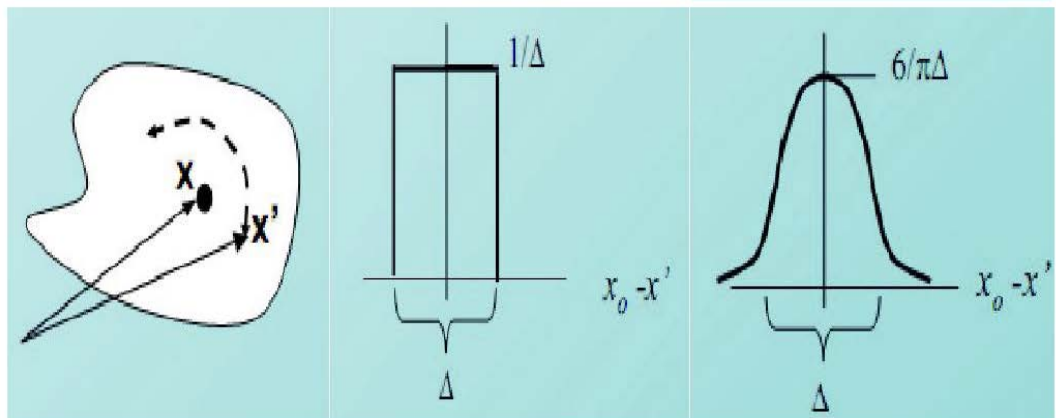


Рис. 4. Приклади фільтрів, що використовуються в LES [5, 6, 7]

Опускаючи деталі виведення, які можна знайти у багатьох монографіях та наукових працях [7, 19]), наведемо остаточну форму основних рівнянь LES для стисливого газу (знаки фільтрації основних змінних для зручності запису опущені) [5, 6, 7]:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k)}{\partial x_k} = 0, \\ \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_k)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} (\tau_{ik} + \tau_{SGS,ik}) - \frac{\partial p}{\partial x_i}, \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_k H)}{\partial x_k} = \frac{\partial}{\partial x_k} [u_i (\tau_{ik} + \tau_{SGS,ik}) - (q_k + q_{SGS,k})], \\ \rho = pm/(RT). \end{array} \right. \quad (7)$$

З формальної точки зору, єдина відмінність між системою рівнянь (7) і рівняннями Рейнольдса (4) полягає у відмінності додаткових доданків, що з'являються в правих частинах рівнянь руху і енергії в результаті просторової фільтрації нелінійних конвективних членів рівнянь Нав'є–Стокса (LES) та їх осереднювання за часом (RANS).

У рівняннях LES (7) ці члени мають індекс “SGS” (Sub – Grid Scale), а в рівняннях RANS (4) – індекс “t” (turbulent). Проте за цією формальною відмінністю приховується принципово різний фізичний зміст LES і RANS підходів до опису турбулентних течій. Зокрема, додаткові члени RANS рівнянь (напруження Рейнольдса і турбулентний тепловий потік) описують вплив, який чинять на осереднене за часом рішення турбулентні структури (вихори) усіх масштабів.

На противагу цьому аналогічні (“підсіткові”) члени рівнянь LES (7) описують вплив, що чинять на відфільтровані за простором характеристики потоку тільки відносно дрібні вихори з розмірами, меншими за розмір фільтра Δ .

У рамках методу LES вихрові структури з розмірами, що перевищують розміри фільтра, розрізняються “точно”, а моделюються лише вихрові структури менших розмірів. Щоб підкреслити це, моделі турбулентності для LES, тобто співвідношення, що визначають зв'язок підсіткових напружень і теплового потоку з параметрами відфільтрованої течії, називають “підсітковими” моделями [5, 6, 7].

Таким чином, якщо розміру фільтра відповідає хвилеве число k_Δ , що лежить в універсальній (“інерційній”) області енергетичного спектра турбулентності, тобто, якщо $k_l < k_\Delta < k_d$ (рис. 5), то моделюванню підлягають тільки відносно універсальні, не залежні від конкретної геометрії і межових умов вихори. В результаті роль підсіткової моделі в LES полягає переважно у забезпеченні правильної швидкості каскадної передачі енергії турбулентності від великих до дрібних вихорів у межах інерційного інтервалу хвилевих чисел або, іншими словами, до забезпечення правильної швидкості дисипації найменших із “розрізнених” вихорів.

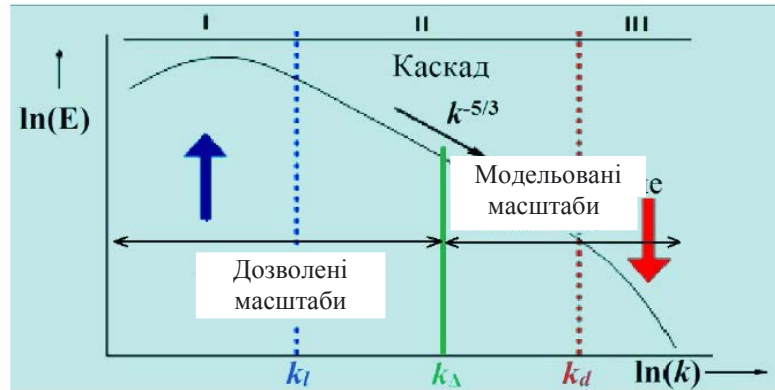


Рис. 5. Масштаби турбулентних структур, що розрізняються і моделюються у рамках LES

Саме у цьому полягає принципова перевага LES перед RANS підходом, у рамках якого потрібне моделювання всіх, у тому числі великих енергомісних вихорів, що не підкоряються будь-яким універсальним законам. З практичної точки зору, ця перевага означає, що побудова адекватних підсіткових моделей для LES є значно легшим завданням, ніж побудова моделей турбулентності для замикання рівнянь RANS.

Досвід застосування LES свідчить про те, що при виконанні умови $k_l < k_\Delta < k_d$ цей підхід забезпечує високу точність розрахунку не лише усереднених, але й пульсаційних характеристик турбулентності навіть при використанні простих підсіткових моделей, наприклад, класичної алгебраїчної моделі Смагоринського [20]. В основі цієї моделі лежить поняття підсіткової в'язкості ν_{SGS} і припущення про те, що ця величина визначається середнім значенням швидкості дисипації енергії турбулентності ε , що припадає на одиницю об'єму. Виходячи з міркувань розмірності, слід прийняти, що

$$\nu_{SGS} \sim \varepsilon^{1/3} \Delta^{3/4}, \quad (8)$$

де Δ – характерний розмір фільтра.

За наявності в спектрі турбулентності інерційного інтервалу (рис. 5) ті ж міркування розмірності уможливають виразити ε через середню швидкість деформації $S = \sqrt{S_{ij}S_{ij}}$ і розмір фільтра, $\varepsilon \sim S^3 \Delta^2$, що безпосередньо приводить до формули Смагоринського для підсіткової в'язкості

$$\nu_{SGS} = (C_s \Delta)^2 S, \quad (9)$$

де C_s – емпірична константа Смагоринського.

При цьому підсітковий тензор напружень визначається з використанням гіпотези Буссинеска

$$\tau_{SGS,ij} = 2\rho\nu_{SGS} \left[S_{ij} - \frac{1}{3} S_{kk} \delta_{ij} \right] - \frac{2}{3} \rho k_{SGS} \delta_{ij}, \quad (10)$$

де $k_{SGS} = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2}$ – підсіткова кінетична енергія.

Згідно з моделлю Смагоринського, підсіткова в'язкість залежить не лише від параметрів відфільтрованої течії: компонент тензора швидкостей деформацій, але й від розміру фільтра.

Слід зазначити, що в більшості практичних застосувань LES явна процедура фільтрації не застосовується, а роль фільтра відіграє розрахункова сітка, що використовується для числової інтеграції рівнянь (7) [5, 6, 7]. При цьому як характерний розмір фільтра Δ використовуються різні комбінації локальних кроків сітки в трьох просторових напрямках. Під час використання сіток, близьких до ізотропних (саме такі сітки є оптимальними для LES), конкретний спосіб визначення Δ не відіграє ролі, оскільки при цьому всі способи виявляються, по суті, еквівалентними. Проте на практиці через складність геометрії реальних течій часто доводиться використовувати істотно анізотропні сітки. Особливо це стосується структурованих сіток), і вибір того або іншого визначення Δ стає дуже важливим. Найбільше поширення при цьому отримало визначення Δ як кореня кубічного з об'єму осередку сітки [21]. Проте у цього визначення немає якого-небудь теоретичного обґрунтування і його використання у разі сильно анізотропних сіток може призводити до значного спотворення результатів LES.

Слід зазначити, що при подрібненні розрахункової сітки додаткові в порівнянні з рівняннями Нав'є–Стокса (модельовані) складові в рівняннях LES (7) зменшуються, і розв'язок LES асимптотично прямує до розв'язків DNS, незалежно від використовуваного методу визначення підсіткового масштабу. У цьому полягає ще одна принципова відмінність методу LES від методу RANS, в якому подрібнення сітки призводить лише до отримання “точних” (незалежних від сітки) розв'язків рівнянь Рейнольдса і ніяк не позначається на адекватності фізичного моделювання.

Важливою особливістю підсіткових моделей для LES є та обставина, що емпіричні константи (наприклад, константа Смагоринського), що входять у них, можуть залежати від використовуваного для розв'язування числового методу. Це пояснюється тим, що точність розрізнення великомасштаб-

них вихрових структур за числового розв'язування рівнянь LES визначається не лише обчислювальною сіткою, але й властивостями використовуваного числового методу, зокрема властивою йому числовою дисипацією, яка сама по собі відіграє роль своєї підсіткової моделі. Таким чином, якщо ця дисипація значна, то константа підсіткової моделі Смагоринського має бути відповідним чином зменшена, а якщо мала, то, навпаки, – збільшена. У зв'язку з цим для кожного числового методу має проводитись індивідуальне калібрування константи моделі Смагоринського або аналогічних їй констант інших підсіткових моделей. Таке калібрування здійснюється зазвичай шляхом розв'язування відповідної задачі про виродження однорідної ізотропної турбулентності.

При цьому слід використовувати різні значення константи і добору такого її значення, за якого розрахунковий спектр розрізненої кінетичної енергії турбулентності якнайкраще узгоджується з експериментальними даними або з результатами DNS і підпорядковується закону “ $-5/3$ ” в інерційному діапазоні хвильових чисел.

На рис. 6 зображено енергетичні спектри, отримані під час розв'язування такої задачі з використанням схем із різним порядком апроксимації нев'язких складових газодинамічних потоків і фіксованого значення константи $C_s = 0,2$ [5, 6].

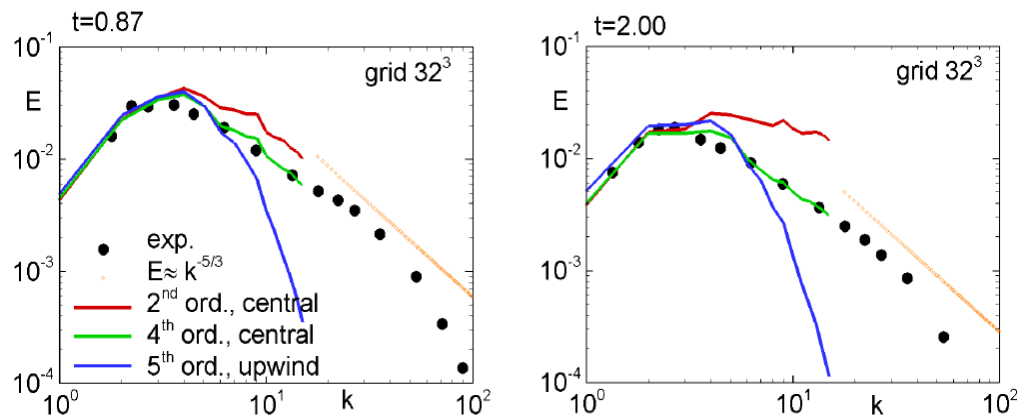


Рис. 6. Спектри розрізненої енергії турбулентності в два моменти часу з розв'язком задачі про виродження однорідної ізотропної турбулентності, що отримані на основі LES з моделлю Смагоринського з використанням різних числових методів за $C_s = 0,2$ [5, 6]

З графіків (рис. 6) видно, що числовий метод значно впливає на результати LES, причому за цього значення константи C_S правильна поведінка спектрів забезпечується під час використання тільки однієї з трьох даних схем апроксимації нев'язких потоків, а саме симетричної схеми четвертого порядку точності. У разі використання протипотокової схеми короткохвильові моди спектра практично не розрізняються через занадто високу числову дисипацію навіть за підвищеного (п'ятого) порядку апроксимації точності схем [5, 6]. Під час розрахунку вільних турбулентних течій з використанням монотонних числових алгоритмів ця обставина уможливило взагалі відмовитися від явного моделювання підсіткової турбулентності, оскільки в цьому випадку функції підсіткової моделі з успіхом виконує властива таким методам числова дисипація [5, 8, 22]. Цей напрям у LES дістав назву Monotonically Integrated LES (MILES) або Implicit LES (ILES).

На противагу цьому під час використання симетричної схеми другого порядку точність з тим же значенням константи $C_S = 0,2$ навіть сумарна дисипація моделі й методу виявляється недостатньою для правильного опису каскаду турбулентності (енергія турбулентності “генерується” і накопичується в короткохвильових модах спектра) [5, 6, 8].

На рис. 7 зображено енергетичні спектри, отримані за різних значень C_S за допомогою коду NTS [23], у якому для LES використовується симетрична апроксимація нев'язких потоків з четвертим, а в'язких – з другим порядком точності. З графіка (рис. 7) видно, що оптимальним значенням константи Смагоринського для цього коду є $C_S = 0,2$.

Отже, вважають, що модель Смагоринського (1.9) не забезпечує рівності нулю підсіткової в'язкості на твердій поверхні й тому не може безпосередньо застосовуватися для розрахунку пристінних течій. Для усунення цього недоліку в неї вводиться демпфуючий множник [24], що є аналогом множника Ван Дріста в моделі Прандтля для RANS

$$v_{SGS} = (C_S \Delta)^2 \left[1.0 - \exp\left(-\left(d_w^+/25\right)^3\right) \right] S, \quad (11)$$

де $d_w^+ = d_w u_\tau / \nu$ – безрозмірна відстань до стінки;

$u_\tau = \sqrt{\tau_w / \rho}$ – динамічна швидкість;

τ_w – дотичне напруження на стінці.

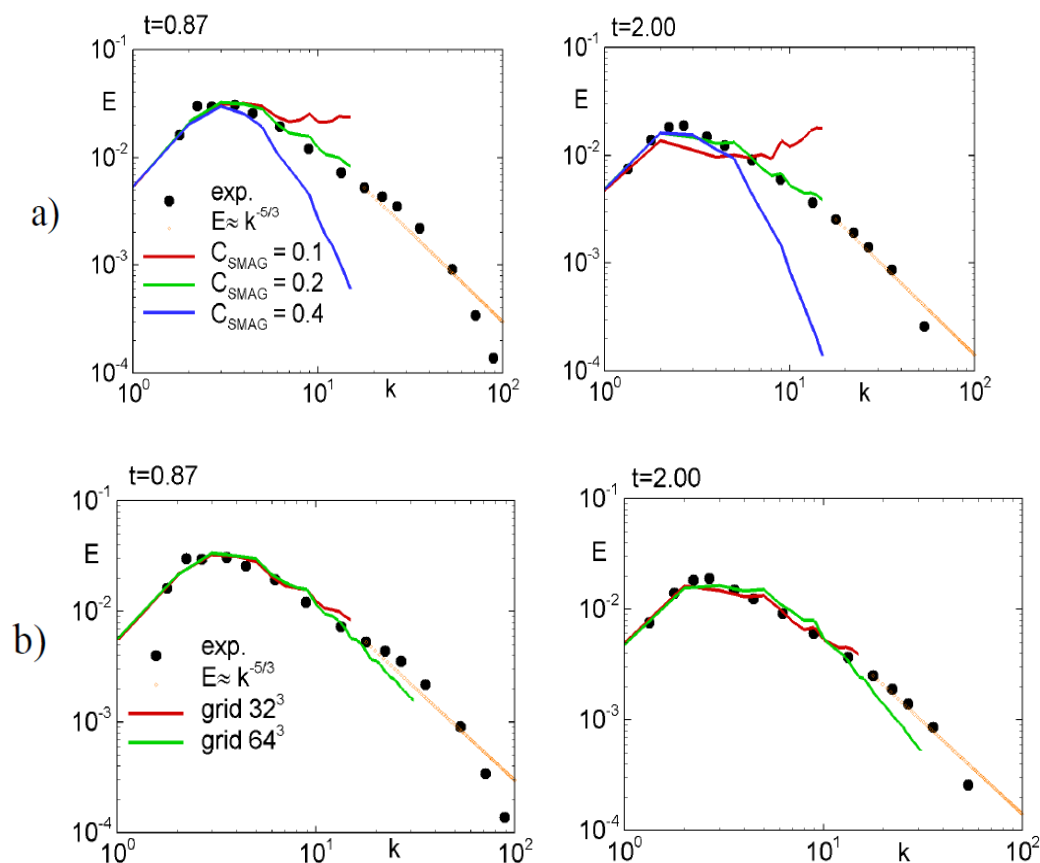


Рис. 7. Спектри розрізної енергії турбулентності в задачі про виродження однорідної ізотропної турбулентності, отримані з LES з моделлю Смагоринського [23]: а) вплив вибору константи на результати розрахунку на сітці $32 \times 32 \times 32$; б) вплив сітки на результати розрахунків за $C_s = 0,2$

Крім того, досвід показує, що під час розрахунку пристінних течій необхідно використати приблизно в два рази менше значення константи Смагоринського, ніж під час розрахунку вільних турбулентних течій [5, 6, 7]. Цей факт ілюструє рис. 8, на якому порівнюються результати розрахунку течії, що встановилася в плоскому каналі, отримані за допомогою модифікованої моделі Смагоринського (1.11) з використанням коду NTS за $C_s = 0,2$ і $0,1$.

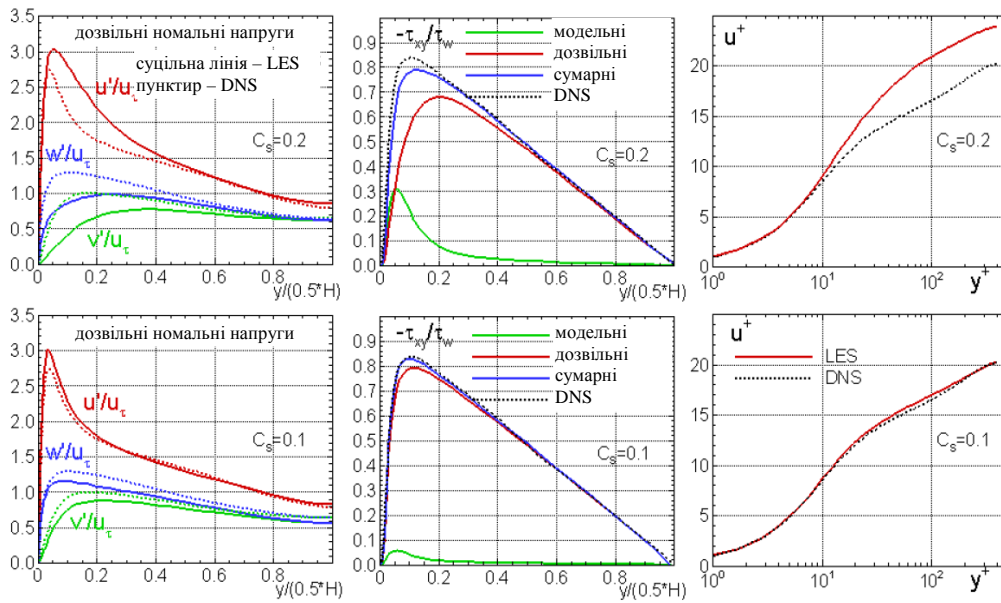


Рис. 8. Порівняння результатів LES течії, що встановилася, в плоскому каналі, якщо число Рейнольдса $Re_\tau = u_\tau H / \eta = 400$, отриманих із використанням моделі Смагоринського за різних значень C_s , з результатами DNS [25]

З рис. 8 видно, що в першому випадку, тобто з використанням значення $C_s = 0,2$, яке отримане під час калібрування цієї константи на задачі про загасання вільної ізотропної турбулентності, результати розрахунку суттєво відрізняються від відповідних результатів DNS [25], а за $C_s = 0,1$ – практично відповідають цим результатам [5, 6, 7, 25].

Зазначені труднощі, пов'язані із застосуванням моделі Смагоринського та інших подібних моделей для розрахунку пристінних турбулентних течій, можуть бути покращені при використанні так званих динамічних підсіткових моделей. Детальний аналіз сучасних версій динамічних підсіткових моделей наведено у ряді наукових досліджень [5, 6, 7, 21, 26–29].

Незважаючи на великі переваги LES, його недоліком є те, що цей підхід потребує великих обчислювальних ресурсів, у рази більших, ніж RANS. Це пов'язано з необхідністю, як і у випадку DNS, проведення тривимірних нестационарних розрахунків на досить дрібних сітках навіть в тих випадках, коли метою розрахунку є тільки визначення параметрів осередненої течії.

Проте в LES дрібномасштабна частина спектра моделюється, а не розраховується “точно”, як у DNS, а ресурси, необхідні для реалізації LES, виявляються істотно меншими, ніж для DNS.

Зокрема, для розрахунку турбулентності далеко від твердих стінок кількість комірок сітки, необхідна для проведення LES, збільшується зі зростанням числа Рейнольдса набагато повільніше, ніж у випадку DNS пропорційно $Re^{0.4}$, а не $Re^{2.25}$ [30]. Проте поблизу стінок, де навіть найбільші енергонесучі вихори мають дуже маленькі розміри, вимоги до сіток для LES істотно посилюються і наближаються до аналогічних вимог для DNS. Кількість комірок, необхідних для LES таких течій пропорційно $Re^{1.8}$ [30]. Це робить LES для складних пристінних течій, що становлять практичний інтерес високим числам Рейнольдса, лише трохи менше ресурсоємним, ніж DNS, причому основні обчислювальні витрати пов’язані при цьому з розрізненням турбулентності в тонкій пристінній області.

На рис. 9 зображено залежності від числа Рейнольдса кількості комірок сітки, які повинні міститись у внутрішній і зовнішній областях турбулентного прилежого шару на пластині під час його розрахунку в рамках LES [31]. З графіків (рис. 9) видно, що за $Re = 10^6$ повна кількість осередків дорівнює $\sim 10^{8.5}$, причому 99 % з них міститься у внутрішній частині прилежого шару. Така обставина стимулювала пошук альтернативних підходів, що дають можливість без помітного зниження точності розв’язати проблему. Це сприяло появі так званих гібридних RANS – LES підходів.

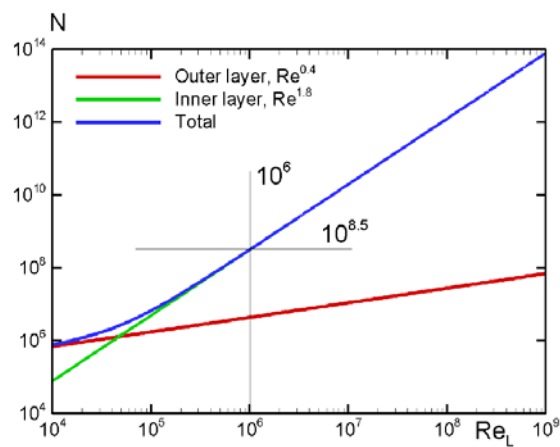


Рис. 9. Залежність від числа Рейнольдса кількості комірок сітки у внутрішній і зовнішній областях прилежого шару на плоскій пластині і загальної кількості комірок, необхідних для LES цієї течії [31]

Гібридні RANS–LES підходи. Гібридні RANS–LES моделі з’явилися порівняно недавно: в дев’яності роки минулого століття. Найпоширенішим методом став метод моделювання від’єднаних вихорів – Detached Eddy Simulation або DES [32].

На сьогодні принаймні поширені декілька десятків таких моделей. Їх подальшому вдосконаленню й розвитку присвячено величезну кількість досліджень [5, 6, 7, 32–36]. DES тримав подальший розвиток – Delayed Detached Eddy Simulation (DDES) [41]. Це свідчить про позитивні сторони ідеї, що лежить в основі гібридних моделей. З іншого боку, немає повної задоволеності вже існуючими моделями такого типу.

Загальна концепція, що лежить в основі гібридних моделей, відбивається в їх назві. Вона полягає в спробі побудови комбінованих моделей, які функціонували б як RANS в одних і як LES в інших областях течії. Така можливість відкривається завдяки формальній схожості рівнянь Рейнольдса (4) і рівнянь LES (7). Проте шляхи реалізації цієї можливості можуть бути абсолютно різноманітними. Це пояснюється відмінністю різних форм гібридних моделей.

Детальний огляд цих гібридних моделей представлено в цілому ряді наукових праць [5, 6, 7, 37, 38, 39, 40]. Проблеми розробки та вдосконалення гібридних RANS–LES моделей постійно обговорюються на різноманітних міжнародних конференціях, симпозіумах і т. д. [34, 35].

Насамперед до дуже поширених гібридних RANS–LES моделей слід зарахувати згаданий вище історично перший гібридний метод DES. Він був запропонований як альтернатива RANS і LES методам для розрахунку течій з великими відривними зонами. Відомо, що RANS-моделі не здатні забезпечити прийнятну для практики точність розрахунку таких течій. LES потребує надмірно великих обчислювальних витрат, лівова частка яких пов’язана з розрахунком пристінної частини приєднаних примежових шарів, які містять енергонесучі вихори малих розмірів.

Це спонукало авторів DES [32–36] до створення такої моделі, яка функціонувала б як RANS в області приєданого примежового шару і забезпечувала цілком прийнятну точність, і як LES у відривних областях потоку, де його використання не потребує надмірно дрібних сіток. Назва методу (“моделювання від’єднаних вихорів”) підкреслює принципову відмінність DES від LES.

Таким чином, у рамках DES “точно” розрізняються лише “від’єдані” вихори, які містяться у відривній зоні. Відносно дрібні вихори, що формуються у приєданому примежовому шарі, описуються звичайними напівемпіричними RANS моделями.

Ще одна важлива особливість DES полягає в тому, що в рамках цього підходу у RANS і LES областях використовується одна й та ж “базова” модель турбулентності, яка функціонує як RANS-модель усередині пристінного прилежового шару і як її підсітковий аналог далеко від твердих стінок. При цьому межа між областями RANS і LES визначається в процесі розрахунку автоматично і залежить від кроків використовуваної обчислювальної сітки, від відстані від даної точки потоку до обтічної поверхні та від локальних параметрів потоку.

Інтенсивний розвиток обчислювальної аеродинаміки сприяв появі цілого ряду гібридних DES-методів [42–47]. У зв’язку з цим DES та інші аналогічні DES-подібні методи: Extra – Large Eddy Simulation або X – LES [45] і Limited Numerical Scales або LNS [46] часто не зовсім точно називають “незонними” (“non-zonal”) гібридними методами, щоб відрізнити їх від зонних гібридів, в яких RANS і LES області пропонуються з тих або інших міркувань. До таких методів належить, наприклад, зонний DES (Zonal DES або ZDES), що розвивається в дослідженні [47]), а також ряд інших зонних підходів. Цей метод має ряд переваг у порівнянні з DES, що полягають у більшій гнучкості. Проте його основний недолік – це необхідність апріорних уявлень про структуру течії, наприклад, про положення точки (лінії) відриву потоку.

Окрему групу гібридних RANS–LES методів становлять так звані моделі LES з пристінним моделюванням (Wall Modeled LES–WMLES) [48], які можуть використовуватися для розрахунку не лише відривних, але й складних приєднаних турбулентних течій. Ідея цих методів полягає у використанні RANS не в усьому пристінному прилежовому шарі, як це робиться в DES, а тільки в його внутрішній області, тобто саме в тій області, на розрахунок якої припадають основні обчислювальні витрати LES. Проте спектр застосування WMLES досить широкий [5, 6, 49].

Останніми роками набув розвитку ще один підхід до RANSSLES моделювання турбулентності, що є найбільш загальною формою зонних методів і дістав назву вбудованого LES (Embedded LES), у рамках якої область LES може довільно розташовуватись усередині області RANS (рис. 10) [5, 6].

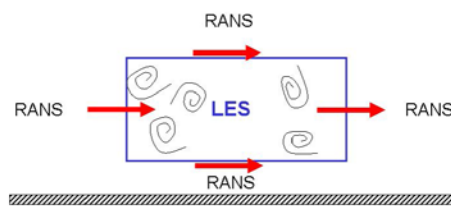


Рис. 10. Схема RANS і LES областей у вбудованому LES

Це відкриває можливість використання обчислювального трудомісткого методу LES тільки в тих областях потоку, які не піддаються опису у рамках RANS, або в областях, для яких потрібно отримання інформації не лише про осереднені, але й про пульсаційні характеристики потоку. Така задача може виникнути під час розв'язування зв'язаних задач аеродинаміки та пружності, акустики.

Проте для їх практичної реалізації потрібно розв'язання ряду складних фізичних проблем, пов'язаних зі “зшиванням” RANS і LES-розв'язків.

Так, під час переходу від LES до RANS розв'язуванню необхідне забезпечення плавного пригнічення турбулентних пульсацій [50].

На противагу цьому для досягнення швидкого переходу від повністю модельованої турбулентності в RANS-області до “дозволеної” турбулентності в LES-області на відповідних межах останньою необхідно вводити штучні збурення [5, 6]. Незважаючи на значні моделювання турбулентних течій, цілком задовільного вирішення цих питань досі не знайдено. Окрім цього, програмна реалізація запропонованих методів досить складна й суттєво спирається на специфіку використовуваних обчислювальних сіток і структуру зберігання даних у відповідних обчислювальних кодах. Це утруднює, а іноді й унеможливорює перенесення цих методів з одного коду в інший.

На сьогодні розроблено ще й так звані “безшовні” (seamless) RANS–LES гібриди, в яких обидва підходи тим або іншим чином “зважаються” і одночасно функціонують у всій розрахунковій області. Найбільш відомим із них є метод, що базується на частково осереднених рівняннях Нав'є–Стокса, – Partially Averaged Navier–Stokes або PANS [51]. Проте проблема побудови вагових функцій, що автоматично забезпечують адекватні, відповідно до локальних розмірів сітки, ваги RANS і LES моделей в даній точці потоку залишається, по суті, невирішеною. Це істотно обмежує практичне використання безшовних підходів RANS–LES.

Широкий досвід використання лінійних моделей свідчить про те, що й у наш час найбільш високий “рейтинг” серед них отримали дві моделі та їх модифікації:

– модель перенесення турбулентної в'язкості [52] (модель Спаларта–Аллмараса або SA модель).

– модель перенесення кінетичної енергії турбулентності та питомої швидкості її дисипації [53, 54] – ($k - \omega$ Shear Stress Transport модель Ментера або SST модель).

Проте серед гібридних RANS–LES методів найпоширенішим залишається гібридний метод DES [32–36] та його пізніші модифікації.

Оцінка обчислювальних ресурсів, необхідних для застосування різних підходів. Існуючі підходи до моделювання турбулентних течій значно розрізняються між собою не лише своїми можливостями відображати фізичні

процеси, але й потребами в обчислювальних ресурсах, які необхідні для їх практичного застосування.

Якісна оцінка ресурсів, необхідних для проведення обчислювальних експериментів, дається в працях [27, 45]. Основні результати подано в табл. 1. У другому і третьому стовпцях цієї таблиці наведено типові розміри сіток та кількість кроків інтеграції за часом, необхідних для розрахунку обтікання типового цивільного транспортного засобу (літака чи автомобіля) з використанням методів, що базуються на RANS, DES, LES і DNS.

Ці дані ґрунтуються на аналізі просторових і часових масштабів турбулентності, що розрізняються у рамках перерахованих методів.

Таблиця 1

Обчислювальні ресурси і перспективи практичного застосування різних підходів до моделювання турбулентних течій [27, 45]

Підхід	Необхідна кількість вузлів	Необхідна кількість кроків	Рік реалізації
Стационарний тривимірний RANS	10^7	10^3	1985
DES	10^8	10^4	2000
LES	$10^{11,5}$	$10^{6,7}$	2045
DNS	10^{16}	$10^{7,7}$	2080

У останньому стовпці таблиці наводиться час “готовності” відповідних методів до практичного використання. Під готовністю розуміється можливість розрахунку одного варіанта протягом доби на найпотужніших із доступних комп’ютерів. Зазначимо, що для RANS ці оцінки спиралися на реальний досвід їх використання. На противагу цьому прогнози для методів DES, LES і DNS базуються на припущенні про зростання продуктивності комп’ютерів у два рази кожні п’ять років. Хоча вважається, що це занадто оптимістично [5, 6, 7].

У повній відповідності до прогнозу, наведеному в табл. 1, перший розрахунок обтікання літака за допомогою методу DES був виконаний у 2000 р. [55]. Це підтверджує достовірність наведених у ній оцінок. Вважають, що принаймні впродовж найближчих десяти років, основним робочим інструментом для виконання прикладних завдань аеродинаміки, пов’язаних із розрахунком турбулентних течій, залишатимуться методи, що базуються на використанні RANS у поєднанні з різними напівемпіричними моделями турбулентності, і гібридні RANS–LES методи.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Сучасні досягнення в галузі моделювання турбулентних течій, свідчать, що трудомісткість методів прямого числового моделювання (DNS) та методу великих вихорів (LES), які могли б використовуватися для практичного використання у визначенні аеродинамічних характеристик транспортних засобів, нині надзвичайно велика. Сучасний рівень розвитку ЕОМ не дає змоги проводити їх реалізацію в практичних цілях протягом однієї доби.

Виходячи з аналізу сучасних досягнень у розробці методів розрахунку турбулентних течій упродовж найближчих десятироків, основним робочим інструментом для виконання прикладних завдань аеродинаміки, пов'язаних із розрахунком турбулентних течій, залишатимуться методи, що базуються на використанні RANS у поєднанні з різними напівемпіричними моделями турбулентності, і гібридні RANS–LES.

Таким чином, для визначення аеродинамічних характеристик перспективних транспортних засобів п'ятого покоління доцільно використовувати і гібридні RANS–LES методи.

Список використаних джерел:

1. *Гесць В. М., Волошин О. І., Дзензерський В. О., Никифорок О. І.* Розвиток економічних та науково-технічних основ транспорту п'ятого покоління ; НАН України, ДУ “Ін-т екон. та прогнозув. НАН України” ; Інститут геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України; Інститут транспортних систем і технологій НАН України. Київ, 2020. 254 с.

2. *Дзензерский В. А., Омеляненко В. И., Васильев С. В., Матин В. И. и др.* Высокоскоростной магнитный транспорт с электродинамической левитацией. Киев: Наукова думка, 2001. 480 с.

3. *Приходько А. А.* Компьютерные технологии в аэрогидродинамике и тепломассообмене. Киев: Наукова думка, 2003. 380 с.

4. *Приходько А. А., Сохацкий А. В.* Математическое и экспериментальное моделирование аэродинамики элементов транспортных систем вблизи экрана. Днепропетровск: Наука и образование, 1998. 160 с.

5. *Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Шур М. Л.* Моделирование турбулентности в расчетах сложных течений. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2012. 86 с.

6. *Гарбарук А. В., Стрелец М. Х., Травин А. К., Шур М. Л.* Современные подходы к моделированию турбулентности. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 234 с.

7. *Волков К. Н., Емельянов В. Н.* Моделирование крупных вихрей в расчетах турбулентных течений. Москва: ФИЗМАТЛИТ, 2008. 368 с.

8. *Reynolds O.* On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion. Phil. Trans. Roy. Soc., 1895. P. 123–161.

-
9. Freund J. B., Moin P., Lele S. K. Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer // Flow Physics and Computation Division. Technical Report TF-72. Stanford University, 1997.
 10. Boersma B. L., Lele S. K. Large eddy simulation of compressible turbulent jets. Center for Turbulence Research. Stanford University, 1999. P. 365–377.
 11. Spalart P. R. Philosophies and fallacies in turbulence modeling. Progress in Aerospace Sciences, 2015. № 74 (1). P. 1–15.
 12. Hanjalić K., Launder B. Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure. Cambridge University Press, 2011. 402 p.
 13. Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center. URL: <http://turbmodels.larc.nasa.gov> (page curator and responsible official C. Rumsey).
 14. ERCOFTAC QNET-CFD Knowledge Base Wiki. URL: http://www.ercoftac.org/products_and_services/wiki
 15. Haase W., Chaput E., Elsholz E., Leschziner M. A., Müller U. R. (Eds.). ECARP – European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models. Notes on Numerical Fluid Mechanics, 1997. V. 58.
 16. Haase W., Aupoix B., Bunge U., Schwaborn D. (Eds.) FLOMANIA – A European Initiative on Flow Physics Modelling, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2006. V. 94. URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/flomania>
 17. ATAAC – Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamic Application Challenges. URL: <http://cfd.mace.manchester.ac.uk/twiki/bin/view/ATAAC>
 18. Ferziger J. H. Recent Advances in Large Eddy Simulation, Engineering Turbulence Modelling and Experiments 3, W. Rodi and G. Bergeles (Eds.), 1996, Elsevier. P. 163–176.
 19. Garnier E., Adams N., Sagaut P. Large eddy simulation for compressible flows, Springer, 2009. 276 p.
 20. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, Monthly Weather Review, 1963, 91. P. 99–164.
 21. Deardorff J. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, Journal of Fluid Mechanics, 1970. 41 (2). P. 453–480.
 22. Grinstein F. F., Margolin L. G., Rider W. J. Implicit Large Eddy Simulation, Cambridge University Press, 2007. 577 p.
 23. Shur M., Strelets M., Travin A. High-Order Implicit Multi-Block Navier–Stokes Code: Ten-Years Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulent Flows, Invited lecture. 7th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology. October 5–7, 2004. Huntington Beach, USA.

-
24. *Piomelli U., Zang T., Speziale C., Hussaini M.* On the large-eddy simulation of transitional wall-bounded flows. *Physics of Fluids A*, 1990. 2. P. 257–265.
25. *Grinstein F. F., Margolin L. G., Rider W. J.* *Implicit Large Eddy Simulation*, Cambridge University Press, 2007. P. 577.
26. *Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H.* A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1991, 3 (7). P. 1760–1765.
27. *Lilly D. K.* A proposed modification of the Germano closure method, *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1992. 4 (3). Pp. 633–635
28. *Meneveau C., Katz J.* Scale-invariance and turbulence models for large eddy simulation, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2000, 32. Pp. 1–32. 24.
29. *You D., Moin P.* A dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries, *Physics of Fluids*, 2007, 19 (6), 065110.
30. *Chapman D. R.* Computational aerodynamics development and outlook, *AIAA Journal*, 1979, 17. P. 1293–1313.
31. *Piomelli U., Balaras E.* Wall-layer models for large-eddy simulations, *Annual Rev. Fluid Mech.*, 2002, 34. P. 349–374.
32. *Spalart P. R., Allmaras S. R.* A one-equation turbulence model for aerodynamic flow // *AIAA Paper*, 1992. № 0112. P. 439–478.
33. *Spalart P. R., Shur M.* On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature // *Aerospace science and technology Journal*. 1997. Vol. 1. № 5. P. 297–366.
34. *Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. Kh., Travin A. K.* Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate // *Proceedings of the 3rd ECCOMAS CFD Conference*, Paris, France, 9–13 September 1996. Chichester: John Wiley & Sons, 1996. P. 676–682.
35. *Spalart P. R., Jou W. H., Strelets M., Allmaras S. R.* Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach // *Proceedings 352 Список літератури of the 1 st AFOSR International Conference on DNS/LES*, Ruston, Louisiana, 4–8 August 1997. Louisiana Technical University, 1997. P. 137–148.
36. *Spalart P. R.* Strategies for turbulence modelling and simulations // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. V. 21. № 3. P. 252–263.
37. *Sagaut P., Deck S., Terracol M.* *Multiscale and multiresolution approaches in turbulence*, Imperial College Press, 2006. 340 p
38. *Menter F. R., Schütze J., Gritskevich M. S.* Global vs. Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling. *Hybrid RANS-LES Modelling, Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2012. 117. P. 15–28.

39. Larsson J., Kawai S., Bodart J., Bermejo-Moreno I. Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions, *Mechanical Engineering Reviews*, 2015.

40. Peng S.-H., Haase W., (Eds.) *Advances in Hybrid RANS-LES Modeling. Papers Contributed to the 2007 Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Corfu, Greece, 17–18 June 2007. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2008. V. 97.*

41. Spalart P. R., Deck S., Shur M. L., Squires K. D., Strelets M. Kh., Travin A. A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities. *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*. July, 2006. P. 181–195.

42. Peng S.-H., Doerffer P., Haase W., (Eds.) *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 3rd Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Gdansk, Poland, June 2009. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2010. V. 111.*

43. Fu S., Peng S.-H., Haase W., Schwamborn D. (Eds.) *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 4th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Beijing, China, September 2011. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2012. V. 117.*

44. Girimaji S., Peng S.-H., Haase W., Schwamborn D. (Eds.) *Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 5th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, College Station, A&M University, Texas, USA, 19–21 March 2014. Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design. 2015. V. 130.*

45. Kok J. C., Dol H. S., Oskam B., van der Ven H. Extra-large eddy simulation of massively separated flows, *AIAA Paper*, AIAA-2004-0264.

46. Batten P., Goldberg U., Chakravarthy S. Sub-grid turbulence modeling for unsteady flow with acoustic resonance, *AIAA Paper*, AIAA-2000-0473.

47. Deck S. Recent improvements in the Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES) formulation, *Theoretical and Computational Fluid Dynamics*, 2011. № 26 (6). P. 523–550.

48. Piomelli U., Balaras E. Wall-Layer Models for Large-Eddy Simulations, *Annual Review of Fluid Mechanics*, 2002. № 36 (1). P. 505–374.

49. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K., Travin A. K. A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 2008. № 29. P. 1638–1649.

50. Terzi D., Frohlich J. Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows, *Progress in Aerospace Sciences*, 2008. № 44 (5). P. 349–377.

51. Girimaji S., Sreenivasan R., Jeong E. PANS Turbulence Model for Seamless Transition Between RANS, LES: Fixed-Point Analysis and Preliminary

Results. FEDSM2003-45336, Proceedings of ASME 222 FEDSM'03 2003 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conferences, July 13–16, Honolulu, Hawaii USA, 2003.

52. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows, AIAA Paper, AIAA-1992-0439.

53. Menter F. R. Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows, AIAA-Paper, AIAA-1993-2906.

54. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model, Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (ed.: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers), 2003. P. 625–632.

55. Forsythe J., Squires K., Wurtzler K., Spalart P. Detached-eddy simulation of fighter aircraft at high alpha, AIAA Paper, AIAA-2002-0591.

References:

1. Rozvytok ekonomichnykh ta naukovo-tekhnichnykh osnov transportu p'iatoho pokolinnia / Heiets V. M., Voloshyn O. I., Dzenzerskyi V. O., Nykyforuk O.I. ; NAN Ukrainy, DU "In-t ekon. ta prohnozuv. NAN Ukrainy" ; Instytut heotekhnichnoi mekhaniky im. M.S. Poliakova NAN Ukrainy ; Instytut transportnykh system i tekhnolohii NAN Ukrainy. Elektron. resurs. K., 2020. 254 s.

2. Vysokoskorostnoy magnitnyiy transport s elektrodinamicheskoy levitatsiyei / Dzenzerskiy V. A., Omelyanenko V. I., Vasilev S. V., Matin V. I. i dr. Kyiv : Naukova dumka, 2001. – 480 s.

3. Prihodko, A. A. Kompyuternyye tehnologii v aerogidrodinamike i teplo mas-soobmene / Prihodko A. A. K.: Naukova dumka, 2003. 380s.

4. Prihodko A.A. Matematicheskoe i eksperimentalnoe modeli-rovanie aerodinamiki elementov transportnykh sistem vblizi ekrana / A. A. Prihodko, A. V. Sokhatskiy. Dnepropetrovsk : Nauka i obrazovanie, 1998. 160 s.

5. Garbaruk A. V., Strelets M. H., Shur M. L. Modelirovanie turbulentnosti v raschetah slozhnykh techeniy. SPb, Izd-vo Politehn. un-ta, 2012. 86 s

6. Garbaruk A. V., Strelets M. H., Travin A. K., Shur M. L. Sovremennyye podhody k modelirovaniyu turbulentnosti. SPb, Izd-vo Politehn. un-ta, 2016. 234 s.

7. Volkov K. N., Emelyanov V. N. Modelirovanie krupnykh vihrey v raschetah turbulentnykh techeniy. M. : FIZMATLIT, 2008. 368 s.

8. Reynolds O. On the Dynamical Theory of Incompressible Viscous Fluids and the Determination of the Criterion, Phil. Trans. Roy. Soc., 1895. P. 123–161.

9. Freund J. B., Moin P., Lele S. K. Compressibility effects in a turbulent annular mixing layer // Flow Physics and Computation Division. Technical Report TF-72. Stanford University, 1997.

10. Boersta B. I., Lele S. K. Large eddy simulation of compressible turbulent jets. Center for Turbulence Research. Stanford University, 1999. P. 365–377.

11. Spalart P. R. Philosophies and fallacies in turbulence modeling, Progress in Aerospace Sciences, 2015, 74(1), 1–15

-
12. Hanjalić K., Launder B. Modelling Turbulence in Engineering and the Environment: Second-Moment Routes to Closure, Cambridge University Press, 2011. 402 p.
 13. Turbulence modeling Resource. NASA Langley Research Center. URL: <http://turbmodels.larc.nasa.gov> (page curator and responsible official C. Rumsey). <https://turbmodels.larc.nasa.gov/>
 14. ERCOFTAC QNET-CFD Knowledge Base Wiki, http://www.ercoftac.org/products_and_services/wiki/ 8. Haase W., Chaput E., Elsholz E., Leschziner M. A., Müller U. R. (Eds.). "ECARP - European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models", Notes on Numerical Fluid Mechanics, 1997, v. 58.
 15. Haase W., Chaput E., Elsholz E., Leschziner M. A., Müller U. R. (Eds.). "ECARP – European Computational Aerodynamics Research Project: Validation of CFD Codes and Assessment of Turbulence Models", Notes on Numerical Fluid Mechanics, 1997, v. 58
 16. Haase W., Aupoix B., Bunge U., Schwamborn D. (Eds.) "FLOMANIA – A European Initiative on Flow Physics Modelling", Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, 2006, v. 94 (<http://cfm.mace.manchester.ac.uk/flomania/>).
 17. "ATAAC - Advanced Turbulence Simulation for Aerodynamic Application Challenges". <http://cfm.mace.manchester.ac.uk/twiki/bin/view/ATAAC>.
 18. Ferziger J. H. "Recent Advances in Large Eddy Simulation", Engineering Turbulence Modelling and Experiments 3, W. Rodi and G. Bergeles (Eds.), 1996, Elsevier, pp. 163–176.
 19. Garnier E., Adams N., Sagaut P. Large eddy simulation for compressible flows, Springer, 2009. 276 p.
 20. Smagorinsky J. General circulation experiments with the primitive equations. I. The basic experiment, Monthly Weather Review, 1963, 91, pp. 99–164.
 21. Deardorff. J. A numerical study of three-dimensional turbulent channel flow at large Reynolds numbers, Journal of Fluid Mechanics, 1970, 41(2), pp. 453–480.
 22. Grinstein F. F., Margolin L. G., Rider W. J. Implicit Large Eddy Simulation, Cambridge University Press, 2007. 577 p.
 23. Shur M., Strelets M., Travin A. High-Order Implicit Multi-Block Navier-Stokes Code: Ten-Years Experience of Application to RANS/DES/LES/DNS of Turbulent Flows, Invited lecture. 7th Symposium on Overset Composite Grids and Solution Technology, October 5–7, 2004, Huntington Beach, USA.
 24. Piomelli U., Zang T., Speziale C., Hussaini M. On the large-eddy simulation of transitional wall-bounded flows, Physics of Fluids A, 1990, 2, pp. 257–265.
 25. Grinstein F. F., Margolin L. G., Rider W. J. "Implicit Large Eddy Simulation", Cambridge University Press, 2007. – 577 p.
 26. Germano M., Piomelli U., Moin P., Cabot W. H. "A dynamic subgrid-scale eddy viscosity model", Physics of Fluids A: Fluid Dynamics, 1991, 3(7), pp. 1760–1765

-
27. Lilly D. K. "A proposed modification of the Germano closure method", *Physics of Fluids A: Fluid Dynamics*, 1992, 4(3), pp. 633–635
28. Meneveau C., Katz J. "Scale-invariance and turbulence models for large eddy simulation", *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 2000, 32, pp. 1–32. 24.
29. You D., Moin P. "A dynamic global-coefficient subgrid-scale eddy-viscosity model for large-eddy simulation in complex geometries", *Physics of Fluids*, 2007, 19(6), 065110.
30. Chapman D. R. "Computational aerodynamics development and outlook", *AIAA Journal*, 1979, 17, pp. 1293-1313. 26. Piomelli U., Balaras E. "Wall-layer models for large-eddy simulations", *Annual Rev. Fluid Mech.*, 2002, 34, pp. 349-374.
31. Piomelli U., Balaras E. "Wall-layer models for large-eddy simulations", *Annual Rev. Fluid Mech.*, 2002, 34, pp. 349-374.
32. Spalart, P.R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flow [Text] / P.R. Spalart, S.R. Allmaras // *AIAA Paper*. – 1992. – № 0112. – P. 439 – 478.
33. Spalart, P. R., On the sensitization of turbulence models to rotation and curvature [Text] / P.R. Spalart, M. Shur // *Aerospace science and technology Journal*. – 1997. – Vol. 1, No 5. – P. 297–366.
34. Шур М. Л. , Spalart P. R. , Strelets M. Kh., Travin A. K. Navier-Stokes simulation of shedding turbulent flow past a circular cylinder and a cylinder with a backward splitter plate // *Proceedings of the 3rd ECCOMAS CFD Conference, Paris, France, 9- 13 September 1996. - Chichester: John Wiley & Sons, 1996. - P. 676-682.*
35. Spalart P. R. , Joy W. H. , Strelets M. , Allmaras S. R. Comments on the feasibility of LES for wings, and on a hybrid RANS/LES approach // *Proceedings 352 Список літератури of the 1 st AFOSR International Conference on DNS/LES, Ruston, Louisiana, 4-8 August 1 997. - Louisiana Technical University, 1997. - P. 137- 148.*
36. Spalart P. R. Strategies for turbulence modelling and simulations // *International Journal of Heat and Fluid Flow*. 2000. V. 21, No. 3. P. 252-263.
37. Sagaut P., Deck S., Terracol M. "Multiscale and multiresolution approaches in turbulence", *Imperial College Press*, 2006. – 340 p
38. Menter F. R., Schütze J., Gritskevich M. S. "Global vs. Zonal Approaches in Hybrid RANS-LES Turbulence Modelling. Hybrid RANS-LES Modelling", *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, 2012, 117, pp. 15–28.
39. Larsson J., Kawai S., Bodart J., Bermejo-Moreno I. "Large eddy simulation with modeled wall-stress: recent progress and future directions", *Mechanical Engineering Reviews*, 2015, 00418.
40. Peng S.-H., Haase W., (Eds.) "Advances in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 2007 Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Corfu, Greece, 17–18 June 2007". *Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design*, v. 97, 2008.
41. P. R. Spalart ·S. Deck ·M. L. Shur ·K. D. Squires, M. Kh. Strelets, A. Travin "A new version of detached-eddy simulation, resistant to ambiguous grid densities". *Theoretical and Computational Fluid Dynamics* · July 2006- pp 181-195/

-
42. Peng S.-H., Doerffer P., Haase W., (Eds.) "Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 3rd Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Gdansk, Poland, June 2009". Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, v. 111, 2010.
43. Fu S., Peng S.-H., Haase W., Schwaborn D. (Eds.) "Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 4th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, Beijing, China, September 2011". Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, v. 117, 2012.
44. Girimaji S., Peng S.-H., Haase W., Schwaborn D. (Eds.) "Progress in Hybrid RANS-LES Modelling. Papers Contributed to the 5th Symposium on Hybrid RANS-LES Methods, College Station, A&M University, Texas, USA, 19-21 March 2014". Notes on Numerical Fluid Mechanics and Multidisciplinary Design, v. 130, 2015.
45. Kok J. C., Dol H. S., Oskam B., van der Ven H. "Extra-large eddy simulation of massively separated flows", AIAA Paper, AIAA-2004-0264
46. Batten P., Goldberg U., Chakravarthy S. "Sub-grid turbulence modeling for unsteady flow with acoustic resonance", AIAA Paper, AIAA-2000-0473.
47. Deck S. "Recent improvements in the Zonal Detached Eddy Simulation (ZDES) formulation", Theoretical and Computational Fluid Dynamics, 2011, 26(6), pp. 523–550.
48. Piomelli U., Balaras E. "Wall-Layer Models for Large-Eddy Simulations", Annual Review of Fluid Mechanics, 2002, 36(1), pp. 505–374.
49. Shur M. L., Spalart P. R., Strelets M. K., Travin A. K. "A hybrid RANS-LES approach with delayed-DES and wall-modeled LES capabilities", International Journal of Heat and Fluid Flow, 2008, 29, pp. 1638-1649.
50. Terzi D., Frohlich J. "Hybrid LES/RANS methods for the simulation of turbulent flows", Progress in Aerospace Sciences, 2008, 44(5), pp. 349–377
51. Girimaji S., Sreenivasan R., Jeong E., "PANS Turbulence Model for Seamless Transition Between RANS, LES: Fixed-Point Analysis and Preliminary Results." FEDSM2003-45336, Proceedings of ASME 222 FEDSM'03 2003 4th ASME-JSME Joint Fluids Engineering Conferences, July 13-16, Honolulu, Hawaii USA, 2003.
52. Spalart P. R., Allmaras S. R. "A one-equation turbulence model for aerodynamic flows", AIAA Paper, AIAA-1992-0439.
53. Menter F. R. "Zonal two-equation $k-\omega$ turbulence models for aerodynamic flows", AIAA-Paper, AIAA-1993-2906.
54. Menter F. R., Kuntz M., Langtry R. "Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model", Turbulence, Heat and Mass Transfer 4 (ed: K. Hanjalic, Y. Nagano, M. Tummers), 2003, pp. 625 - 632
55. Forsythe J., Squires K., Wurtzler K., Spalart P. "Detached-eddy simulation of fighter aircraft at high alpha", AIAA Paper, AIAA -2002-0591

Леснікова І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів
Халіпова Н. В., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів
Сазонець О. М., доктор економічних наук, професор, професор кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики Університету митної справи та фінансів
Рудянова Т. М., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів

ОПТИМІЗАЦІЯ МАРШРУТІВ ВАНТАЖНИХ АВТОМОБІЛЬНИХ ПЕРЕВЕЗЕНЬ НА ОСНОВІ МОДИФІКОВАНОГО МУРАШИНОГО АЛГОРИТМУ

Присвячено виконанню складних комплексних завдань оптимізації вантажних перевезень, тобто пошуку і визначенню найбільш відповідного рішення для оптимізації (знаходження мінімуму або максимуму) цільової функції (ціни, точності, часу, відстані тощо) з дискретної множини можливих рішень. У статті обґрунтовано напрями модифікації мурашиного алгоритму, сформовано алгоритм маршрутизації виконання перевізного процесу на основі дослідження стану та визначення теоретичної пропускної спроможності окремих ділянок на проєктованих маршрутах. Проаналізовано ефективність класичного та модифікованого алгоритмів на прикладі проєктування оптимальних маршрутів від пункту відправлення до пункту призначення і для віднаходження максимального маршруту по фрахту.

Ключові слова: *оптимізації вантажних перевезень; модифікація мурашиного алгоритму.*

© І. Ю. Леснікова, Н. В. Халіпова, О. М. Сазонець, Т. М. Рудянова, 2021

The article is devoted to solving complex problems of optimization of freight transportation, namely search and determination of the most suitable solution for optimizing (finding a minimum or maximum) the target function (price, accuracy, time, distance, etc.) from a discrete set of possible solutions. The article substantiates the direction of modification of the ant algorithm, an algorithm for routing the implementation of the transport process is formed on the basis of the study of the state and determination of the theoretical throughput of individual sites on the projected routes. As well as an analysis of the effectiveness of classical and modified algorithms on the example of designing optimal routes from the point of departure to the destination and to find the maximum freight route.

Among the modern methods for solving the problem of a salesman, an ant algorithm is chosen, since its physical basis – the behavior of ants when searching for food – is the closest to formulating this problem, which determines the optimal route for transportation and its profitability for the company.

A mathematical model was constructed, an algorithm was proposed and a flowchart was developed to determine the optimal transportation route based on a modified ant algorithm.

A program was developed in the Delphi environment to determine the optimal route by the minimum distance criterion based on the proposed algorithm of the salesman problem. The task of determining the shortest route, which includes regional centers of Ukraine, is connected and a graph of this route is constructed. The optimal route was developed: Kyiv – Zhytomyr – Lutsk – Chernivtsi – Uzhgorod – Lviv – Ivano-Frankivsk – Khmelnytsky – Cherkasy – Zaporizhzhia – Kharkiv – Chernihiv – Nikolaev – Kirovograd – Dnipro – Poltava – Sumy – Vinnytsia – Ternopil – Rivne – Kherson – Odessa – Kyiv, with a total distance of 7,930 km and a freight of 190,710 UAH.

A program has been developed in the Delphi environment to determine the optimal route according to the maximum freight criterion of the carrier based on the proposed algorithm of the salesman problem. This task is connected for a network of 22 cities – regional centers of Ukraine, and a graph of the received route was constructed. The optimal route was developed: Kyiv – Mykolaiv – Chernivtsi – Zhytomyr – Khmelnytsky – Dnipro – Lutsk – Kirovohrad – Rivne – Kherson – Sumy – Ternopil – Chernihiv – Vinnytsia – Poltava – Odesa – Lviv – Kharkiv – Uzhgorod – Zaporizhzhia – Ivano-Frankivsk – Cherkasy – Kyiv, with a total freight for the carrier of UAH 357,800 and a distance of UAH 16,170 km.

Justification of optimal routes is quite an important task for the effective operation of logistics companies, since freight transportation is extremely important for the economy of the country and the company and is relevant in the present.

According to the results of calculations, technical solutions have been developed to improve the efficiency of the logistics company on the basis of a modified ant algorithm.

Key words: freight optimization; modification of the ant algorithm.

Постановка проблеми. Найпоширенішими проблемами сьогодення виступають економічна криза та військова агресія сусідньої держави, що суттєво позначилося на обсягах перевезень вантажів Україною, а знецінення національної валюти і стрімке зростання цін на паливо поставило під сумнів можливість отримання прибутків підприємств-перевізників та їх доцільність перебування на ринку транспортних послуг. За таких умов порушено питання ретроспективного аналізу ситуації на ринку транспортних послуг з окресленням наявних та прогнозу майбутніх тенденцій. Утім передбачається збереження тенденції останнього часу щодо збільшення частки надання логістичних послуг, незважаючи на дані перешкоди.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Актуальність потокових завдань полягає в тому, що економічний розвиток будь-якої країни обумовлений наявністю мережі доріг. Транспортна структура, що має тенденцію до розширення, призводить до перевантаженості мережі доріг, аварійних ситуацій у результаті заторів.

Нині задачі маршрутизації є ключовими у сфері логістики. Існує велика кількість методів розв'язування задач дискретного типу з метою оптимізації логістичних процесів, проте вони не дають чіткого розв'язання наявних проблем.

Проблемам транспортної логістики присвячено праці багатьох як українських, так і зарубіжних учених [1–4]. Автори детально аналізують проблеми організації та здійснення процесу перевезень вантажів з погляду сучасної логістики. Значна увага приділяється перевезенню у межах міста як вантажів, так і пасажирів. Так, у праці [5] досліджено питання щодо організації та функціонування мережі міста, зокрема розглянуто проблему заторів та шляхів її подолання.

Задача проектування маршрутів транспортних засобів під час перевезення вантажів належить до класу задач просторово-часового синтезу та є однією з найскладніших для розв'язання.

Ураховуючи це, транспортні задачі є досить актуальним питанням у формуванні оптимальної логістичної системи доставки вантажів в умовах міст.

Різноманітність критеріїв та обмежень у застосуванні транспортної задачі до різних практичних сфер використання призвели до появи великої кількості задач, які відображали процес розвезення вантажу. Проте науковою проблемою під час транспортування вантажів є відсутність діючих моделей чи методик оптимізації перевезень, які б ураховували обмеження пропускної спроможності доріг [7]. Під час розгляду транспортних задач пропонується оцінювати перевезення як цілісну систему, а не проводити ранжування за критеріями [6].

Удосконалення методів на основі класичного мурашиного алгоритму,

модифікація самого алгоритму дасть змогу отримувати точніші розв'язки багатокomпонентних задач у різних сферах виробничої діяльності. Але ж у розробці раціональних автомобільних маршрутів вантажних перевезень недостатньо уваги приділено врахуванню якісної характеристики доріг. Врахування стану ділянок доріг та їх пропускної спроможності необхідне для визначення логістичного маршруту, щоб уникнути руху ділянками з ускладненим або частково неможливим проїздом [8].

Мета статті – виконання складних комплексних завдань оптимізації вантажних перевезень: пошук і визначення найбільш відповідного рішення для оптимізації (знаходження мінімуму або максимуму) цільової функції (ціни, точності, часу, відстані тощо) з дискретної множини можливих рішень.

Алгоритм оптимізації мурашиної колонії може бути успішно застосовано для виконання складних комплексних завдань оптимізації. Тому в даній статті розглядатиметься задача про призначення на основі модифікованого мурашиного алгоритму (МА). Отже, результатом пошуку оптимального розв'язку задачі про призначення стало використання природних поведінкових явищ, а саме: поведінки мурашиної колонії.

Для цього в статті виконано такі завдання:

- обґрунтування напрямів модифікації мурашиного алгоритму;
- формування алгоритму маршрутизації виконання перевізного процесу на основі дослідження стану та визначення теоретичної пропускної спроможності окремих ділянок на проєктованих маршрутах;
- порівняння ефективності класичного та модифікованого алгоритмів на прикладі проєктування оптимальних маршрутів від пункту відправлення до пункту призначення і для віднаходження максимального маршруту по фрахту перевізника.

Виклад основного матеріалу. Сучасні методи розв'язування задач, що ґрунтуються на класичному алгоритмі мурашиної колонії, досить конкурентоздатні порівняно з іншими евристичними методами, а для деяких задач демонструють навіть кращі результати розв'язку [10–14]. Розв'язання задачі транспортування на основі алгоритму мурашиних колоній для мультимодального перевезення та розширеної задачі комівояжера наведено відповідно в [10, 11].

Загальний алгоритм розв'язку таких задач досить простий: по-перше, звести задачу до задачі пошуку найкоротшого шляху на деякому графі; по-друге, визначити механізми оновлення феромону. Вплив на оновлення феромону можна задати багатьма факторами, наприклад: собівартість перевезення, довжина маршруту чи ціна пройденого маршруту тощо. І третій крок – визначити евристичні правила вибору маршруту. В статті особливістю вибору шляху транспортування є те, що враховано коефіцієнт стану дороги,

вплив якого покращує пошук оптимального маршруту. Якість отриманих результатів насамперед залежить від вибору і налаштування параметрів під час визначення ймовірності переходу в той чи інший пункт за допомогою ймовірнісно-пропорційного правила на основі відкладеної кількості феромонів. При цьому не слід забувати про вагомий вплив параметра випаровування феромону з кожною ітерацією.

Перехід мурахи з міста i в місто j на ітерації t алгоритму залежить від трьох складових: табу-списка, видимості та віртуального сліду феромону.

Табу-список – це перелік міст, які вже відвідані мурахою і заходять в які ще раз заборонено. Табу-список збільшується зі здійсненням маршруту та заповнюється нулями на початку кожної ітерації алгоритму. Позначимо через J^k список міст, які ще потрібно відвідати мураці k , що перебуває у місті i . Зрозуміло, що об'єднання цих списків дає множину всіх міст з маршруту комівояжера.

Видимість – це величина обернена до відстані:

$$n_{ij} = 1/D_{ij},$$

де D_{ij} – відстань між містами i та j .

Видимість базується тільки на локальній інформації та являє собою “евристичну бажаність” вибору міста j під час перебування у місті i . Чим ближче міста i та j , тим більше бажання відвідати їх.

Віртуальний слід феромону на ребрі (i, j) являє собою “бажаність, підкріплену досвідом” переходу в місто i з міста j . Інформація, яку несе слід феромону, змінюється під час оптимізації та відображає набутий мурахами досвід. Кількість віртуального феромону на ребрі $(i-j)$ на t -й ітерації алгоритму позначимо як $\tau_{ij}(t)$.

Показник імовірності того, що мураха обере певний перший пункт на своєму маршруті, розраховується за допомогою ймовірнісно-пропорційного правила, що виражається такою формулою:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} [\tau_{il}(t)]^\alpha [\mu_{il}(t)]^\beta} \cdot 100\%, J \in J_{i,k}, \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad (1)$$

де α, β – параметри, що задають ваги сліду феромону та видимості; при $\alpha = 0$ спрацьовує жадібний алгоритм, тобто мураха рухається щоразу до найближчого пункту, ігноруючи досвід попередників;

при $\beta = 0$ мураха керується лише досвідом попередників, повністю ігноруючи відстань між пунктами на маршруті. Обидві умови є досить “суворими” і виключають коректну роботу алгоритму та повноцінний пошук оптимального маршруту. Виходячи з цього, за умови прийняття одного з параметрів α чи β рівними нулю, сенсу в алгоритмі мурашиних колоній немає.

Формула (1) є класичним варіантом формули МА для визначення ймовірності переходу. Для врахування стану доріг на кожній ділянці дороги між пунктами пропонуємо вдосконалити формулу (1) шляхом введення нового коефіцієнта ε_{ij} :

$$\varepsilon_{ij} = \omega_{ij} \cdot Pp_{ij}, \quad (2)$$

де ω_{ij} – стан ділянки дороги, який оцінюється від 0,5 до 1 з кроком 0,25. Значення показника 0,5 показує, що стан незадовільний; 0,75 – частково задовільний, є вибоїни/бугри; 1 – дорожнє покриття у задовільному стані;

Pp_{ij} – пропускна спроможність ділянки маршруту, авто/год.

У табл. 1 подано оцінки пропускної здатності ділянки доріг, отримані за результатами аналізу даних про частки транспортних засобів у потоці [15].

Таблиця 1

Пропускна спроможність доріг

№ з/п	Pp_{ij} , авто/год	Коефіцієнт
1	0–300	0,15
2	300–600	0,3
3	600–900	0,45
4	900–1200	0,6
5	1200–1500	0,75
6	1500 і більше	1

Тоді формула (1) набуває вигляду:

$$\begin{cases} P_{ij,k}(t) = \frac{\varepsilon_{ij}(t) [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{l \in J_{i,k}} \varepsilon_{ij}(t) [\tau_{ij}(t)]^\alpha [\mu_{ij}(t)]^\beta} \cdot 100\%, J \in J_{i,k} \\ P_{ij,k}(t) = 0, j \notin J_{i,k} \end{cases} \quad (3)$$

Під час роботи алгоритму, керуючись основними показниками, ймовірно-пропорційне правило не змінюється, проте у кожної мурахи ймовірність прямування кожним пунктом буде різна.

Далі необхідно визначити, яка кількість феромону відкладатиметься мурахою після проходження кожного ребра на маршруті. Класична формула, що визначає кількість феромону після кожної ітерації має вигляд:

$$\Delta \tau_{ij,k}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L_k(t)}, & \text{якщо } (i, j) \in T_k(t) \\ 0, & \text{якщо } (i, j) \notin T_k(t) \end{cases}, \quad (4)$$

де $T_k(t)$ – маршрут, що пройдений мурахою k на ітерації t ;

$L_k(t)$ – довжина цього маршруту;

Q – регульований параметр, значення якого обирається одного порядку з довжиною оптимального маршруту.

Проте, як зазначено вище, якщо феромон не буде випаровуватись, то ймовірне існування хибного маршруту. Водночас необхідно забезпечити, щоб у разі “незадоволення” маршрутом мурахи обирали новий, а значення феромону на маршруті мало б випаровуватись, щоб колонії мурах “забували” даний шлях. Параметр випаровування феромону позначається через ρ . При цьому діапазон значень ρ перебуває у межах $(0;1)$. Тоді правило оновлення феромону набуває вигляду:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1-\rho) \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t), \quad (5)$$

де $\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij,k}(t)$;

m – кількість мурах у колонії.

Щодо параметра ρ слід зазначити:

1. Якщо $\rho = 0$, тоді колонія враховуватиме всі маршрути, в тому числі зовсім неефективні. За такого варіанта досягти оптимального маршруту буде дуже складно.

2. Якщо $\rho = 1$, то в такому випадку мураха пам’ятає досвід тільки свого попередника, а досвід інших мурах повністю ігнорується. Знову ж таки існує велика ймовірність того, що мурахи йтимуть заздалегідь хибним шляхом.

Таким чином, ураховуючи всі критерії, економіко-математична модель виглядатиме так:

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n L_{ij} \rightarrow \min$$

$$\begin{cases} 0,5 \leq \omega_{ij} \leq 1 \\ 0,5 \leq \alpha \leq 1 \\ 0,5 \leq \beta \leq 1 \\ 0 \leq \rho \leq 1 \\ 400 \leq Q \leq 500 \\ 0,15 \leq Pp_{ij} \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

На початку розрахунку кількість феромону приймається рівною невеликому додатному числу τ_0 . Загальна кількість мурах залишається незмінною протягом виконання всього алгоритму. Необхідно також зазначити, що треба обирати достатню (багаточисленну) кількість мурах. Адже коли мурах досить мало, наприклад до 10 штук, то виникає небезпека, що буде втрачена сукупність пошуку через швидке випаровування феромону.

Після завершення маршруту кожна мураха k відкладає на ребро $(i-j)$ таку кількість феромону:

$$\Delta\tau_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L^k(t)}, & \text{якщо } (i,j) \in T^k(t) \\ 0, & \text{якщо } (i,j) \notin T^k(t) \end{cases} \quad (7)$$

де $T^k(t)$ – маршрут, зроблений мурахою k на ітерації t ;

$L^k(t)$ – довжина цього маршруту;

Q – регульований параметр, значення якого обирають одного порядку з довжиною оптимального маршруту.

Для забезпечення можливості експлуатації простору рішень потрібно забезпечити випаровування феромону – зменшення кількості відкладеного на попередніх ітераціях феромону. Інтенсивність випаровування феромону задається за допомогою коефіцієнта випаровування $\rho \in [0, 1]$. Кінцеве правило оновлення феромону, яке стосується всіх ребер, набуває такого вигляду:

$$\tau_{ij}(t+1) \leftarrow (1-p)\tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij}(t), \quad (8)$$

$$\text{де } \Delta\tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k(t);$$

m – кількість мурах у колонії.

На початку оптимізації кількість феромону на ребрах приймається за малу додатну константу τ_0 . Загальна кількість мурах у колонії приймається

постійною на весь час розв'язання задачі. Забагато мурах призводить до швидкого підсилення субоптимальних маршрутів. Коли ж мурах замало, виникає небезпека втрати кооперативної поведінки через швидке випаровування феромону. Зазвичай кількість мурах приймають рівною кількості міст – кожна мураха починає маршрут з окремого міста [16].

Модифікація даного алгоритму буде виражена у його мінливості впродовж усього маршруту. Тобто врахуємо рельєфність місцевості, виїзні та невиїзні регіони, сезонність, тарифи замовників та подачу транспорту. Для цього розробимо граф на основі карти України з регіонами та вартостями поїздок.

Керуючись алгоритмом розв'язування задачі, можна застосувати алгоритм мурашиних колоній у реальних умовах.

Довжину ділянок доріг України між обласними центрами з урахуванням якості доріг та об'їзних маршрутів зображено на рис. 1.

	Київ	Чернігів	Суми	Полтава	Харків	Дніпро	Запоріжжя	Херсон	Миколаїв	Одеса	Кіровоград	Черкаси	Житомир	Хмельницький	Вінниця	Рівне	Луцьк	Чернівці	Івано-Франківськ	Тернопіль	Львів	Ужгород
Київ	-	150	340	345	500	480	560	480	480	320	200	140	330	270	330	400	530	670	490	540	820	
Чернігів	150	-	320	410	510	540	620	690	620	610	430	300	280	470	410	470	550	680	820	630	700	950
Суми	340	320	-	220	200	360	450	800	870	1000	430	330	480	660	610	660	740	870	1010	820	880	1150
Полтава	345	410	220	-	150	200	270	620	700	830	250	240	480	660	610	660	740	870	1010	830	880	1150
Харків	500	510	200	150	-	220	300	640	720	850	390	380	620	800	750	805	880	1010	1150	960	1020	1300
Дніпро	480	540	360	200	220	-	90	450	520	650	250	300	620	700	570	805	880	890	1150	970	1020	1300
Запоріжжя	560	620	450	270	300	90	-	360	430	560	310	350	700	760	640	890	960	850	1230	1050	1100	1370
Херсон	560	690	800	620	640	450	360	-	80	210	250	380	580	630	500	780	850	810	870	740	870	1140
Миколаїв	480	620	870	700	720	520	430	80	-	130	180	320	510	560	430	710	780	750	800	670	800	1070
Одеса	480	610	1000	830	850	650	560	210	130	-	320	450	500	550	430	700	770	740	800	660	790	1060
Кіровоград	320	430	430	250	390	250	310	250	180	320	-	130	400	450	320	600	670	635	700	560	700	920
Черкаси	200	300	330	240	380	300	350	380	320	450	130	-	330	510	360	520	590	640	700	560	730	1000
Житомир	140	280	480	480	620	620	700	580	510	500	400	330	-	230	130	190	280	370	430	350	400	670
Хмельницький	330	470	660	660	800	760	760	630	560	550	450	510	230	-	120	210	260	200	230	110	240	500
Вінниця	270	410	610	610	750	570	640	500	430	430	320	360	130	120	-	320	390	340	370	240	360	590
Рівне	330	470	660	660	805	805	890	780	710	700	600	520	190	210	320	-	80	330	300	160	210	480
Луцьк	400	550	740	740	880	880	960	850	780	770	670	590	280	260	390	80	-	340	270	170	150	420
Чернівці	820	960	870	870	890	890	850	810	750	740	635	640	370	200	340	330	340	-	140	170	270	430
Івано-Франківськ	670	820	1010	1010	1150	1150	1230	870	800	800	700	700	430	230	370	300	270	140	-	140	140	300
Тернопіль	490	630	820	830	970	970	1050	740	670	660	560	560	350	110	240	160	170	170	140	-	130	390
Львів	540	700	880	880	1020	1020	1100	870	800	790	700	730	400	240	360	210	150	270	140	130	-	270
Ужгород	820	950	1150	1150	1300	1300	1370	1070	1070	1060	920	1000	670	500	590	480	420	430	300	390	270	-

Рис. 1. Відстані між обласними центрами України, крім Донецька, Луганська та АР Крим (км)

Алгоритм математичної моделі побудовано з урахуванням стану дорожнього покриття, переїзду транспортного засобу на завантаження, про-

стоїв, відстані перевезення, фрахту перевізника. Типом вантажу (окрім сипучих, їх виключено), режимом перевезення (приймаємо, що наразі літній період), кількістю вантажу (вважатимемо, що вантаж займає увесь кузов, 20 т, 86 м³) нехтуємо.

Алгоритм розв'язування практичної задачі на основі МА:

1. Визначаємо вид продукції, яка перевозитиметься відповідно від пункту відправлення до пункту призначення й у зворотному напрямку, якщо він є.
2. У транспортному засобі (ТЗ), яким буде транспортуватись продукція, перевіряємо за критерієм забрудненості кузова, чи можна після перевезення у прямому напрямі у той самий автомобіль завантажити інший товар.
3. Складаємо за допомогою карти всі можливі маршрути доставки як у прямому, так і у зворотному напрямку, якщо він є.
4. Фіксуємо відстань L_{ij} між кожною парою пунктів. Визначаємо точку відправлення у прямому та зворотному напрямках. Визначаємо можливий переїзд у точку відправлення чи подачу ТЗ.
5. Визначаємо пропускну спроможність кожної ділянки дороги.
6. За формулою (2) визначаємо коефіцієнт, значення якого залежить від безпосереднього стану доріг та пропускну здатності.
7. Задаємо рівень феромонів τ_{ij} на кожному ребрі. Даний показник є малим додатним значенням для того, щоб імовірність переходу на наступний пункт не була нульовою. Дана умова обумовлена формулою (3).
8. За формулою (3) визначаємо ймовірність P_{ij} переходу k -ї мурахи в наступний пункт на маршруті, задаємо показники α та β .
9. Визначаємо вартість найкращого шляху, вартість поточного шляху і вартість найгіршого шляху. Задаємо параметр випарювання феромону ρ .
10. Оновлюємо феромони за формулою (5) після кожної ітерації.
11. Переходимо до наступного транспортного засобу і знову переходимо до пункту 8.
12. Після прогону всіх транспортних засобів визначаємо найкращий маршрут, його довжину та вартість.

На основі алгоритму побудуємо блок-схему (рис. 2).

Код програми для розрахунку задачі комівояжера мовою програмування Delphi наведено у додатку. Використовуємо дані про відстані між пунктами транспортної мережі (рис. 1), щоб сформувати матрицю для розрахунків у середовищі Delphi (рис. 3). Пункти мережі (з 1 до 22) відповідають обласним центрам, а саме: 1 – Київ; 2 – Чернігів; 3 – Суми; 4 – Полтава; 5 – Харків; 6 – Дніпро; 7 – Запоріжжя; 8 – Херсон; 9 – Миколаїв; 10 – Одеса; 11 – Кіровоград; 12 – Черкаси; 13 – Житомир; 14 – Хмельницький; 15 – Вінниця; 16 – Рівне; 17 – Луцьк; 18 – Чернівці; 19 – Івано-Франківськ; 20 – Тернопіль; 21 – Львів; 22 – Ужгород.

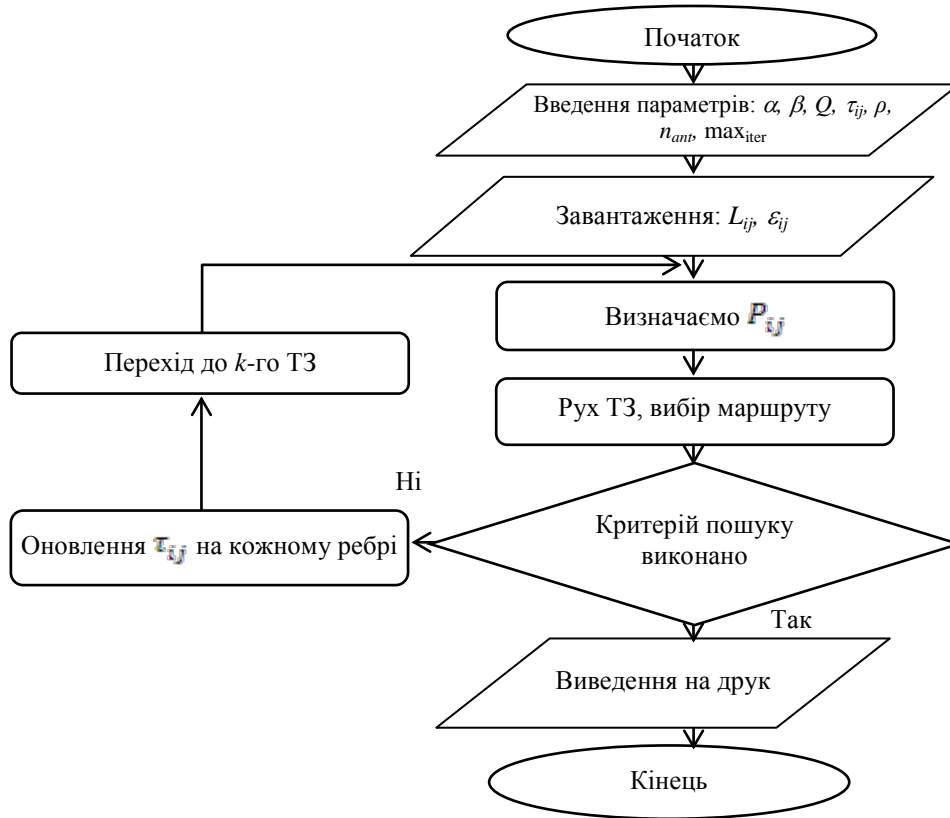


Рис. 2. Блок-схема розв'язку задачі на основі алгоритму мурашиних колоній

Після ітерацій програма показує результат (рис. 4), що прокладає мінімальний за відстанню маршрут.

Оптимальний маршрут за критерієм мінімальної відстані послідовно включає пункти $1 \rightarrow 13 \rightarrow 17 \rightarrow 18 \rightarrow 22 \rightarrow 21 \rightarrow 19 \rightarrow 14 \rightarrow 12 \rightarrow 7 \rightarrow 5 \rightarrow 2 \rightarrow 9 \rightarrow 11 \rightarrow 6 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 15 \rightarrow 20 \rightarrow 16 \rightarrow 8 \rightarrow 10 \rightarrow 1$.

Додаємо останнім пунктом точку 1, оскільки авто має повернутись у початок. Також до загальної мінімальної відстані треба додати відстань повернення з пункту 10 у пункт 1.

Отже, ТЗ треба проїхати маршрутом “Київ – Житомир – Луцьк – Чернівці – Ужгород – Львів – Івано-Франківськ – Хмельницький – Черкаси – Запоріжжя – Харків – Чернігів – Миколаїв – Кіровоград – Дніпро – Полтава – Суми – Вінниця – Тернопіль – Рівне – Херсон – Одеса – Київ” із загальною відстанню 7930 км (7450 + 480), що є найменшою відстанню. Маршрут відображено на карті (рис. 5).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	.	150	340	345	500	480	560	480	480	320	200	140	330	270	330	400	530	670	490	540	820	
2	150	.	320	410	510	540	620	690	620	610	430	300	280	470	410	550	680	820	630	700	950	
3	340	320	.	220	200	360	450	800	870	1000	430	330	480	660	610	740	870	1010	820	880	1050	
4	345	410	220	.	150	200	270	620	700	830	250	240	480	660	610	740	870	1010	830	880	1050	
5	500	510	200	150	.	220	300	640	720	850	390	380	620	800	750	805	880	1010	1150	960	1020	1300
6	480	540	360	200	220	.	90	450	520	650	250	300	620	700	570	805	880	1150	970	1020	1300	
7	560	620	450	270	300	90	.	360	430	560	310	350	700	760	640	890	960	1230	1050	1100	1370	
8	560	690	800	700	640	450	360	.	80	210	250	380	580	630	500	780	850	810	870	740	870	1140
9	480	620	870	830	720	520	430	80	.	130	180	320	510	560	430	710	780	750	800	670	800	1070
10	480	610	1000	250	850	650	560	210	130	.	320	450	500	550	430	700	770	740	800	660	790	1060
11	320	430	430	240	390	250	310	250	180	320	.	130	400	450	320	600	670	635	700	560	700	920
12	200	300	330	480	380	300	350	380	320	450	130	.	330	510	360	520	590	640	700	560	730	1000
13	140	280	480	480	620	620	700	580	510	500	400	330	.	230	130	190	280	370	430	350	400	670
14	330	470	660	660	800	700	760	630	560	550	450	510	230	.	120	210	260	200	230	110	240	500
15	270	410	610	610	750	570	640	500	430	430	320	360	130	120	.	320	390	340	370	240	360	590
16	330	470	660	660	805	805	890	780	710	700	600	520	190	210	320	.	80	330	300	160	210	480
17	400	560	740	740	880	880	960	850	780	770	670	590	280	260	390	80	.	340	270	170	150	420
18	530	680	870	870	1010	890	850	810	750	740	635	640	370	200	340	330	340	.	140	170	270	430
19	670	820	1010	1010	1150	1150	1230	870	800	800	700	700	430	230	370	300	270	140	.	140	140	300
20	490	630	820	830	960	970	1050	740	670	680	560	560	350	110	240	160	170	170	140	.	130	390
21	540	700	880	880	1020	1020	1100	870	800	790	700	730	400	240	360	210	150	270	140	130	.	270
22	820	950	1050	1050	1300	1300	1370	1140	1070	1060	920	1000	670	500	590	480	420	430	300	390	270	.

Рис. 3. Загальний вигляд програми у середовищі Delphi з відстанями

Задача комівозера методом Монте-Карло

[Знаходження розв'язку задачі комівозера методом Монте-Карло](#)

Знайти оптимальний маршрут

Очистити таблицю

Сохранить таблицу

Загрузить таблицу

Кількість населених пунктів: 22

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	.	150	340	345	500	480	560	560	480	480	320	200	140	330	270	330	400	530	670	490	540	820
2	150	.	320	410	510	540	620	630	620	610	430	300	280	470	410	470	550	660	820	630	700	960
3	340	320	.	220	200	360	450	800	870	1000	430	330	480	660	610	660	740	870	1010	820	880	1150
4	345	410	220	.	150	200	270	620	700	830	250	240	480	660	610	660	740	870	1010	830	880	1150
5	500	510	200	150	.	220	300	640	720	850	390	380	620	800	750	805	880	1010	1150	960	1020	1300
6	480	540	360	200	220	.	90	450	520	650	250	300	620	700	570	805	880	890	1150	970	1020	1300
7	560	620	450	270	300	90	.	360	430	580	310	360	700	760	640	890	960	850	1230	1050	1100	1370
8	560	690	800	620	640	450	360	.	80	210	250	380	580	630	500	780	850	810	870	740	870	1140
9	480	620	870	700	720	520	430	80	.	130	180	320	510	560	430	710	780	750	800	670	800	1070
10	480	610	1000	830	850	650	560	210	130	.	320	450	500	550	430	700	770	740	800	660	790	1060
11	320	430	430	250	390	250	310	250	180	320	.	130	400	450	320	600	670	630	700	560	700	920
12	200	300	330	240	380	300	350	380	320	450	130	.	330	510	360	520	590	640	700	560	730	1000
13	140	280	480	480	620	620	700	580	510	500	400	330	.	230	130	190	280	370	430	350	400	670
14	330	470	660	660	800	700	760	630	560	550	450	510	230	.	120	210	260	200	230	110	240	500
15	270	410	610	610	750	570	640	500	430	430	320	360	130	120	.	320	390	340	370	240	360	590
16	330	470	660	660	805	805	890	780	710	700	600	520	190	210	320	.	80	330	300	160	210	480
17	400	550	740	740	880	880	960	850	780	770	670	590	280	260	390	80	.	340	270	170	150	420
18	530	680	870	870	1010	890	850	810	750	740	630	640	370	200	340	330	340	.	140	170	270	430
19	670	820	1010	1010	1150	1150	1230	870	800	800	700	700	430	230	370	300	270	140	.	140	140	300
20	490	630	820	830	960	970	1050	740	670	660	560	560	350	110	240	160	170	170	140	.	130	390
21	540	700	880	880	1020	1020	1100	870	800	790	700	730	400	240	360	210	150	270	140	130	.	270
22	820	950	1150	1150	1300	1300	1370	1140	1070	1060	920	1000	670	500	590	480	420	430	300	390	270	.

Оптимальний маршрут: 1 -> 13 -> 17 -> 18 -> 22 -> 21 -> 19 -> 14 -> 12 -> 7 -> 5 -> 2 -> 9 -> 11 -> 6 -> 4 -> 3 -> 15 -> 20 -> 16 -> 8 -> 10

Загальна відстань: 7450

Рис. 4. Програмний розв'язок задачі визначення оптимального маршруту за критерієм мінімальної відстані



Рис. 5. Відображення пунктів найкоротшого маршруту на карті

Граф отриманого оптимального маршруту, що є напрямленим та одностороннім, зображено на рис. 6.

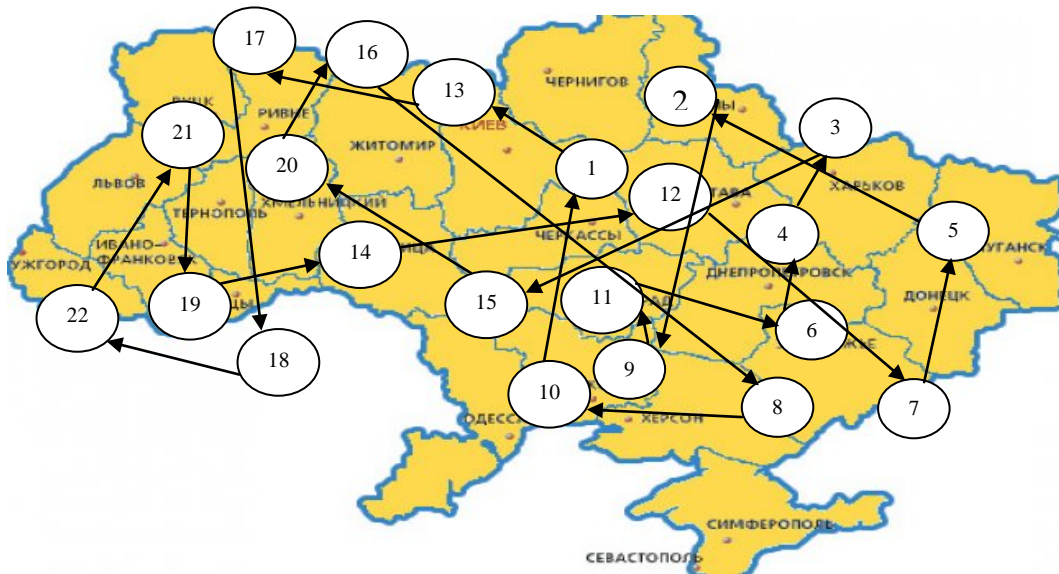


Рис. 6. Відображення на карті графу, розробленого за критерієм мінімальної відстані маршруту

Для перевізника не менш важливим критерієм ефективності перевезень є вартість, а саме отриманий чистий прибуток. Розглянемо завдання визначення оптимального маршруту перевезення Україною на основі даних тарифів перевізника.

На основі даних про відстані між обласними центрами України (крім Донецька, Луганська та АР Крим) (рис. 1) можна розрахувати тарифи на всіх напрямках перевезень у межах України. Враховуючи подачу ТЗ до місця завантаження, тобто можливий переїзд по області, та з урахуванням сезонності (дані розрахунки подано в осінній період) можна сформувати таблицю тарифів перевізника. Коли перевізник прораховує тариф на перевезення, то він ураховує рельєф місцевості. Для цього до загального кілометражу додається 5–8 %, що показує рельєф, протяжність міста чи транспортну мережу та амортизаційні витрати. Тоді ставка перевізника дорівнює добутку кілометражу (+ 5 – 8 %) й тарифу перевізника. Тариф перевізника залежить від вартості палива та особистих потреб перевізника. Ціна дизельного пального визначається згідно з даними джерела [17].

Упорядкуємо отримані тарифи перевізника в таблицю у вигляді матриці (рис. 7). Комірки з однаковим ім'ям позначені «–», оскільки перевезення по місту не враховуємо. Інші комірки містять розраховані значення залежно від відстані між пунктами мережі (рис. 1).

	Київ	Чернігів	Суми	Полтава	Харків	Дніпро	Запоріжжя	Херсон	Миколаїв	Одеса	Кіровоград	Черкаси	Житомир	Хмельницький	Вінниця	Рівне	Луцьк	Чернівецький	Івано-Франківський	Тернопіль	Львів	Ужгород
Київ	3500	9000	7800	12000	11000	12500	10500	13500	8000	5500	4000	10000	6500	8500	12000	10500	13000	14500	13000	12000	10500	16500
Чернігів	6000	5500	7500	15000	15500	21000	18500	12000	15000	12000	9500	8000	8500	10500	10500	12000	13500	17000	18500	15300	13000	18500
Суми	6500	5800	3500	6000	7000	8000	15000	16000	18500	18500	10500	7800	9500	13000	11300	12600	14000	20000	19000	15500	14500	21000
Полтава	5500	9500	6500	4500	4500	6000	12000	12300	14500	8000	7000	7500	11500	10000	12500	12700	16500	17000	15000	15000	14000	18000
Харків	8000	11500	7000	5300	5300	7500	13000	15000	17500	11500	13000	10500	10500	14500	15000	16800	19000	19000	18000	20000	20000	22000
Дніпро	8000	10500	10000	6500	7500	3500	10000	10500	14000	7000	6500	8500	13000	13000	13000	13000	14500	18000	16500	14000	15000	21000
Запоріжжя	9000	13500	13500	7000	8000	3000	8500	9500	11500	8500	8500	13000	15000	15000	15000	17500	21000	19000	19000	17000	17500	23000
Херсон	12000	14000	16000	14000	14700	9000	7300	2500	7500	7500	10000	13000	13000	11500	17000	18000	15000	19500	19500	19500	21500	23000
Миколаїв	12000	13500	20000	14500	18000	12000	9000	6000	6000	8000	12000	13500	16000	14000	18000	17000	17000	18000	19000	17000	20000	23500
Одеса	8640	10980	20000	15770	16150	12350	10640	3900	7680	10800	9000	10450	8170	12600	13860	17020	17600	14520	14520	14220	19080	19080
Кіровоград	6080	8170	10320	7000	9360	4750	6200	4500	7680	6000	8000	7040	12000	13400	18415	18200	14700	14700	14700	14700	14700	19320
Черкаси	5500	6500	8500	8000	10500	7000	8500	10000	9500	10800	6000	6800	11200	8500	10400	11800	18200	18200	16000	16000	16000	21000
Житомир	3920	6720	13440	10560	13640	15400	13920	12240	12000	10800	8580	6440	4550	8400	10730	11180	8750	8800	8800	8750	8800	14070
Хмельницький	8580	13000	16500	14500	18000	15000	16000	14490	12880	12500	12600	14280	6440	4800	7350	8320	8000	6900	4400	4400	7200	14000
Вінниця	7000	10000	12000	11000	15000	12500	13000	10500	9000	8500	8000	7500	6000	5500	8000	8000	10000	10000	6000	6000	9500	14500
Рівне	7260	10340	16500	14520	18515	20470	17940	16330	16800	14560	5320	6300	9600	3600	3600	3600	9900	9000	6400	5880	13440	13440
Луцьк	8800	12100	18500	16280	20240	22080	19550	17940	18480	16750	14750	7840	7280	9750	3600	3600	9520	7560	5950	4200	10500	10500
Чернівецький	9000	11700	21750	19140	19580	19580	18700	17820	16500	16280	13970	14080	6660	6000	8250	8500	5600	5600	6800	7560	10750	10750
Івано-Франківський	12060	14760	25250	22220	25300	27060	19140	17600	15400	15400	8170	6900	10360	8400	7560	6300	6300	3500	3500	6300	3500	7500
Франківський	8820	11340	20500	18260	21340	23100	16280	14740	14520	12320	12320	6650	3300	6720	4480	4760	5600	4550	4550	4550	4550	9750
Тернопіль	10000	12000	16500	15500	19000	21000	25000	21500	21000	14500	13500	9500	7000	8000	6600	6000	9000	5000	5000	5000	7900	7900
Львів	13940	16150	19550	21850	24700	26080	20330	20330	20140	17480	19000	12730	10500	12390	10080	8820	8400	8400	10920	6750	6750	-
Ужгород																						

Рис. 7. Матричний вигляд таблиці тарифів перевізника по Україні

Кількість населених пунктів: 22

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	-	3500	9000	7800	12000	11000	12500	12000	10500	13500	8000	9500	4000	10000	9500	8500	14200	13000	13000	12000	10500	18000
2	5000	-	5300	7900	15000	19500	21000	18500	19500	12000	9500	8000	9500	8500	10500	12000	12500	17000	18500	15300	13000	16500
3	6500	5800	-	3500	6800	7000	8000	15000	16000	18500	19500	7800	9500	13000	11300	12800	14000	20000	18000	19500	14500	21000
4	5500	9500	6500	-	4500	4900	6000	12000	12300	14500	14500	8000	7900	11500	10500	12500	12700	18500	17000	15000	14000	18000
5	8000	11500	7000	5300	-	5300	7500	11000	15000	17500	11500	13000	10500	15000	14500	15000	16800	19000	19000	18000	20000	22000
6	9000	16500	10000	6500	7500	-	7500	10000	16500	14000	7000	9500	13000	13000	13000	14500	16000	16500	14000	15000	17000	21000
7	9000	12000	12500	7000	8000	3000	-	9500	9500	11500	8500	9500	13000	15000	15000	17500	27000	19000	17000	17000	23000	23000
8	12000	14000	16000	14000	14200	9000	7100	-	2500	7500	7500	10000	13000	13000	11500	17000	18000	15000	19500	19500	21500	22000
9	12000	18000	20000	14500	18000	12000	9000	4000	-	8000	8000	12000	13500	16000	14000	18000	17000	18000	19000	17000	30000	22500
10	8700	11000	20000	19000	15200	12400	10700	5300	3800	-	7700	10800	9000	10200	8200	13500	17000	17600	14200	14200	15000	19000
11	6000	8200	10300	7000	9400	4800	6200	6600	4500	7700	-	8000	9000	9000	7100	12000	13400	18500	16200	14000	14700	15300
12	5500	6500	8500	8000	16500	7000	9500	16000	9500	10000	5000	-	8800	11200	8500	16400	11600	16600	16200	16000	16000	21000
13	4000	6700	12000	18500	13200	13200	15400	14000	13200	12000	10800	8600	-	6500	4600	6700	9400	10700	11200	8800	8800	14000
14	8600	13000	18500	14500	18000	15000	16000	14500	12900	12500	12600	14200	8500	-	4800	7400	8000	8000	5800	4400	7200	14000
15	7800	18000	12000	11000	15000	12500	13000	16500	9000	8500	8000	7500	8000	9500	-	9000	9000	10000	10000	9000	9000	14500
16	7300	10000	16500	14500	18500	18500	20500	18000	16300	16800	16800	14600	5300	5300	5600	-	3600	5900	9000	9400	5900	12500
17	8800	12000	8500	15200	20000	20000	22000	19500	18000	18500	16500	14800	7900	7300	9000	3600	-	9600	7600	9000	4200	16500
18	9000	11700	21800	19100	19600	19600	16700	17800	16500	16300	14000	14100	6700	6000	8500	8000	8500	-	5600	8600	7600	16800
19	12100	14800	25300	22300	25300	25300	27100	19300	17600	17600	15400	15400	8200	8500	10400	8400	7600	6200	-	6300	3600	7500
20	9000	11400	20500	18200	21400	21400	23100	16300	14800	14500	12300	12300	6700	3000	6700	4500	4800	7700	5800	-	4800	9000
21	10000	12000	16500	15000	19000	21000	25000	21500	21000	21000	14500	13500	9500	7000	9000	8000	8000	9000	9000	5000	5000	7500
22	14000	15200	18600	21500	24300	24300	26000	26300	26300	26300	17500	19000	12800	10500	12400	10100	8000	8400	8400	10500	8400	10500

Рис. 8. Загальний вигляд даних у середовищі Delphi з урахуванням тарифів перевізника

Задача коммівояжера методом Монте-Карло
 Згенерований маршрут з найменшою вартістю: 10500.00

Кількість наступних пунктів: 22

Оптимальний маршрут: 1 → 9 → 18 → 13 → 14 → 6 → 17 → 31 → 16 → 8 → 3 → 20 → 2 → 15 → 4 → 10 → 21 → 5 → 22 → 7 → 19 → 12

Значимий тариф: 352300

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22
1	-	3500	9800	7800	12100	11100	12500	12000	10500	17200	9000	8500	4000	10000	8500	8500	14500	13000	13000	12000	10500	18500
2	6100	-	8500	7500	15100	15500	21000	18500	19500	12000	9500	8000	8500	8500	10500	12000	13500	17000	16500	15500	13000	18500
3	6500	5800	-	3600	8000	7000	8000	15000	16000	18500	16500	7800	9000	13000	13800	14000	20000	19000	19000	14500	21000	
4	5500	9500	8500	-	4500	4500	8000	12000	12500	14500	8000	7500	7500	11500	10000	12500	12700	16500	17000	15000	14000	18000
5	8000	11500	7800	5100	-	5000	7500	13000	15000	17500	11500	13000	16500	15000	14500	19000	16000	19000	18000	20000	20000	
6	8000	16500	16000	6500	7500	-	3500	16000	10500	14000	7000	6500	8000	13000	13000	14500	18000	18000	16000	14000	19000	21000
7	9000	13500	13500	7000	9000	3000	-	8500	9000	11500	9500	8500	13000	15000	15000	17500	21000	21000	17000	17500	23000	
8	12000	14000	16000	14000	14200	9000	7300	-	2500	7500	7500	10000	13000	13000	15000	17000	18000	15000	19500	19500	21500	23000
9	12000	12000	20000	14000	18000	12000	9000	4000	-	6000	8000	12000	13500	16000	14000	18000	17000	18000	19000	17000	20000	25000
10	8700	11000	29000	16500	16200	12400	10700	5300	3900	-	7700	10800	9000	10500	8200	13500	13000	17000	17800	14500	14200	19000
11	6000	8200	16300	7000	5400	4600	6200	5000	4500	7700	-	6000	9000	9000	7100	12000	13400	16500	16200	14000	14700	19300
12	5500	9500	8500	8000	10500	7000	9500	10000	9500	10800	6000	-	6800	11200	8900	10400	11800	18500	18200	16000	16000	21000
13	4800	6700	13500	16000	12700	12700	15600	14000	12300	12000	18000	8400	-	8200	4900	6700	8400	10700	11200	8800	8800	14000
14	6600	13000	16500	14500	16000	15000	16000	14500	12500	12500	13500	14300	6500	-	4900	7400	8300	8000	6300	4400	7200	14000
15	7000	10000	12000	11000	15000	12500	13000	10500	9000	8500	9000	7500	5000	5600	-	8000	8000	10000	10000	4000	9500	14500
16	7200	10300	16500	14500	16500	16500	20500	16000	16300	16500	16000	14500	5300	5300	9600	-	3600	9000	9000	5400	9300	13500
17	8600	12000	8500	16300	20300	20300	22000	19000	16000	16500	16000	14600	7900	7900	9600	3600	-	9500	7600	6000	4200	10500
18	9000	11700	21000	19100	19500	19600	10700	17800	16500	16300	14000	14100	6700	6000	8000	8000	8500	-	5600	6800	7600	10800
19	12100	14000	25300	22300	25300	25300	27100	19200	17600	17600	15400	15400	8200	6800	10400	8400	7900	6100	-	6300	3500	7500
20	8900	11400	29500	18300	21400	21400	23100	16300	14900	14500	12300	12300	6700	3300	6700	4900	4900	7000	5000	-	4600	9800
21	10000	12000	16500	19500	19000	21000	26000	21500	21000	21000	14500	12500	9900	7000	9000	6000	6000	9000	5000	5000	-	7500
22	14000	16300	19600	21600	24700	24700	36000	30300	30300	30200	17500	19000	13800	10500	12400	10100	8800	9000	8400	10800	6800	-

Рис. 9. Програмний розв'язок задачі визначення оптимального маршруту за критерієм максимального фрахту

Сформовані дані для визначення маршруту за найбільшим фрахтом і результати розв’язку задачі комівояжера (код програми мовою програмування Delphi подано в додатку) зображено на рис. 8, 9.

Оптимальний маршрут за критерієм максимального фрахту послідовно включає пункти 1→9→18→13→14→6→17→11→16→8→3→20→2→15→4→10→21→5→22→7→19→12→1.

Отже, ТЗ треба проїхати маршрутом “Київ – Миколаїв – Чернівці – Житомир – Хмельницький – Дніпро – Луцьк – Кіровоград – Рівне – Херсон – Суми – Тернопіль – Чернігів – Вінниця – Полтава – Одеса – Львів – Харків – Ужгород – Запоріжжя – Івано-Франківськ – Черкаси – Київ” із загальним фрахтом для перевізника 357 800 грн (352 300 + 5500), що є найбільшим загальним прибутком. Відображення маршруту на карті (рис. 10).

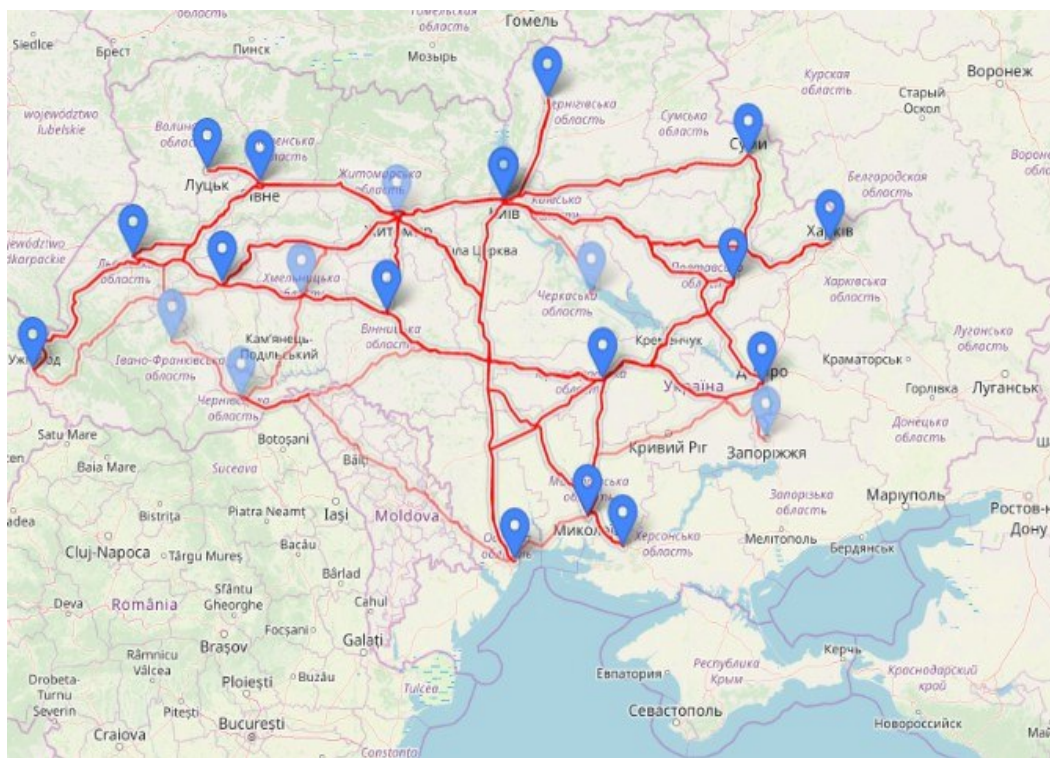


Рис. 10. Маршрут на карті за найбільшим загальним тарифом

Відображення оптимального маршруту за критерієм максимального фрахту у вигляді напрямленого одностороннього графу на карті (рис. 11).

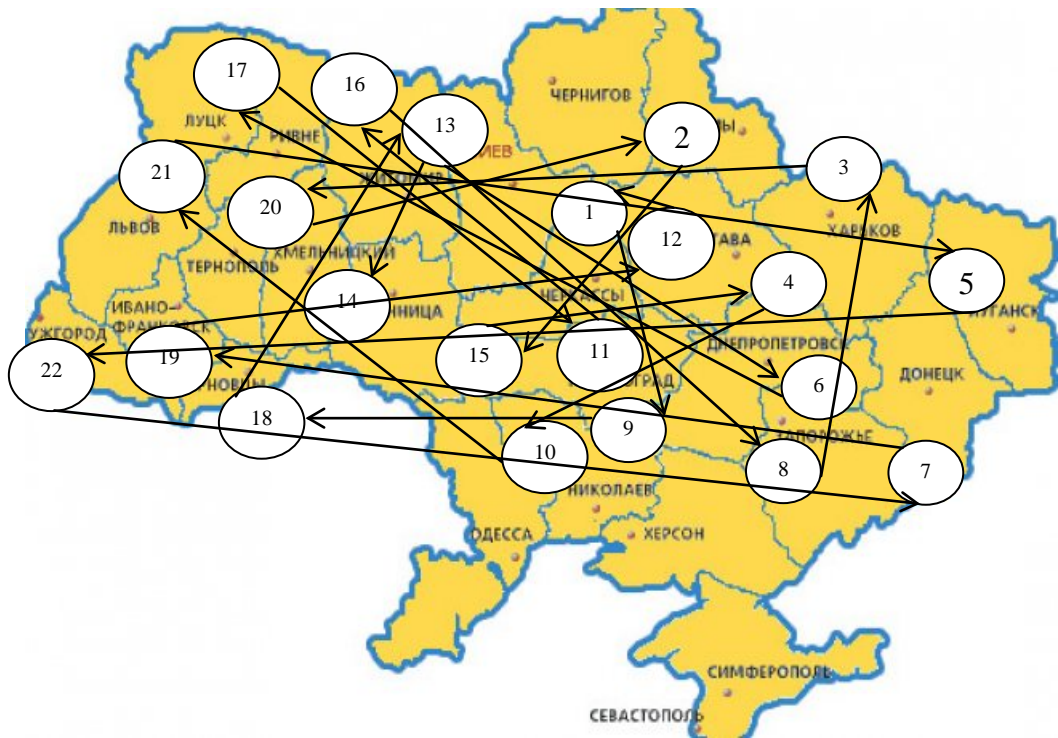


Рис. 11. Граф маршруту за максимальним загальним фрахтом на карті

Створено досить хаотичний, проте найвигідніший для перевізника маршрут. Порівнюючи дані маршрути, слід зазначити, що перший (на найкоротшу відстань) становитиме 7930 км, проте у фінансовому плані не принесе стільки коштів, як другий (на найбільший фрахт перевізника), що дорівнює 357 800 грн. Додатково прорахувавши, виявимо, що для першого маршруту прибуток становитиме 190 710 грн, а для другого відстань – 16 170 км.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. У статті розглядалося питання покращання вантажних автомобільних перевезень по Україні на основі модифікованого мурашиного алгоритму. Серед сучасних методів для розв'язування задачі комівояжера обрано мурашиний алгоритм, оскільки його фізична основа – поведінка мурах під час пошуку їжі – є найближчою до формулювання цієї задачі, що визначає оптимальний маршрут для перевезення та його прибутковість для фірми.

1. Побудовано математичну модель, розроблено алгоритм перевезення на основі мурашиного алгоритму та розроблено блок-схему, поставлено завдання та описано процес перевезення з розрахунками тарифів перевізника.

2. Розроблено програму для прорахунку мінімального маршруту за

відстанню на основі задачі комівояжера в середовищі Delphi, розв'язана задача на мінімальну відстань, побудовано граф даного маршруту.

3. Розроблено програму для знаходження максимального маршруту за фрахтом перевізника, розв'язано дану задачу, а її результат у вигляді маршруту нанесено на карту у вигляді графа.

Перший (мінімальний за відстанню) маршрут – “Київ – Житомир – Луцьк – Чернівці – Ужгород – Львів – Івано-Франківськ – Хмельницький – Черкаси – Запоріжжя – Харків – Чернігів – Миколаїв – Кіровоград – Дніпро – Полтава – Суми – Вінниця – Тернопіль – Рівне – Херсон – Одеса – Київ” із загальною відстанню 7930 км та фрахтом 190 710 грн.

Другий (максимальний за фрахтом) – “Київ – Миколаїв – Чернівці – Житомир – Хмельницький – Дніпро – Луцьк – Кіровоград – Рівне – Херсон – Суми – Тернопіль – Чернігів – Вінниця – Полтава – Одеса – Львів – Харків – Ужгород – Запоріжжя – Івано-Франківськ – Черкаси – Київ” із загальним фрахтом для перевізника 357 800 грн та відстанню 16 170 км.

Дані розрахунки маршрутів досить важливі для розвитку роботи логістичних компаній, оскільки вантажні перевезення надзвичайно значущі для економіки країни й компанії та є актуальними в сьогоденні. Клієнтська база невпинно зростає, нові види товарів з кожним днем розробляються та виробляються в надзвичайних кількостях, а доставка їх до місця призначення є невід'ємною частиною торговельного процесу.

За результатами розрахунків вироблено технічні рішення щодо підвищення ефективності роботи логістичної компанії на основі модифікованого мурашиного алгоритму.

Список використаних джерел:

1. *Миротин Л. Б.* Транспортная логистика: учебник для транспортных вузов / под общей редакцией Л. Б. Миротина. Москва: Экзамен, 2003. 512.

2. *Бауэрсокс Доналд Дж., Клосс Дейвин Дж.* Логистика: интегрированная цепь поставок: пер. с англ. Н. Н. Барышниковой, Б. С. Пинскера. 2-е изд. Москва: ЗАО “Олим-Бизнес”, 2008. 608 с.

3. *Лукинский В. С., Лукинский В. В., Пластуняк И. А., Плетенева Н. Г.* Транспортировка в логистике: учеб. пособие. Санкт-Петербург: СПбГИУЭ, 2005. 139 с.

4. *Горев А. Э.* Грузовые автомобильные перевозки. Москва, 2008. 288 с.

5. *Леснікова І. Ю., Халіпова Н. В.* Оптимізація пасажирських перевезень у вузлах мегаполісів // Вісник Академії митної служби України. Серія: “Технічні науки”. 2015. № 2 (54). С. 55–69.

6. *Літвінова Я. В.* Удосконалення логістичного управління різними

видами транспорту, складуванням та переробкою вантажів у транспортних вузлах: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.22.01 “Транспортні системи”. Харків, 2017. 232 с.

7. Шуліка О. О. Формування процесу доставки тарно-штучних вантажів автомобільним транспортом у міжміському сполученні: дис. ... канд. тех. наук: спец. 05.22.01 “Транспортні системи”. Харків, 2017. 232 с.

8. Khalipova N., Pasichnyk A., Lesnikova I., Kuzmenko A., Kokina M., Kutirev V. & Kushchenko Ye.. Developing the method of rational trucking routing based on the modified ant algorithm // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies: Control processes, 3 (91). Vol 1. 68–76. DOI: 10.15587/1729-4061.2018.123862.

9. Lei K., Zhu X., Hou J., Huang W. Decision of Multimodal Transportation Scheme Based on Swarm Intelligence // Mathematical Problems in Engineering. 2014. Article ID 932832, 10.

10. Ramadhani T., Hertono G. F., Handari B. D. An Ant Colony Optimization algorithm for solving the fixed destination multi-depot multiple traveling salesman problem with non-random parameters. AIP Conference Proceedings. 2017. 1862, 030123.

11. Krzysztof K., Damian K., Iwona P., Wojciech M. K., Cezary G. Ant colony optimisation for scheduling of flexible job shop with multi-resources requirements. MATEC Web of Conferences 112. 2017. Article number 06018, 6,

12. Wang Y., Lu J. Optimization of China Crude Oil Transportation Network with Genetic Ant Colony Algorithm // Information. 2015. 6 (3), P. 467–480.

13. Hassan Md. R., Islam Md. M., Murase K. A New Local Search Based Ant Colony Optimization Algorithm for Solving Combinatorial Optimization Problems // IEICE Transactions on Information and Systems. 2010. Vol. E93. D. № 5. P. 1127–1136.

14. Мурашиний алгоритм. 2019. URL: https://uk.wikipedia.org/wiki/Мурашиний_алгоритм.

15. Штовба С. Д., Рудий О. М. Мурашині алгоритми оптимізації // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2004. № 4. С. 62–69.

16. Халіпова Н. В., Черненко А. О., Леснікова І. Ю. Щодо моделювання транспортних потоків для аналізу завантаженості доріг в містах // Транспортні системи та технології перевезень: зб. наук. праць Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна. 2016. Вип. 12. С. 90–98.

17. Стоимость дизельного топлива на АЗС Украины. Минфин. 2019. URL: <https://index.minfin.com.ua/markets/fuel/dt>

Код програми розрахунку оптимального маршруту в середовищі Delphi

```
unit Unit1;
interface
uses
  Windows, Messages, SysUtils, Variants, Classes, Graphics, Controls,
Forms,
  Dialogs, StdCtrls, ExtCtrls, Spin, Grids, ComCtrls, ShellAPI;
type
  MAS = array[1..100, 1..100] of integer;
  VECT = array[1..1000] of integer;
type
  TForm1 = class(TForm)
    Panel1: TPanel;
    Label1: TLabel;
    Panel2: TPanel;
    Label2: TLabel;
    SpinEdit1: TSpinEdit;
    StringGrid1: TStringGrid;
    Button1: TButton;
    StatusBar1: TStatusBar;
    Button2: TButton;
    Button3: TButton;
    Button4: TButton;
    procedure Button1Click(Sender: TObject);
    procedure FormCreate(Sender: TObject);
    procedure CR_Change;
    procedure SpinEdit1Change(Sender: TObject);
    procedure Button2Click(Sender: TObject);
    procedure Button3Click(Sender: TObject);
    procedure Label1MouseLeave(Sender: TObject);
    procedure Label1MouseMove(Sender: TObject; Shift: TShiftState; X,
      Y: Integer);
    procedure StringGrid1Click(Sender: TObject);
  private
    { Private declarations }
  public
    { Public declarations }
  end;
```

```

var
  Form1: TForm1;
implementation
{$R *.dfm}
procedure TForm1.Button1Click(Sender: TObject);
var
  A: MAS;
  b, b_min: VECT;
  i, j, k, n, m, l, ln, S, S_min: integer;
  bbb: boolean;
  path: String;
begin
  m := SpinEdit1.Value;
  for i := 1 to m do
    for j := 1 to m do
      if (StringGrid1.Cells[j, i] <> "") and (StringGrid1.Cells[j, i] <> '-') then
        A[i, j] := StrToInt(StringGrid1.Cells[i, j])
      else
        A[i, j] := 99999;
  l := 1;
  ln := 1000;
  S_min := 99999; {Для задачі на максимум S_min:=0;}
  repeat
    b[1] := 1;
    n := 2;
    while (n <= m) do
      begin
        bbb := true;
        k := random(m + 1);
        for i := 1 to n - 1 do
          if (k = b[i]) or (k = 0) then
            begin
              bbb := false;
            break;
            end;
        if (bbb = true) then
          begin
            b[n] := k;
            n := n + 1;
          end;
        end;
      end;
end;

```

```

S := 0;
for k := 1 to m do
  if (k <= (m - 1)) then
    begin
      i := b[k];
      j := b[k + 1];
      S := S + A[i, j];
    end
  else
    begin
      i := b[k];
      j := b[1];
      S := S + A[i, j];
    end;
  if (S < S_min) then {Для задачі на максимум (S > S_min)}
    begin
      S_min := S;
      b_min := b;
    end;
  l := l + 1;
  until (l >= ln);
  path := IntToStr(b_min[1]);
  for i := 2 to m do
    path := path + '->' + IntToStr(b_min[i]);
  StatusBar1.Panels[0].Text := 'Оптимальний маршрут: ' + path;
  StatusBar1.Panels[1].Text := 'Загальна відстань: ' + IntToStr(S_min);
end;
procedure TForm1.CR_Change;
var
  i: integer;
begin
  StringGrid1.ColCount := SpinEdit1.Value + 1;
  StringGrid1.RowCount := SpinEdit1.Value + 1;
  for i := 1 to SpinEdit1.Value do
    begin
      StringGrid1.Cells[0, i] := IntToStr(i);
      StringGrid1.Cells[i, 0] := IntToStr(i);
      StringGrid1.Cells[i, i] := '-';
    end;
end;
procedure TForm1.FormCreate(Sender: TObject);

```

```
begin
  CR_Change
end;
procedure TForm1.SpinEdit1Change(Sender: TObject);
begin
  CR_Change;
end;
procedure TForm1.StringGrid1Click(Sender: TObject);
begin
end;
procedure TForm1.Button2Click(Sender: TObject);
var
  i, j: integer;
begin
  for i := 1 to SpinEdit1.Value do
    for j := 1 to SpinEdit1.Value do
      if (i <> j) then
        StringGrid1.Cells[i, j] := "";
    end;
  end;
procedure TForm1.Label1MouseLeave(Sender: TObject);
begin
  Label1.Font.Style := [];
end;
procedure SaveGrid(Grid:TStringGrid;FileName:string);
var
  f: textfile;
  x, y: integer;
begin
  assignfile(f,Filename);
  rewrite(f);
  writeln(f, grid.colcount);
  writeln(f, grid.rowcount);
  for X := 0 to grid.colcount - 1 do
    for y := 1 to grid.rowcount - 1 do
      writeln(F, grid.cells[x, y]);
    end;
  end;
procedure TForm1.Button3Click(Sender: TObject);
begin
  SaveGrid(form1.StringGrid1,'Grid1.txt');
end;
```

Зінченко А. Ю., кандидат технічних наук,
завідувач кафедри комп'ютерних наук
Київського міжнародного університету

ВИКОРИСТАННЯ ІН'ЄКЦІЇ ЗАЛЕЖНОСТЕЙ У РОЗРОБЦІ ІНФОРМАЦІЙНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРИЧНИХ МЕТОДІВ VaR

Розглянуто використання технології слабозв'язаних програмних модулів автоматизованої інформаційної системи на основі ін'єкцій залежностей для оцінки і прогнозу ринкових ризиків. На основі реалізованої автоматизованої системи для основних параметричних методів VaR виконані розрахунки та проведено моделювання, зокрема для експоненціальної згладженої моделі, варіаційно-коваріаційної (методом для багатокomпонентного портфелю), моделі з врахуванням волатильності та евристичної моделі. На основі теорії інтервального оцінювання запропоновано використовувати евристичну модель, ідея якої полягає в тому, що коефіцієнти моделі прогнозу також прогнозуються. Тобто модель працює не на коефіцієнтах, адаптованих до попередньої статистики, а на коефіцієнтах, які прогнозуються для розрахунку прогнозу на наступний крок.

Крім того, у статті детально проаналізовано використання принципу Dependency inversion при реалізації подібних сервіс-орієнтованих архітектурних рішень. В кінці приведені результати порівняння моделей для оцінки та прогнозу ринкових ризиків. Вибрані кращі моделі.

Ключові слова: IoC; DI; DIP; SOLID; ESB; SOA; VaR.

This paper considers the use of technology of loosely coupled software modules of an automated information system based on injection of dependencies to assess and forecast market risks. Based on the implemented automated system for basic parametric VaR methods, calculations were performed and modeling was performed, in particular for the exponentially smoothed model, variation-covariance (multicomponent portfolio method), volatility model and heuristic model. According to the results of modeling among the classical parametric VaR methods, the GARCH model (8, 8) with a horizon of 60 working days showed the best forecast. This is due to the fact that in periods of increased market turbulence, the use of constant volatility values leads to an underestimation of VaR, and in periods of stable market, the use of high volatility leads to an overestimation of VaR in the calculations.

© А. Ю. Зінченко, 2021

However, the disadvantages of classical VaR methods are that the random heteroskedastic process is first approximated by a normal law, and then the approximation determines the confidence interval and the quantile, respectively. In this approach, "heavy tails" that cause extreme losses of capital are not taken into account outside the approximation. Therefore, based on the theory of interval estimation, it is proposed to use a heuristic model, the idea of which is that the coefficients of the forecast model are also predicted. So, the model does not work on coefficients adapted to previous statistics, but it works on coefficients that are projected to calculate the forecast for the next step. According to estimates of the optimality criterion recommended by the Basel Committee, the heuristic model based on the proposed approach proved to be the best and showed fewer breakdowns.

In addition, the article analyzes in detail the use of various injections of dependencies (constructor injection, parameter injection, setter injection, interface injection) in the implementation of weakly related software components of the information system. This ensures the implementation of the basic principle of SOLID – The Dependency Inversion Principle through IoC control inversion.

Ключові слова: *IoC; DI; DIP; SOLID; ESB; SOA; VaR.*

Постановка проблеми. Останні три роки для світу в цілому та для України зокрема ознаменувалися глобальними подіями (пандемія коронавірусу, війна в Україні), які пришвидшили процес інформатизації в разі, зокрема, у фінансово-економічному секторі, наданні державних послуг, у галузі освіти тощо. Тому логічно, що спостерігається тенденція переходу в розробці програмного забезпечення (ПЗ) від клієнт-серверних до сервіс-орієнтованих архітектур (service-oriented architecture – SOA) з використанням сервісів, мікросервісів чи гібридних хмарних технологій надання послуг. Дані сервіси будуються з використанням протоколів SOAP, XML-RPC, JSON-RPC або ж архітектурного стилю REST. Як приклад, можна навести “Єдиний веб-портал державних послуг Дія” – розподілену масштабовану SOA. Але як тоді бути з уже впровадженими CRM-системами (системами управління відносинами з клієнтами) чи ERP-системами (системами планування ресурсів підприємства), в які на початку десятих років чи раніше було вкладено десятки мільйонів грошей? Як правило, такі автоматизовані системи управління (АСУ) проектували у двохланковій (інколи, навіть у трьохланковій з сервером застосувань) клієнт-серверній архітектурі. Вихід єдиний – використання SOA з розподіленими компонентами. Сучасні перспективні SOA повинні підтримувати та супроводжувати користувача на кожному етапі процесу workflow (системи управління процесами, які повторюються, і завданнями, які виконуються в певному порядку) й мати комплексний набір хмарних рішень, із підтримкою штучного інтелекту, який може

оперувати онлайн, офлайн та сторонніми джерелами даних для повного та динамічного представлення їх клієнту. Серед останніх найпоширенішою моделлю хмарних рішень є SaaS (software as a service), доступ до програмного забезпечення якого надається віддалено мережевими каналами через веб-інтерфейс чи термінал.

Оскільки механізм слабкої зв'язаності є основним принципом об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) SOLID – основою принципу інверсії DIP (The Dependency Inversion Principle), а також одним із дев'яти шаблонів об'єктно-орієнтованого конструювання (ООК) Крейга Лармана GRASP для визначення відповідальності між класами та їх об'єктами, то побудова слабо-зв'язаних системних модулів під час проектування SOA, зокрема, у фінансовому секторі економіки для оцінки і прогнозу ринкових ризиків на основі параметричних методів VaR (Value at Risk або вартісна міра банківського ризику) є темою актуальною.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основні принципи слабкої зв'язаності та пов'язаності ПЗ були закладені ще Ларрі Константином наприкінці 1960-х років як частина структурованого дизайну для зменшення витрат на обслуговування та модифікацію [1, 2]. Основний принцип об'єктно-орієнтованого конструювання DIP – детально проаналізований у [3], а також в класичній книжці “Банди 4-ох” “Design Patterns: Elements of Reusable Object-Oriented Software”.

Основні принципи управління ризиками детально подані в матеріалах Базельського Комітету, зокрема в Базель 1 та Базель 2. Теорія інтервального оцінювання проаналізована в праці [4] та [5]. Крім того, класичні параметричні методи VaR для оцінки і прогнозу ринкових ризиків добре описані в [5] і [6].

Мета статті: розглянути реалізацію технології слабозв'язаних компонентів ПЗ на основі інверсії управління, тобто реалізацію механізму Dependency Injection (DI), з метою побудови інформаційної технології (IT) для створення адекватних моделей оцінювання ринкових ризиків і прогнозу за її допомогою.

Виклад основного матеріалу. Зв'язаність програмного забезпечення є метрикою програмного забезпечення та одним із основних принципів, який закладений в основі ООП. Даний принцип описує взаємозалежність між програмними компонентами. Слабка зв'язаність ПЗ є ознакою добре структурованої і добре спроектованої АСУ. Тут слід відрізнити низьку пов'язаність між програмними модулями, яка є іншим поняттям та описує наскільки пов'язані функції в межах одного модуля. Жорстка пов'язаність є серйозним недоліком програмного забезпечення, оскільки утруднює розуміння логіки модулів, їх модифікацію, автономне тестування, і навіть повторне використання. Як зазначалося вище, слабка зв'язаність ПЗ є основ-

ним принципом OOK SOLID, тобто, по суті, основою DIP, а також одним із дев'яти шаблонів OOK GRASP.

Зменшення зв'язаності програмних модулів під час проектування сучасних ІТ базується на шаблонах проектування багатопланової архітектури (наприклад, Model-View-Controller, Model-View-Presenter, Model-View-ViewModel та ін.). Воно досягається шляхом функціонального дизайну – підходу, основою якого є обмеження обов'язків модулів із функціональністю. Ключовим методом такої технології слабкої зв'язаності компонентів ПЗ є використання інверсії управління (IoC) через реалізацію механізму DI. При цьому основним механізмом безпеки даних під час взаємодії рівня даних (Resource Layer) з рівнем бізнес-логіки (Business Layer) та інтегрованими корпоративними сервісами в SOA є використання сервісної шини підприємства (ESB), яка слугує фреймворком для обміну повідомленнями та реалізує технологію слабозв'язаних компонентів в ІТ. ESB забезпечує обмін даними між різними сервісами SOA. Найпоширенішими її варіантами використання є Oracle Enterprise Service Bus та Microsoft Azure Service Bus.

Сучасне проектування архітектури ІТ в розподілених АСУ потребує глибокого розуміння не тільки ООП та 23 основних принципів OOK, а й розуміння різниці між IoC, DI та DIP, між паттернами, фреймворками та бібліотеками, а також різниці проектуванням взаємозв'язків між класами. Не будемо зупинятися на основних принципах OOK, деталях проектування класів у контексті реалізації, наслідування чи асоціації (агрегації і композиції відповідно). Перейдемо до опису проектування слабозв'язаності програмних модулів.

IoC – це досить загальне поняття, яке відрізняє бібліотеку динамічної компановки від фреймворка. На відміну від традиційного потоку управління IoC інвертує управління потоком. У класичній моделі архітектури ПЗ код, який викликається, сам контролює зовнішнє оточення, а також час і порядок викликів бібліотечних методів. Проте у випадку з фреймворком обов'язки міняються місцями: фреймворк надає деякі точки розширення, через які він викликає певні методи користувацького коду.

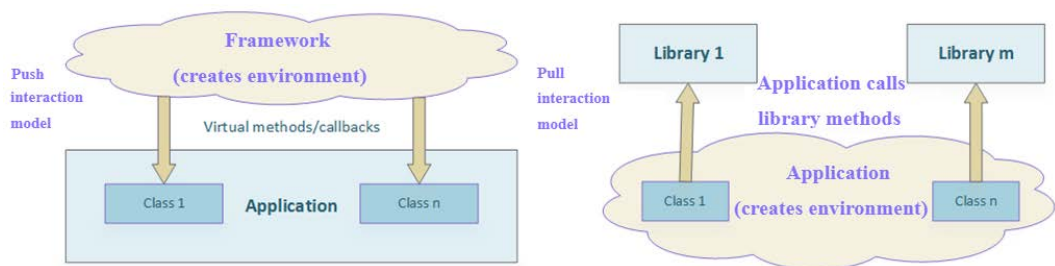


Рис. 1. Інвертація потоку управління інверсією управління

IoC використовується для підвищення модульності програми і робить її розподіленою і розширюваною. Вперше термін був використаний Майклом Меттсоном у праці [7]. Прикладами шаблонів проектування, які дотримуються принципу інверсії керування, є зворотні виклики, планувальники, цикли подій, ін'єкція залежностей, шаблонний метод і паттерн Наглядач.

Основною технологією реалізації IoC є використання механізму ін'єкції залежностей через конструктор (Constructor injection), параметр (Parameter injection), інтерфейс (Interface injection) чи сеттер (Setter injection). Існують також інші варіанти – використання паттерну Локатора служби, контекстного пошуку (contextualized lookup), паттерну Стратегія та інших. Найефективнішим є DI.

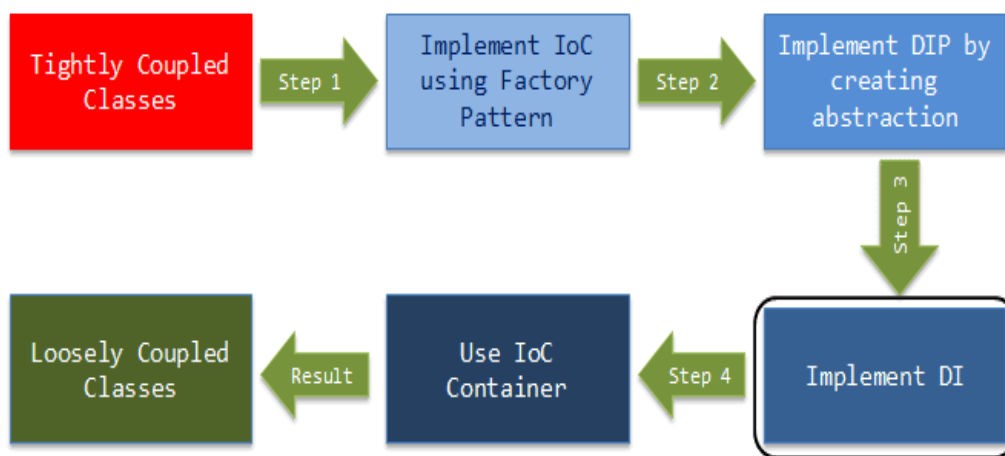


Рис. 2. Приклад реалізації IoC, з використанням шаблонного методу

Основним принципом SOLID є DIP, який дає рекомендації, якими повинні бути залежності між високорівневими та низькорівневими абстракціями:

- компоненти верхніх рівнів не повинні залежати від компонентів нижніх рівнів. Обидва повинні залежати від абстракцій;
- абстракції не повинні залежати від деталей. Проте самі деталі повинні залежати від абстракцій;
- компоненти вищого рівня реалізують бізнес-правила або логіку в системі. Низькорівневі компоненти займаються більш детальними операціями.

В принципі DIP залежності між класами повинні розташовуватись на поточному або вищому рівні абстракції. Тобто будь-який клас, який потребує наявності інтерфейсу в конструкторі, не обов'язково слідуватиме принципу інверсії залежностей.

Основний механізм реалізації IoC – DI – полягає у передачі класу його залежностей. Він слугує певним фреймворком. Як зазначалося вище, існує декілька конкретних способів або паттернів застосування DI. Наведемо їх нижче на прикладі логування для реалізації параметричних методів VaR:

```
class ReportProcessor
{
    private readonly IReportSender _reportSender;
    // Ін'єкція конструктора: передача обов'язкової залежності
    public ReportProcessor(IReportSender reportSender)
    {
        _reportSender = reportSender;
        Logger = LogManager.DefaultLogger;
    }
    // Ін'єкція методу: передача обов'язкових залежностей методу
    public void SendReport(Report report, IReportFormatter formatter)
    {
        Logger.Info("Sending report...");
        var formattedReport = formatter.Format(report);
        _reportSender.SendReport(formattedReport);
        Logger.Info("Report has been sent");
    }
    // Ін'єкція властивостей: встановлення необов'язкових інфраструктурних
    залежностей
    public ILogger Logger { get; set; }
}
// Ін'єкція на основі сеттеру: Іос-контейнер викликає методи сеттера класа
Provider
// після виклику конструктора для створення екземпляра bean
public Provider provider ()
{
    Provider provider = new Provider ();
    provider.setItem(item1());
    return provider;
}
<bean id = "provider" class= "org.baeldung.provider.Provider" >
    <property name = "item" ref= "item1" />
</bean>
```

Розглянемо тепер застосування розробленої ІТ, а також АСУ на її основі, до задачі оцінки та прогнозу ринкових ризиків з використанням параметричних методів VaR. Зауважимо, що в реалізації технології слабозв'язаних програмних

модулів з використанням ін'єкцій залежностей був використаний контейнер Unity – контейнер IoC з відкритим програмним кодом для платформи NET.

Фінансові ринки, зокрема в Україні в нинішнього часу, – це досить складна, нестабільна, високотехнологічна сфера, яка безпосередньо пов'язана з найрізноманітнішими фінансовими ризиками. Ризик є мірою ймовірності настання якої-небудь несприятливої події або її наслідків, що призводить до прямих втрат або непрямого збитку. Найбільш значущі види ризику (кредитний, інвестиційний, валютний) можуть привести не тільки до серйозного погіршення фінансового стану кредитної організації, але в найгіршому випадку – до втрати капіталу і банкрутства. Тому головна задача ризик-менеджменту полягає у виявленні і запобіганні можливих несприятливих подій, знаходженні шляхів мінімізації їх наслідків, створенні математичних методологій оцінок та прогнозування ризиків. Крім того, недооцінка ризиків призводить до втрат капіталу за рахунок їх реалізації, переоцінка – до надмірного резервування, внаслідок чого надмірна частина капіталу виводиться з обороту, що також призводить до втрат доходу.

Міра ризику VaR – це величина збитків, яка з імовірністю, що дорівнює рівню довіри для заданого довірчого інтервалу (наприклад, 99 %), не буде перевищена. Обчислення величини VaR проводиться з метою твердження про те, що ми впевнені на $X\%$ (з імовірністю $X/100$), що наші втрати не перевищать Y умовних одиниць протягом наступних N днів. У даному твердженні VaR – це невідома величина Y , яку потрібно обчислити. За рекомендацією Базельського комітету, міра ризику $VaR = K\sigma V$, де K – квантіль стандартного нормального розподілу при ймовірності 0,95 або 0,99; σ – середньоквадратичне відхилення, яке вираховується на вибірці зміни курсів акцій чи валют; V – розмір відкритої валютної позиції. Якщо одноденні витрати капіталу перевищували прогнозоване значення VaR за останні 250 торгових днів то для $K \leq 4$ – визначається “зелена зона”; $5 \leq K \leq 9$ – визначається “жовта зона”; $K \geq 10$ – “червона зона”, але в більшості випадків такі моделі відкидаються. При цьому зміни курсів логарифмуються, тобто

$X_t = \log\left(\frac{R_t}{R_{t-1}}\right)$, де R_t, R_{t-1} – офіційні курси акцій чи валют за певну послідовність днів відповідно.

Якщо величина VaR (а саме: другий член $k\sigma$ моделі VaR) може бути обчислена через параметри розподілу, то такі методи обчислення називаються параметричними. Дана методика визначає два основні типи моделей – класичну (варіаційно-коваріаційну) і експоненціальну (експоненційну і експоненційно згладжену). Крім того, виділяють модель на основі прогнозування волатильності за допомогою ARCH/GARCH. Класична VAR спира-

ється на припущення нормального закону розподілу флуктуацій випадкового процесу, середньоквадратичне відхилення якого визначається як

$$\sigma_t = \sqrt{\frac{1}{t-1} \sum_{i=1}^t (x_i - m)^2},$$

де квантіль k для імовірності 0,95 дорівнює 1,95.

Тобто стверджується, що з імовірністю 95 % процес не вийде з діапазону $k\sigma$. З іншого боку, нерівність Б'єнеме–Чебешева стверджує, що

$$P(|x - m| \geq k\sigma) \leq \frac{1}{k^2},$$

де x – випадкова змінна; m – математичне сподівання; σ – середньоквадратичне відхилення. Тоді при $k=1,95$ імовірність

$P(|x - m| \geq 1.95\sigma) \leq 0.263$ з точністю до четвертого знаку, тобто для реального процесу імовірність виходу з діапазону $k\sigma$ досить велика.

Адаптивна модель багатокomпонентного портфеля класичного VAR для визначення середньоквадратичного відхилення σ використовує формулу, наведену вище, та загальну процедуру адаптації і прогнозу коефіцієнта α граничного інтервалу. Тобто $VaR_i = \alpha * \tilde{\sigma}_i V_i, i = 1, 2, \dots, n$, де α – значення квантиля довірчого інтервалу; $\tilde{\sigma}_i$ – прогнозоване значення відхилення.

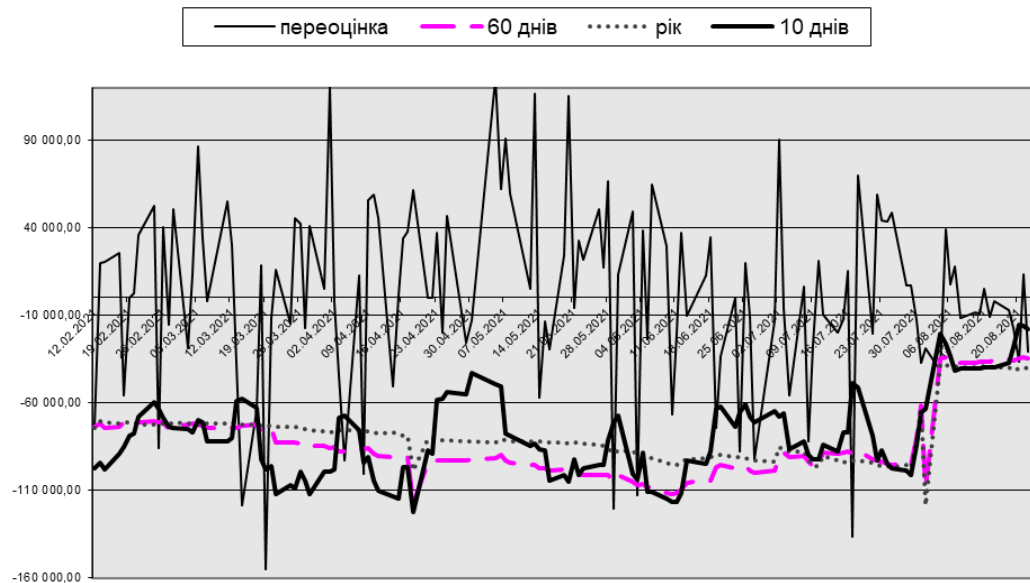


Рис. 3. Бек-тестінг варіаційно-коваріаційної моделі для різних горизонтів

Для проведеного дослідження ціни акцій на основі моделі багатокомпонентного портфеля з горизонтами в 1 рік (250 робочих днів), 60 і 10 робочих днів відповідно кількість пробойів становила 9, 8 та 14 відповідно. Тому згідно з Базельським комітетом модель з горизонтом у 60 днів є більш адекватною. При цьому з графіка видно, що графік з горизонтом у 10 днів непогано враховує тренд.

Ефективнішою оцінкою є експоненційно зважене середньоквадратичне відхилення, яке визначається як $\sigma_t = \sqrt{(1-\lambda) \sum_{i=1}^t \lambda^{i-1} (x_i - m)^2}$, де λ – коефіцієнт експоненційного згладжування. Дана модель в рекурсивній формі записується як $\hat{\sigma}_{t+1} = \sqrt{\lambda \sigma_t^2 + (1-\lambda) \sigma_t^2}$.

Недоліками класичної та експоненціальної моделей є те, що випадковий гетероскедастичний процес спочатку апроксимується нормальним законом, а потім за апроксимацією визначається довірчий інтервал і відповідно квантиль. За такого підходу за межами апроксимації залишаються неврахованими “важкі хвости”, які викликають екстремальні втрати капіталу. Тому було прийнято рішення розробити в архітектурі ІТ методику, яка спирається на оцінки та прогноз параметрів випадкового процесу безпосередньо в динаміці змін курсів.

Оцінки та прогнози міри ризику зводяться до математичної задачі інтервального оцінювання флуктуацій випадкового процесу. В [5] показано, що ця задача зводиться до задачі визначення толерантних границь випадкового процесу у формі: $U_1 = \hat{x} - k\sigma$ та $U_2 = \hat{x} + k\sigma$, де \hat{x} – середнє значення параметра за вибіркою; σ – середньоквадратичне відхилення; коефіцієнт k – визначається як $k = k_\infty \left(1 + \frac{x_\gamma^2}{\sqrt{2n}} + \frac{5x_\gamma^2 + 10}{12n}\right)$. У свою чергу, k_∞ визначається

зі співвідношення $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 2\Phi_0(k_\infty) = P$, де P – частка вибірки, що повинна попасти в інтервал, заданий толерантними границями, і визначається з умови конкретної задачі. Оскільки $2\Phi_0(k_\infty)$ визначається з табличних даних, то, визначивши P , автоматично визначається і коефіцієнт k_∞ .

Подібним чином знаходиться коефіцієнт x_γ зі співвідношення $\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{x_\gamma}^{+\infty} e^{-\frac{t^2}{2}} dt = 0.5 - \Phi_0(x_\gamma) = 1 - \gamma$, де нормована функція Лапласа визнача-

ється з табличних значень. При заданій величині параметра γ для умов конкретної задачі обчислюється x_γ . При цьому γ визначає задану імовірність того, що доля P буде в межах толерантного інтервалу. Виходячи з економічних припущень щодо γ і P , побудований таким способом інтервал в межах $(u_1; u_2)$ визначає міру флуктуацій випадкового процесу. Тобто γ і P визначають випадкові границі $(u_1; u_2)$. У свою чергу, для зворотної задачі – змінюючи крок.

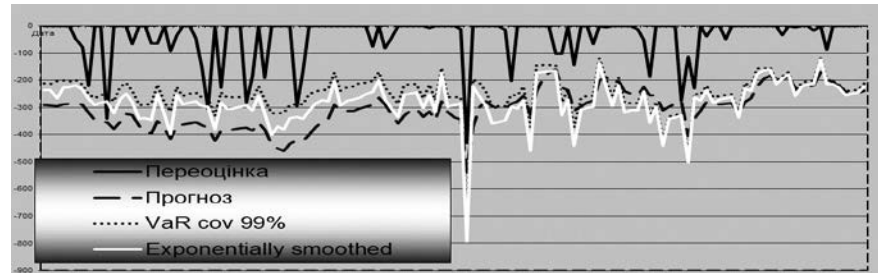


Рис. 4. Порівняння різних методів оцінки VaR

Таблиця 1

Результати розрахунку критеріїв порівняння

Моделі VaR	Кількість пробоїв	Недорезерв, грн	Перерезерв, грн	Оцінка критерію
Варіаційно-коваріаційна	1	27,66	34712,23	1,1328
Експоненціально згладжена	2	72,79	31470,48	1,0659
Евристична узагальнена	1	0,08022	33989,91	1,0497

З отриманих результатів можна зробити висновок, що варіаційно-коваріаційна модель та евристична дали однакову кількість пробоїв, а експоненціальна модель дала 2 пробої, але ця кількість вкладається у вимоги Базельського комітету: 4 пробої за 250 днів (брався проміжок в 130 днів). Найменший недорезерв показала евристична модель, а найбільший – експоненціальна модель. А з перерезервом навпаки, у експоненціальної моделі він найменший, а ось у моделі варіаційно-коваріаційного VaR – найбільший.

Згідно з оцінкою критеріїв, евристична модель – найкраща, бо її коефіцієнт дорівнював 1,0497 і є найменшим.

На останок побудуємо модель VaR з урахуванням волатильності на основі класичної моделі GARCH(p,q) та порівняємо її з моделлю варіаційно-коваріаційного VaR. Адже у періоди підвищеної ринкової турбулентності використання сталих значень волатильності призводить до недооцінки VaR. І навпаки, у періоди стабільного ринку використання завищеної волатильності у розрахунках призводить до переоцінки VaR. Будемо коригувати волатильність, використовуючи ковзну модель GARCH(8,8) з горизонтом 60 робочих днів. Для перевірки наявності гетероскедастичності у виборці даних використовувалася Q-статистика Льюнга-Бокса, яка обчислюється за формулою

$$Q = N(N+2) \sum_{i=1}^n \rho(i) / (N-i), \text{ де } n = N/4; \quad \rho(i) = \frac{\sum_{k=i+1}^N [\hat{\varepsilon}^2(k) - \hat{\sigma}_\varepsilon^2][\hat{\varepsilon}^2(k-i) - \hat{\sigma}_\varepsilon^2]}{\sum_{k=1}^N [\hat{\varepsilon}^2(k) - \hat{\sigma}_\varepsilon^2]}$$

рати залишків, у яких $\hat{\sigma}_\varepsilon^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{k=1}^N \hat{\varepsilon}^2(k)$; збурення $\hat{\varepsilon}(k) = \varepsilon(k)$ з моделі ARCH, N – число залишків після побудови моделі AR(p). Якщо значення $\hat{\varepsilon}^2(k)$ не корелюються між собою, то Q-статистика має розподіл χ^2 з n ступенями свободи. При цьому розрахунок волатильності відбувається за такою рекурентною формулою:

$$\sigma^2(k) = a_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon^2(k-i) + \sum_{i=1}^p \beta_i \sigma^2(k-i),$$

де константа a_0 – базова волатильність; ε – попередні зміни цін; q – порядок членів r^2 моделі GARCH, тобто зміни курсу, які впливають на волатильність; p – порядок членів σ^2 моделі ARCH; α_i – вагові коефіцієнти для визначення ступеня впливу змін на поточне значення волатильності. Тоді модель прогнозу на наступний крок матиме такий вигляд:

$$h(k) = a_0 + \sum_{i=1}^q \alpha_i \varepsilon^2(k-i) + \sum_{i=1}^p \beta_i h(k-i).$$

Хоча кількість пробів для даної моделі становить 6, на відміну від варіаційно-коваріаційної моделі VaR із горизонтом у 60 днів та 8 пробоями, проте точність прогнозу в моделі GARCH (8, 8) була не набагато більшою. Згідно з оцінкою критерію оптимальності модель GARCH (8, 8) є кращою. Проте порівнюючи дані моделі з евристичною моделлю, яка побудована на запропонованому підході, що коефіцієнти прогнозовної моделі адаптуються

до попередніх вибірок і використовуються в моделі для прогнозу на наступний крок, евристична модель дала меншу кількість пробоїв та виявилася найкращою за оцінкою критерію оптимальності, який рекомендований Базельським комітетом.

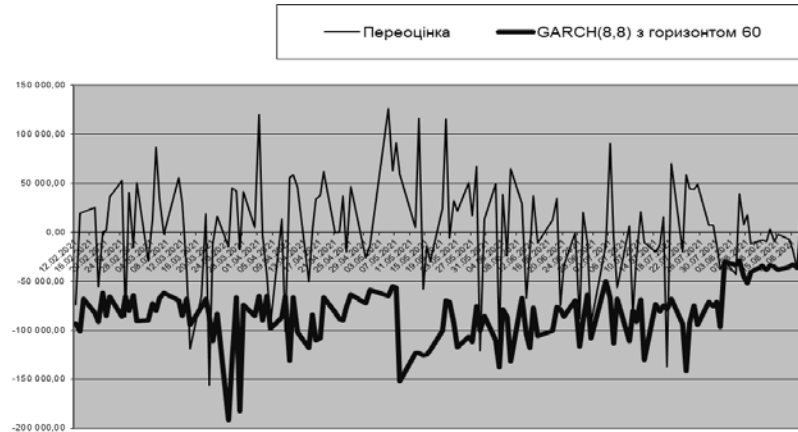


Рис. 5. Модель GARCH(8, 8) з горизонтом 60 робочих днів

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Використання ін'єкції залежностей у реалізації технології слабозв'язаних програмних компонентів інформаційної системи забезпечує імплементацію основного принципу SOLID – DIP через інверсію управління IoC. У статті детально розглянуто реалізацію DI через реалізацію IoC в проектуванні сучасних IT. На основі реалізованої IT з інкапсульованим механізмом DI для забезпечення слабозв'язаності між окремими компонентами SOA було виконано порівняння деяких параметричних методів VaR для оцінки і прогнозу ринкових ризиків. При цьому для побудови евристичної моделі було запропоновано власну методику оцінювання і прогнозу, яка спирається на оцінки та прогноз параметрів випадкового процесу безпосередньо в динаміці змін курсів. За результатами моделювання згідно з критерієм оптимальності, рекомендованим Базельським комітетом, евристична модель виявилася кращою. Поміж класичних моделей кращою була модель VaR з урахуванням волатильності.

У перспективі планується розглянути сучасні механізми безпеки в SOA, зокрема застосування блокчейн у фінансових операціях та його інтеграцію з корпоративною шиною Oracle, яка реалізує технологію слабозв'язаності на рівні даних SOA. Крім того, планується реалізувати запропоновану методику оцінки ринкових ризиків для інших параметричних методів VaR.

Список використаних джерел:

1. *Stevens Wayne P., Myers Glenford J., Constantine Larry LeRoy* (June 1974). Structured design. *IBM Systems Journal*. 13 (2). P. 115–139. doi:10.1147/sj.132.0115.
2. *Yourdon Edward, Constantine Larry LeRoy* (1979). *Structured Design: Fundamentals of a Discipline of Computer Program and Systems Design*. Yourdon Press. Bibcode: 1979sdfd. ISBN 978-0-13-854471-3.
3. *Philip A. Laplante*, What Every Engineer Should Know about Software Engineering. CRC Press, 2007. P. 105–106. ISBN 978-1-4200-0674-2.
4. *Лукашин Ю. П.* Прогнозирование временных рядов с помощью моделей авторегрессии-скользящего среднего первого и второго порядка. – Москва: ИМЭМО, 1983. С. 107.
5. *Браунли К. А.* Статистическая теория и методология в науке и технике. Москва: Наука, 1977. С. 407.
6. *Ульянова М.* Управление рыночным риском. Молодой ученый. 2014. № 1.2. С. 99–102.
7. *Mattsson Michael* (February 1996). Object-Oriented Frameworks, A survey of methodological issues. Department of Computer Science, Lund University. URL : <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.41.1127>

References:

1. *Stevens Wayne P., Myers Glenford J., Constantine Larry LeRoy* (June 1974). Structured design. *IBM Systems Journal*. 13 (2). С 115–139. doi:10.1147/sj.132.0115.
2. *Yourdon Edward, Constantine Larry LeRoy* (1979). *Structured Design: Fundamentals of a Discipline of Computer Program and Systems Design*. Yourdon Press. Bibcode: 1979sdfd. ISBN 978-0-13-854471-3.
3. *Philip A. Laplante*. What Every Engineer Should Know about Software Engineering. CRC Press, 2007. P. 105–106. ISBN 978-1-4200-0674-2.
4. *Lukashin Yu. P.* Prognozirovanie vremennykh ryadov s pomoshch'yu modo-ley avtoregressii-skol'zyashchego srednego pervogo i vtorogo poryadka. М.: ИМЭМО, 1983. С. 107.
5. *Braunli K. A.* Statisticheskaya teoriya i metodologiya v nauke i tekhnike. М.: Nauka, 1977. С. 407.
6. *Ul'yanova M.* Upravlenie rynochnym riskom. 2014. № 21.2. С. 99–102.
7. *Mattsson Michael* (February 1996). Object-Oriented Frameworks, A survey of methodological issues. Department of Computer Science, Lund University. URL: <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.41.1127>

Ульяновська Ю. В., кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів

Яковенко В. О., доктор технічних наук, доцент, професор кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів

Мала Ю. А., кандидат технічних наук, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів

Яковенко Т. Ю., кандидат економічних наук, доцент, доцент кафедри комп'ютерних наук та інженерії програмного забезпечення Університету митної справи та фінансів

Авілова В. О., Junior Frontend Developer, Loorpe, Дніпро

ВИЗНАЧЕННЯ СТУПЕНЯ РИЗИКУ ВИНИКНЕННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ НА ОСНОВІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У дослідженні проаналізовано існуючі методи визначення ризиків виникнення аварійних ситуацій. Авторами запропонована модифікація методу оцінки ризиків виникнення небезпечних ситуацій на виробництві. Метод базується на теорії нечітких множин і понятті лінгвістичної змінної. Такий підхід дає можливість адаптувати його до будь-яких виробництв шляхом зміни критеріїв і назв вхідних змінних. Для моделювання системи було використано Fuzzy Logic Toolbox – пакет розширення MATLAB. У статті зроблено висновок, що визначення ступеня ризику будь-якого виробництва дає можливість сформулювати відповідний до ступеня ризику комплекс дій, спрямованих на запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Ключові слова: надзвичайна ситуація; ризик; ймовірність; нечітка логіка; лінгвістичні змінні.

© Ю. В. Ульяновська, В. О. Яковенко, Ю. А. Мала,
Т. Ю. Яковенко, В. О. Авілова, 2021

The study analyzes existing methods for determining the risk of accidents. The authors propose a modification of the method of assessing the risks of dangerous situations at work. The method is based on the theory of fuzzy sets and the concept of linguistic variable. This approach makes it possible to adapt it to any production by changing the criteria and names of input variables. Fuzzy Logic Toolbox, a MATLAB extension package, was used to model the system. The paper concludes that determining the degree of risk of any production makes it possible to form an appropriate to the degree of risk set of actions aimed at preventing emergencies.

Key words: *emergency situation; risk; probability; fuzzy logic; linguistic variables.*

Постановка проблеми. Україна належить до країн з високим рівнем ризику техногенних аварій і катастроф. Найбільша кількість потенційно небезпечних об'єктів (ПНО) експлуатується в хімічній, оборонній промисловості, енергетиці, транспорті та будівництві. Сучасний стан безпеки в Україні гірший у порівнянні з іншими європейськими країнами.

Ступінь ризику отримати травму або загинути в Україні на одну-дві сходинок вища, ніж у країнах Центральної та Західної Європи. З метою уніфікації всі наслідки прояву небезпек розглядають як шкоду. Кожний вид шкоди має своє кількісне вираження. Показовим кількісним способом визначення шкоди вважається вартісний спосіб. У цьому випадку шкода визначається у грошовому еквіваленті. Друга, не менш важлива характеристика небезпеки, точніше, міра можливої небезпеки – це частота її прояву.

Універсальною характеристикою небезпеки, яка охоплює ймовірність реалізації небезпеки та можливу шкоду від прояву небезпеки, є ризик. Залежно від джерел небезпеки ризику можуть бути техногенними, природними, соціально-політичними та комбінованими. Природний ризик пов'язаний з імовірністю прояву несприятливих природних явищ; соціально-політичний – небезпечних дій інших людей. Техногенний ризик виникає в результаті аварій на АЕС, танкерах, небезпечних хімічних об'єктах і під час руйнування гребель водоймищ. Згідно з ДСТУ 2293-99 ризик (R) – це ймовірність заподіяння шкоди з урахуванням її тяжкості.

Ризик надзвичайної ситуації (НС) – кількісна міра можливості реалізації небезпек і загроз техногенного, природного, біолого-соціального та іншого характеру, що обумовлює виникнення й розвиток НС. В якості кількісної характеристики ризику використовується ймовірність або частота виникнення аварій і катастроф, небезпечних природних явищ, біолого-соціальних подій та інших джерел НС в комплексі з математичним очіку-

ванням збитку, що завдається населенню, навколишньому середовищу, господарсько-економічним та іншим об'єктам під час реалізації небезпек і загроз [1].

Підвищення ступеня захищеності населення і територій України від НС, зменшення ризиків виникнення та мінімізація наслідків НС техногенного і природного характеру належить до пріоритетних завдань єдиної державної системи цивільного захисту [2].

Сучасні механізми управління ризиками, спрямовані на зменшення їх значень, не набули широкого практичного застосування. Так, кількісна оцінка ризиків використовується лише в окремих галузях, а саме під час аналізу безпеки атомних електричних станцій, декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Водночас недосконалі нормативно-правові, організаційні та технічні методи управління ризиками не дають змоги досягти рівнів ризиків, що відповідають рівням економічно розвинутих держав.

Ресурси, що нині витрачаються Україною на ліквідацію наслідків НС техногенного і природного характеру, на кілька порядків перевищують видатки, що виділяються на забезпечення техногенної та природної безпеки. Однією з головних причин низького рівня безпеки населення, територій, соціальних, техногенних і природних об'єктів в Україні є слабкість державної політики, спрямованої на посилення превентивної діяльності у сфері забезпечення техногенної та природної безпеки. Щоб подолати підвищення рівня ризику стихійних природних явищ, обумовлених глобальним потеплінням клімату, зростанням сейсмічної активності, розширенням озонових дірок тощо, а також інтенсифікацією впливу техногенної діяльності людства на навколишнє природне середовище та наявність значної кількості небезпечних техногенних об'єктів на території України, необхідно негайне впровадження системи управління ризиками.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Проведений аналіз наукових джерел засвідчив, що існує багато підходів до оцінки небезпек НС та ризику їх виникнення. Так, Г. Хміль [3] пропонує визначення комплексної оцінки техногенної та природної безпеки в регіональному вимірі на основі методів системного аналізу та інтегральних показників ризику. Проведені автором дослідження свідчать, що кількісна порівняльна оцінка техногенної та природної безпеки регіонів необхідна для управління безпекою населення шляхом видачі рекомендацій щодо оптимального розподілу матеріальних і фінансових ресурсів між регіонами на запобігання НС та зниження ризиків їх виникнення під час розробки державних і регіональних програм, спрямованих на підвищення безпеки населення в найбільш уразливих регіонах. Г. В. Іванець [5] здійснив аналіз основних факторів, які, на його думку, впливають на стан безпеки виникнення НС і зазначив, що порівняльні оцінки небезпечних факторів різних регіонів України суттєво різняться, це

зумовлено розвитком їхнього промислового комплексу, природно-ресурсним потенціалом, екологічною і соціальною ситуацією. П. Г. Беловим [6] розроблено показники оцінки стану небезпеки території та зроблена спроба її розподілу відповідно до декількох рівнів небезпек окремо для НС техногенного та природного характеру. Регіональні особливості, які впливають на стан техногенної та природної безпеки, ризик виникнення НС досліджені недостатньо, тому потребують подальшого аналізу.

Аналіз ризику полягає у побудові множини всіх сценаріїв виникнення й розвитку можливих аварій на об'єкті з подальшою оцінкою частот реалізації та визначенням масштабів їх наслідків. Результати аналізу ризику використовуються під час декларування, експертизи, страхування промислової безпеки небезпечних виробничих об'єктів; економічного аналізу безпеки за критеріями “вартість-безпека-вигода”; оцінки впливу господарської діяльності об'єктів на навколишнє природне середовище та в інших процедурах, пов'язаних з аналізом безпеки [6].

Мета статті – побудова методу чисельної оцінки ризику виникнення аварії на основі аналізу окремих характеристик шкідливих факторів та умов виробництва з використанням математичного апарату нечіткої логіки.

Виклад основного матеріалу. В сучасній вітчизняній та закордонній практиці для формалізації ризику R широко використовується модель, що пов'язує між собою ймовірність виникнення негативної події P (аварії, катастрофи) і величину можливих наслідків W у результаті реалізації цієї події, а саме [7]:

$$R = P \cdot W. \quad (1)$$

Наявна в цій моделі ймовірність P чисельно виражає міру можливості здійснення тієї чи іншої негативної події A , пов'язаної з невизначеною ситуацією, а величина очікуваних наслідків W внаслідок реалізації негативної події A залежить не тільки від можливих втрат (кількості загиблих, поранених, матеріальних втрат), але й від ступеня вразливості об'єкта, території для події A , тобто

$$W(A) = V(A) \cdot U(A), \quad (2)$$

де $W(A)$ – величина можливих наслідків реалізації події A ;

$V(A)$ – ступінь уразливості об'єкта для події A ;

$U(A)$ – повний збиток внаслідок реалізації події A . Таким чином, підставляючи вираз (2) у формулу (1), отримуємо таку модель для визначення рівня ризику:

$$R(A) = P(A) \cdot V(A) \cdot U(A), \quad (3)$$

де $R(A)$ – ризик негативної події A ;

$P(A)$ – ймовірність реалізації негативної події A ;

$V(A)$ – ступінь уразливості об'єкта до події A ;

$U(A)$ – умовний повний збиток під час реалізації події A .

Отже, формула (3) є загальною для всіх типів ризиків, які характеризуються своїми масштабами прояву. Але під час її практичного використання в кожному конкретному випадку може виникнути необхідність внесення відповідних уточнень.

Загальноприйнятою для кількісного виміру небезпек є “шкала”, у якій в якості вимірювання використовуються одиниці ризику. У загальному випадку ризик виражається у вигляді добутку частоти реалізації небажаної події на масштаб певного виду наслідків. При цьому під збитком можна розуміти не тільки прямий збиток від зруйнованого промислового об'єкта, але й кількість потенційних смертельних випадків серед людей у результаті виникнення або аварійних ситуацій, природних катастрофічних явищ. Найпоширенішою характеристикою небезпеки є індивідуальний ризик – частота враження окремого індивідуума (людини) у результаті впливу досліджуваних факторів небезпеки [6].

Кількісно індивідуальний ризик виражається відношенням кількості постраждалих людей до загальної кількості тих, хто ризикує, за певний період часу. Колективний ризик – очікувана кількість уражених (травмованих або загиблих) у результаті можливих аварій за певний період часу. Соціальний ризик – залежність частоти виникнення подій F , в яких постраждало на певному рівні не менше N людей.

В умовах виробництва для визначення рівня індивідуального ризику слід ураховувати природу аварії, частку часу перебування в “зоні ризику” та місцезнаходження тих, хто ризикує. У зв'язку з цим індивідуальний ризик розраховується за формулою [6]:

$$R_{ind} = \sum_{i=1}^n Q_i Q_{ni} P_{np}, \quad (4)$$

де R_{ind} – індивідуальний ризик, 1/рік;

Q_i – частота реалізації i -го сценарію протягом року, 1/рік;

Q_{ni} – умовна ймовірність ураження людини при реалізації i -го сценарію аварії;

P_{np} – ймовірність присутності людини в зоні дії уражальних факторів i -го сценарію аварії (0÷1);

n – кількість сценаріїв аварії.

Імовірність присутності персоналу в зоні дії уражальних факторів можливої аварії визначається за формулою:

$$P_{np} = \frac{\tau_i N_i}{T}, \quad (5)$$

де τ_i – час знаходження працюючого в межах зон уражаючих факторів в одну зміну, год;

T – кількість годин на рік;

n – кількість робочих змін на рік.

Колективний ризик розраховується за формулою:

$$R_{кол} = \sum_{i=1}^n Q_i N_i, \quad (6)$$

де $R_{кол}$ – колективний ризик, чол./рік;

Q_i – ймовірність реалізації i -того сценарію аварії протягом року;

N_i – кількість загиблих під час реалізації i -того сценарію аварії.

Середній індивідуальний ризик розраховується за формулою:

$$R_{cp} = \frac{R_{кол}}{N_i}, \quad (7)$$

де R_{cp} – середній індивідуальний ризик, 1/рік;

N_i – кількість персоналу, що піддається ризику, люд.

Соціальний ризик під час аварії з пожежами та вибухами на зовнішній технологічній установці S (1/рік) визначається за формулою:

$$S = \sum_{i=1}^n Q(A_i), \quad (8)$$

де n – кількість сценаріїв, для яких виконується умова $N_i \geq N_0$;

N_i – кількість летальних випадків у результаті реалізації i -го сценарію (події);

N_0 – кількість летальних випадків, для якої оцінюють величину соціального ризику.

Вітчизняні експерти вважають, що для України ризик виникнення аварій безпосередньо залежить від трьох груп чинників і описується регресійним рівнянням [8]:

$$R = 6,77 - 0,56 \cdot x_1 - 0,43 \cdot x_2 - 0,27 \cdot x_3, \quad (9)$$

де x_1 – ефективність екологічної політики місцевих органів влади;

x_2 – капітальні вкладання в ресурсозберігаюче та природоохоронне устаткування;

x_3 – ефективність реалізації екологічних державних програм.

Ризик може бути визначений як частота (розмірність зворотна часові 1/с) або можливість (ймовірність) виникнення події (величина без розміру, лежить у межах $0 \div 1$).

Оцінити ризик можна як відношення кількості тих чи інших несприятливих наслідків (n) до їх імовірної кількості (N) за визначений період часу:

$$R = \frac{n}{N}, \quad (10)$$

де R – ризик несприятливих наслідків;

n – кількість несприятливих подій;

N – загальна кількість імовірних подій.

Кількісно величина ризику дорівнює частоті небажаних наслідків під час дії певного вигляду. За статистичними даними, ризик R за період часу t існування небезпеки протягом року із загальною тривалістю спостереження T визначається з урахуванням кількості небажаних наслідків n за період спостережень до їх можливої кількості

$$R = \frac{n}{N} \times \frac{t}{T}. \quad (11)$$

Перший співмножник відображає вірогідність виникнення небажаних наслідків за рік, а другий – відносну тривалість існування небезпеки протягом року. Одиниця вимірювання ризику – 1/рік (може бути 1/год та ін.). Також існує припустимий рівень ризику – це ймовірність події, негативними наслідками якої на даному етапі розвитку можна знехтувати. Розрізняють індивідуальний припустимий рівень ризику та соціальний припустимий рівень ризику.

Схему аналізу аварійного ризику, що включає всі основні процедури аналізу ризику, зображено на рис. 1 [15].

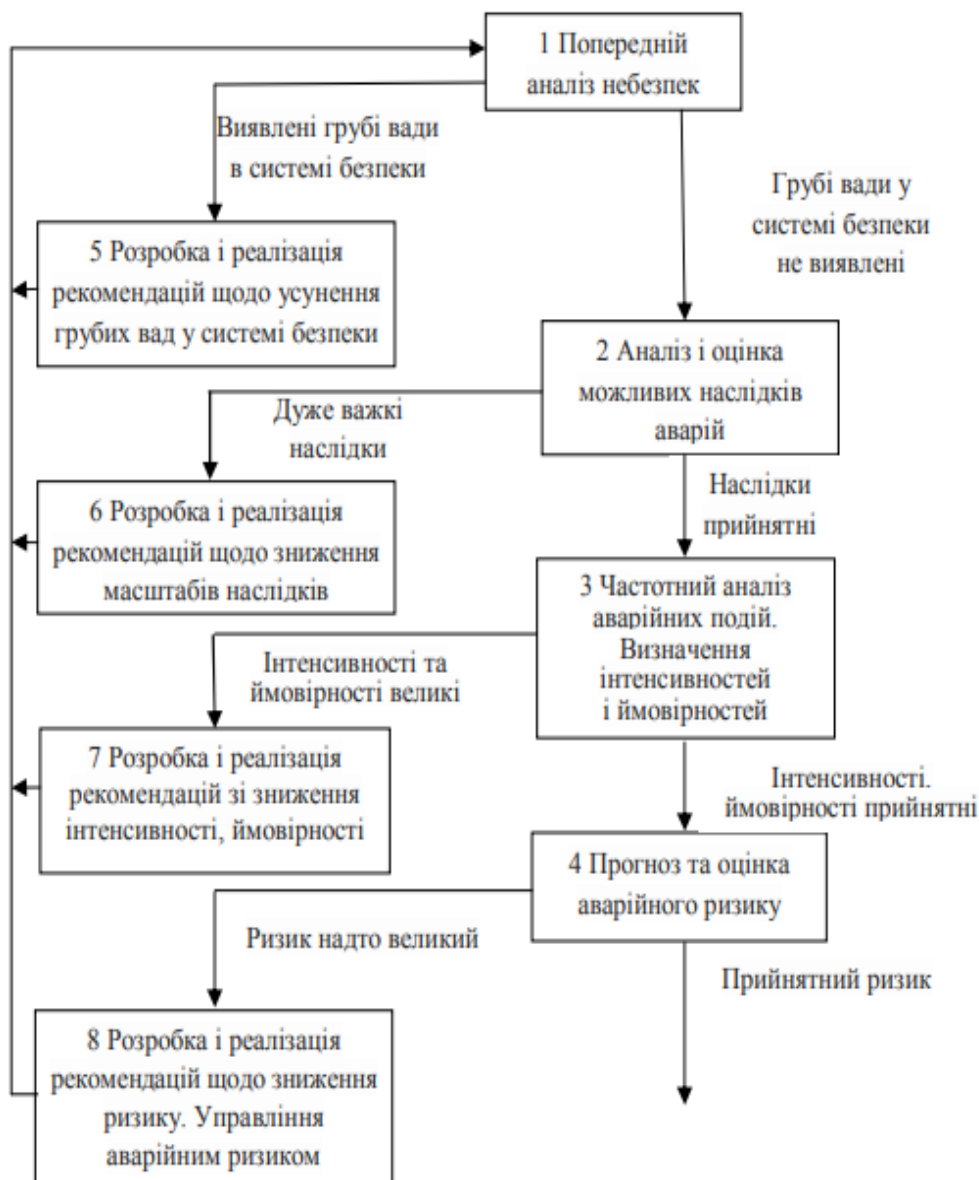


Рис. 1. Блок-схема аналізу аварійного ризику

У дослідженні [6] для усунення недоліків методик аналізу та оцінки ризиків пропонується використовувати нечітку логіку, застосування якої ефективно в таких випадках: недостатність знань про досліджувану систему; неможливість отримання необхідного обсягу інформації; інформація, що

ґрунтується на експертних даних, вхідні дані некоректно представлені або не досить точні. Для створення методики оцінки ризиків необхідно розробити експертну систему, яка була б реалізована у вигляді системи нечіткого виведення і уможлиблює визначати величину ризику на основі суб'єктивних оцінок усіх рівнів безпеки.

Механізм нечіткого виведення є основною ланкою в методиці отримання оцінки ризику. Системи нечіткого виведення призначені для перетворення значень вхідних змінних процесу управління у вихідні змінні на основі використання нечітких правил продукцій. Для цього системи нечіткого виведення мають містити базу правил нечітких продукцій і реалізовувати нечітке виведення висновків на основі посилянь або умов, представлених у формі нечітких лінгвістичних висловлювань.

В Україні порядок визначення ризику на об'єктах підвищеної небезпеки регламентується відповідною методикою [10], незважаючи на розроблену методику визначення ризику на всіх етапах його аналізу, потребує вдосконалення відповідно до предметної області.

Алгоритм виявлення, оцінки та зменшення техногенних ризиків.

У Рекомендаціях щодо побудови, впровадження та вдосконалення системи управління охороною праці запропоновано алгоритм виявлення, оцінки та зменшення ризиків виникнення небезпечних ситуацій на виробництві [11] в якому задані параметри нечіткі і формулюються в лінгвістичних термінах. Тому є необхідність модифікації заданого алгоритму із застосуванням відповідно до Методики методу експертного оцінювання та математичного апарату нечіткої логіки.

Рішення поставленої задачі було виконано за допомогою методів нечіткої логіки. Для моделювання системи використовується пакет Fuzzy Logic Toolbox – пакет розширення MATLAB, що містить інструменти для проектування систем нечіткої логіки. Використовуючи алгоритм нечіткого виведення Мамдані, були отримані оцінки ризику. Для оцінки ризиків необхідно задати вхідні змінні, якими є фактори ризику [6]. У дослідженні [6] система нечіткої логіки будується для конкретного вражаючого фактора – хлору, що звужує її можливості.

За вхідні змінні візьмімо фактори, які отримані в результаті дослідження предметної області, а саме:

- критерії надійності системи безпеки та запобігання виникненню аварій (НСБ), до яких можуть належати системи сигналізації, моніторингу, тощо;
- категорії наслідків витоку небезпечних хімічних речовин (*Кн*);
- ступінь фізичної зношеності основних виробничих фондів (*Зн*).

Тоді в загальному ризик є функцією від трьох змінних:

$$P = P (HCB, Kn, Zn). \quad (12)$$

Кожна вхідна змінна оцінюється числом з інтервалу [0; 1]. За цією ж шкалою буде проведено також оцінку ступеня ризику. Це уможливить використовувати уніфіковану систему нечіткої логіки для будь-яких предметних областей.

Зазначені змінні є лінгвістичними. Сформулюємо для них термножину значень:

$HCB = \{\text{низька, задовільна, висока}\};$

$Kn = \{\text{категорія 1, категорія 2, категорія 3, категорія 4, категорія 5}\};$

$Zn = \{\text{слабка, середня, сильна}\};$

$P = \{\text{висока, вище середньої, середня, нижче середньої, низька}\}.$

Для оцінки першої із вхідних змінних складемо таблицю критеріїв надійності системи безпеки життєдіяльності (табл. 1).

Таблиця 1

Критерії надійності системи безпеки

Надійність	Критерій	Шкала від 0 до 1
Низька	Система не відповідає необхідним умовам безпеки	0–0,45
Задовільна	Система, в цілому, відповідає вимогам безпеки, але потребує вдосконалення	0,45–0,75
Висока	Система, яка повністю інтегрована в процес діяльності підприємства, відповідає усім вимогам нормативних документів та стандартів	> 0,75

Для завдання функцій належності використовується трапецоїдна і трикутна форма. Графічний інтерфейс редактора функцій належності після завдання вхідної змінної “надійність” зображено на рис. 2.

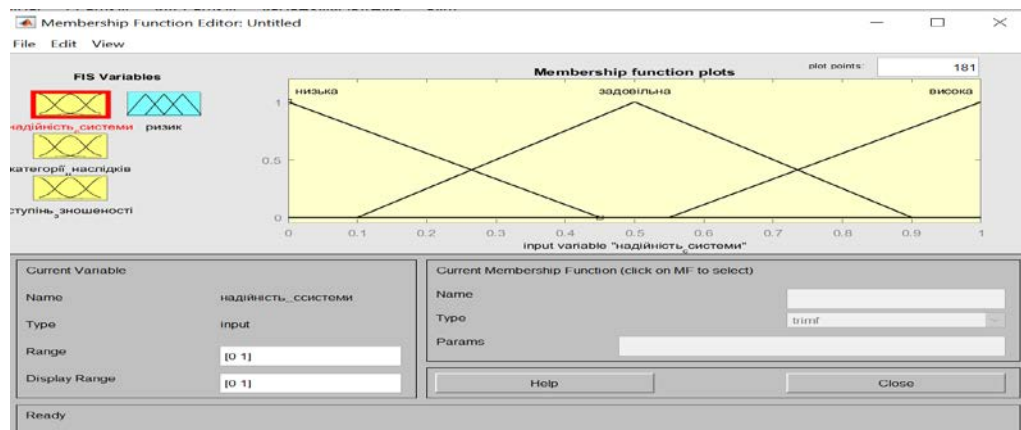


Рис. 2. Функції належності вхідної змінної “Надійність системи”
 В табл. 2 наведено категорії наслідків витоку небезпечних речовин.

Таблиця 2

Категорії наслідків витоку небезпечних речовин

Категорія	Критерій	Шкала від 0 до 1
Категорія 1	Концентрація небезпечних речовин не перевищує норму і в разі витоку не завдасть шкоди людям	0–0,12
Категорія 2	Концентрація НХР може досягати незначного перевищення норми на короткі проміжки часу підвищеної концентрації і в разі витоку тільки з малою вірогідністю завдасть лише незначних пошкоджень	0,12–0,37
Категорія 3	Концентрація не перевищує деякого порогового значення і в разі витоку завдасть лише незначних пошкоджень	0,37–0,62
Категорія 4	Концентрація не перевищує критичного значення і в разі витоку завдасть пошкодження матеріальним цінностям з низькою ймовірністю смертельного результату	0,62–0,87
Категорія 5	Концентрація перевищує гранично допустимий рівень і в разі витоку з високою ймовірністю (припустимо, 50 %) призведе до смертельних наслідків	0,87–1

Графічний інтерфейс редактора функцій належності категорій наслідків витоку небезпечних хімічних речовин зображено на рис. 3.

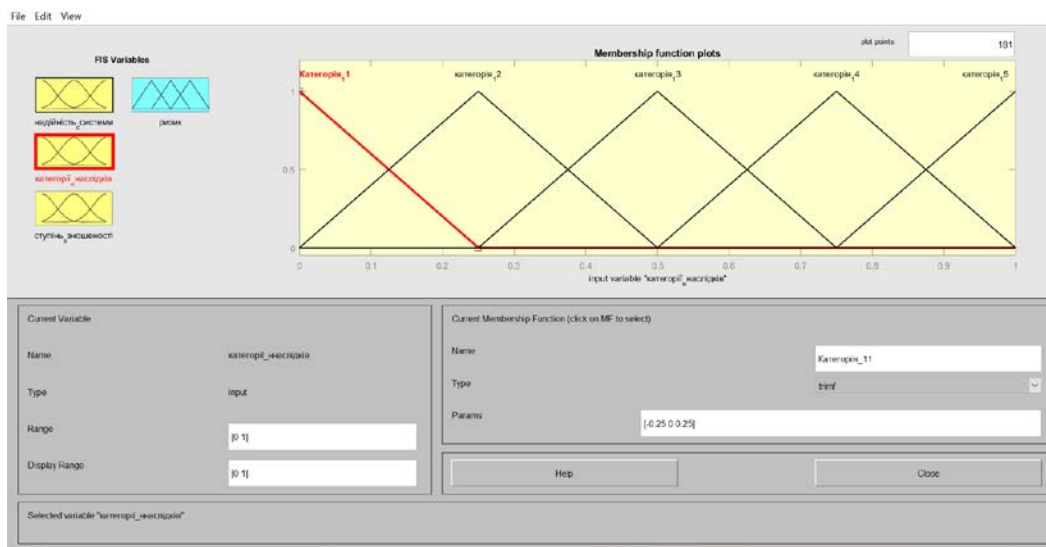


Рис. 3. Графічний інтерфейс редактора функцій належності “Категорій наслідків”

Розглянемо вхідну змінну “Ступінь фізичної зношеності основних виробничих фондів” (табл. 3). Графіки функцій належності зображено на рис. 4.

Таблиця 3

Категорія	Критерій	Шкала від 0 до 1 (0–100 %)
Слабка	Нове обладнання та устаткування (до закінчення гарантійного терміну)	До 0,25 (25 %)
Середня	Після закінчення гарантійного терміну, але робочий стан не призводить до порушень у технологічному процесі	Від 0,25–0,75 (25–75 %)
Сильна	Стан обладнання призводить до порушень технологічного процесу	Від 0,75–1 (75–100 %)

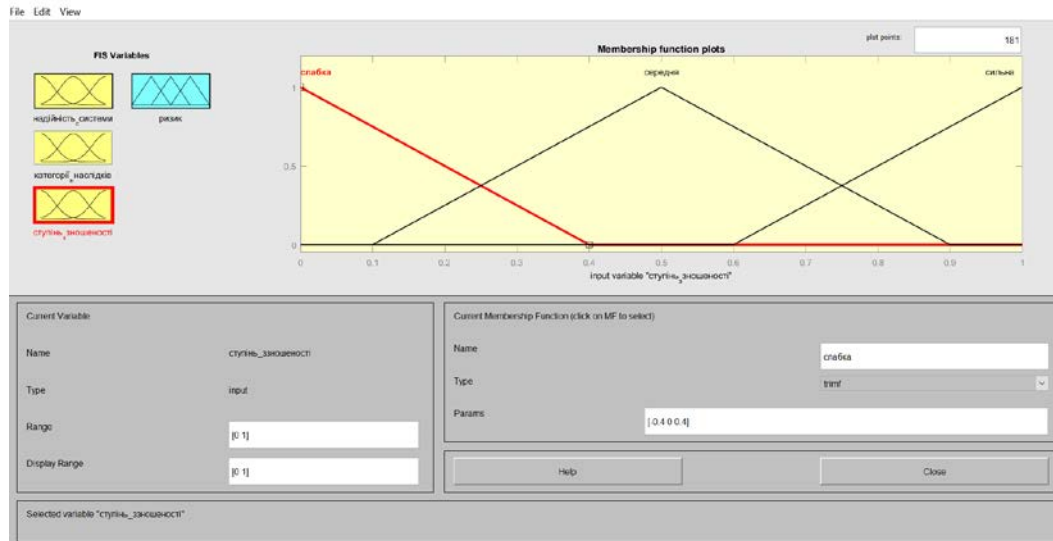


Рис. 4. Графіки функцій належності лінгвістичної змінної “Ступінь зношеності”

Вихідна змінна “ризик” була оцінена за такими параметрами (табл. 4).

Таблиця 4

Критерії ризиків

Категорія	Критерій
Високий	Є висока ймовірність смертельних випадків на заводі і прилеглий території
Вище середнього	Низька ймовірність смертельних випадків, але висока ймовірність шкоди
Середній	Залишається ймовірність легких пошкоджень для здоров'я
Нижче середнього	Немає ризику смерті або шкоди для здоров'я
Низький	Повна відсутність ризику

Для формування системи нечіткого виведення було складено 12 правил (формулюються з урахуванням результатів експертного аналізу):

1. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Низька> і <НАСЛІДКИ ВИТОКУ відповідають Категорії 5>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Середній>, тоді <Ризик високий>.

2. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Середня> і <Наслідки витoku відповідають Категорії 5>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Сильний>, тоді <Ризик Високий>.

3. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Висока> і <НАСЛІДКИ ВИТОКУ відповідають Категорії 5>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Середній>.

4. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Низька> і <НАСЛІДКИ ВИТОКУ відповідають Категорії 4>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Вище середнього>.

5. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Середня> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 4>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Середній>.

6. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Висока> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 4>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Середній>, тоді <Ризик Низький>.

7. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Низька> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 3>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Середній>.

8. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Середня> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 3>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Нижче середнього>.

9. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Висока> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 3>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Середній>, тоді <Ризик Високий>.

10. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Середня> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 2>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Нижче середнього>.

11. Якщо <НАДІЙНІСТЬ Висока> і <Наслідки витоку відповідають Категорії 2>, і <СТУПІНЬ ЗНОШЕНОСТІ Слабкий>, тоді <Ризик Низький>.

12. Якщо <Наслідки витоку відповідають Категорії 1>, тоді <Ризик Низький>.

Нечітка поверхня зображена на рис. 6.

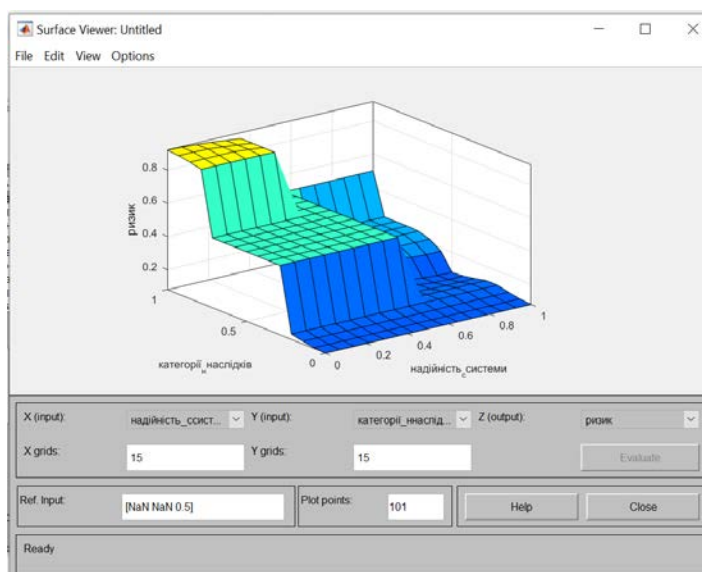


Рис. 6. Поверхня нечіткої системи логічного висновку

Припустімо, що комісія експертів, вивчивши операційну діяльність заводу, оцінила наслідки витоку ризику в 87 (0,87) балів зі 100, що відповідає категорії 4, надійність системи безпеки була оцінена в 20 (0,2) балів зі 100, що потрапляє в клас низької надійності системи, а ступінь зношеності коефіцієнтом 0,2. Відповідно до сформульованих правил, а також застосовуючи алгоритм нечіткого висновку Мамдані, була отримана вихідна оцінка ризику, що дорівнює 0,635 балів (рис. 7).

Підбиваючи підсумок, алгоритм визначення ризику настання аварійної ситуації можна подати такою послідовністю кроків:

1-й етап: виявлення можливості виникнення небезпечних ситуацій під час здійснення виробничої діяльності з урахуванням їх можливих дій. Процедура передбачає всебічний розгляд технологічного процесу з погляду безпечності та нешкідливості з урахуванням усіх аспектів та виявлення шкідливих і небезпечних виробничих факторів, які існують у виробничому середовищі й можуть призвести до небезпечної події.

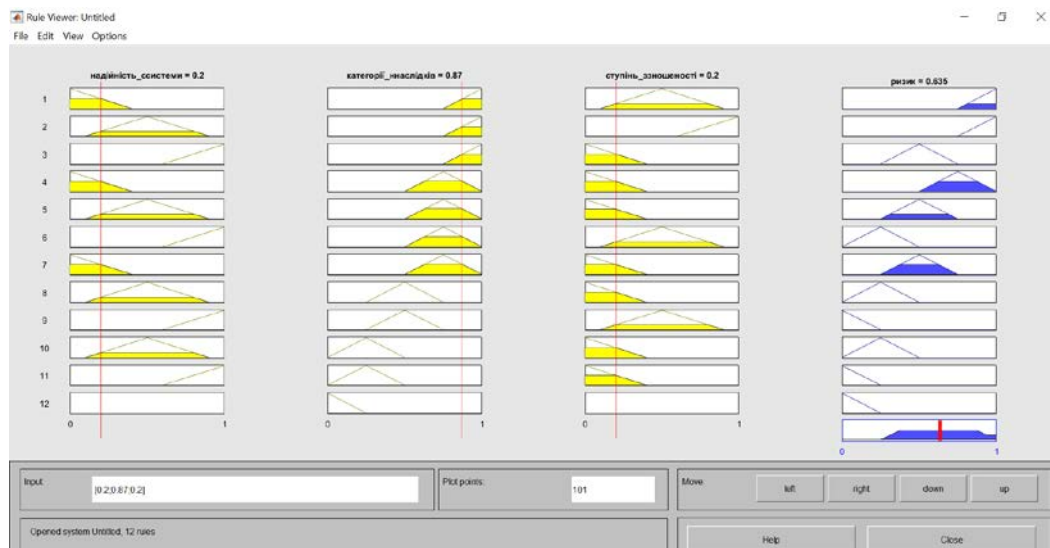


Рис. 7. База правил

2-й етап: визначення ступеня базового ризику виникнення небезпечних ситуацій. Ступінь базового ризику виникнення небезпечної ситуації визначається за побудованою системою нечіткого логічного висновку типу Мамдані з трьома входами і одним виходом.

3-й етап: на основі визначеного на попередньому етапі ризику розробка плану заходів відповідно до табл. 5.

План заходів відповідно до ступеня ризику

Ступінь ризику	Коментарі
Екстремальний (55–75)	Потребує невідкладних дій вищого керівництва із обов'язковим складанням плану заходів та призначенням відповідальних осіб. За необхідності – зупинка ведення робіт
Високий (25–54)	Потребує уваги вищого керівництва. Терміново поінформувати працівників та їх безпосередніх керівників, керівника відповідного підрозділу та начальника служби охорони праці. Вжити заходів щодо забезпечення безпеки працівників
Середній (10–24)	Поінформувати працівників та безпосередніх керівників, керівника відповідного підрозділу та начальника служби охорони праці. Вжити заходів щодо зменшення ризику
Низький (1–9)	Здійснюється управління шляхом виконання наявних процедур. Не потребує додаткових ресурсів. Поінформувати керівника підрозділу та начальника служби охорони праці після закінчення робіт щодо визначення ступеня ризику

4-й етап: після впровадження запланованих заходів необхідно провести оцінку залишкового ризику. Слід визначити, чи став припустимим ступінь ризику виникнення небезпечної ситуації, тобто чи досягли впроваджені заходи очікуваного ефекту.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. У статті проаналізовано існуючі методики визначення ризику, виділено необхідні етапи визначення ступенів ризику виникнення аварійних ситуацій.

Розглянуто алгоритм виявлення оцінки та зменшення ризиків виникнення небезпечних ситуацій на виробництві в рамках удосконалення системи управління охороною праці, які розроблені з метою сприяння суб'єкту господарювання щодо досягнення рівня охорони праці на виробництві, що відповідає мінімальним вимогам до забезпечення безпечних та здорових умов праці найманих працівників, які встановлені законодавчими та іншими нормативно-правовими актами з охорони праці.

На основі способів та методів визначення ризиків було розроблено метод визначення ступенів ризику виникнення аварійних ситуацій на підприємствах. Запропонований метод орієнтовано на хімічні виробництва, які

працюють з хімічними речовинами, що можуть створювати загрозу навколишньому середовищу та життю людей.

Метод базується на теорії нечітких множин і понятті лінгвістичної змінної. Такий підхід дає можливість адаптувати його до будь-яких виробництв шляхом зміни критеріїв і назв вхідних змінних.

Визначення ступеня ризику будь-якого виробництва уможливило сформулювати відповідний до ступеня ризику комплекс дій, спрямованих на запобігання виникненню аварійних ситуацій.

Список використаних джерел:

1. Бікулова М. А. Аналіз ризиків виникнення надзвичайної ситуації на підприємствах нафтопереробки // Молодий вчений. 2019. № 51 (289). С. 223–228.
2. Дранишников Л. В. Оцінка ризиків виникнення надзвичайних ситуацій при розгерметизації ємностей зріджених вуглеводневих газів // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. 2019. Вип. 2. С. 114–120.
3. Хміль Г. Комплексна оцінка техногенної та природної безпеки України в регіональному вимірі // Надзвичайна ситуація. 2005. № 5. С. 52–55.
4. Іванець Г. В. Аналіз стану техногенної, природної та соціальної небезпеки адміністративно-територіальних одиниць України на основі моніторингу // Збірник наукових праць Харківського університету повітряних сил. 2016. Вип. 3 (48). С. 142–145.
5. Белов П. Г. Системный анализ и моделирование опасных процессов в техносфере. Москва : Академия, 2003. 512 с.
6. Дранишников Л. В., Сугаль Є. О. Оцінка зовнішнього ризику за допомогою нечіткої логіки // Математичне моделювання. 2017. № 2. С. 63–66.
7. Ткаченко І. О. Ризики у транспортних процесах: навч. посібник / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2017. 114 с.
8. Стищенко Т. Є., Пронюк Г. В., Сердюк Н. М., Хондак І. І. Безпека життєдіяльності: навч. посібник. Харків: ХНУРЕ, 2018. 336 с.
9. Дранишников Л. В. Інформаційний аналіз аварійного ризику об'єктів підвищеної небезпеки // Збірник наукових праць Дніпровського державного технічного університету. Технічні науки. 2017. Вип. 1. С. 137–143.
10. Методика визначення ризиків та їх прийнятних рівнів для декларування безпеки об'єктів підвищеної небезпеки. Затверджено наказом Міністерства праці та соціальної політики України 04.12.2002 № 637. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02#Text>
11. Рекомендації щодо побудови, впровадження та удосконалення системи управління охороною праці. Державний Комітет України з промислової безпеки, охорони праці та гірничого нагляду. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/n0001641-08#Text>

References:

1. Bikulova M. A. (2019). Analiz ryzykiv vynyknennia nadzvychainoi sytuatsii na pidpriemstvakh naftopererobky. *Molodyi vchenyi*, (№ 51(289), 223–228 [in Ukrainian].
2. Dranyshnykov L. V. (2019). Otsinka ryzykiv vynyknennia nadzvychainykh sytuatsii pry rozghermetyzatsii yemnosti zridzhenykh vuhlevodnevykh haziv. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Tekhnichni nauky*. (Vyp. 2.), 114–120 [in Ukrainian].
3. Khmil H. (2005). Kompleksna otsinka tekhnohennoi ta pryrodnoi bezpeky Ukrainy v rehionalnomu vymiri. *Nadzvychaina sytuatsiia*, (№ 5), 52–55. [in Ukrainian].
4. Ivanets H. V. (2016). Analiz stanu tekhnohennoi, pryrodnoi ta sotsialnoi nebezpeky administratyvno-terytorialnykh odynyt Ukrainy na osnovi monitoryngu. *Zbirnyk naukovykh prats Kharkivskoho universytetu Povitrianykh Syl*, (vyp. 3(48), 142–145 [in Ukrainian].
5. Belov P. G. (2003). *Sistemnyj analiz i modelirovanie opasnykh processov v tehnosfere*. Moskva: Akademiya [in Russian].
6. Dranyshnykov L. V., Suhail Ye. O. (2017). Otsinka zovnishnogo ryzyku za dopomohoiu nechitkoi lohiky. *Matematychni modeliuvannia*, (№ 2), 63–66 [in Ukrainian].
7. Tkachenko I. O. (2017). *Ryzyky u transportnykh protsesakh: navchalnyi osibnyk*. Kharkiv: Natstsionalnyi universytet miskoho hospodarstvava im. O. M. Beketova [in Ukrainian].
8. Stytsenko T. Ie., Proniuk H. V., Serdiuk N. M., Khondak I. I. (2018). «Bezpeka zhyttiediialnosti»: navchalnyi posibnyk. Kharkiv: KhNURE [in Ukrainian].
9. Dranyshnykov L. V. (2017). Informatsiinyi analiz avariinoho ryzyku obiektiv pidvyshchenoi nebezpeky. *Zbirnyk naukovykh prats Dniprovskoho derzhavnogo tekhnichnogo universytetu. Tekhnichni nauky*. (Vyp. 1), 137–143 [in Ukrainian].
10. *Metodyka vyznachennia ryzykiv ta yikh pryiniatnykh rivniv dlia deklaruvannia bezpeky obiektiv pidvyshchenoi nebezpeky. Zatverdzheno Nakazom Ministerstva pratsi ta sotsialnoi polityky Ukrainy 04.12.2002. № 637*. (2002). Vylucheno: URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0637203-02#Tex> [in Ukrainian].
11. *Rekomendatsii shchodo pobudovy, vprovadzhennia ta udoskonalennia systemy upravlinnia okhoronoiu pratsi. Derzhavnyi Komitet Ukrainy z promyslovoi bezpeky, okhorony pratsi ta hirnychoho nahliadu*. (2008). Vylucheno URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/n0001641-08#Text> [in Ukrainian].

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021.2-62.5>
УДК 532.5;536.24

Бразалук О. К., аспірант Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
Гоман О. Г., доктор фізико-математичних наук, професор Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара
Бразалук Ю. В., кандидат фізико-математичних наук Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДУ ГРАНИЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ДО РОЗВ'ЯЗУВАННЯ КРАЙОВИХ ЗАДАЧ В ОБЛАСТЯХ З РУХОМИМИ МЕЖАМИ

Складність постановки та розв'язання задач, що формулюються в областях з рухомими або невідомими межами полягає в наявності рухомої межі області розв'язку, що називається вільною поверхнею. З математичної точки зору, особливість цього класу задач полягає в специфічній нелінійності: залежній від розв'язку зміні за часом форми області розв'язку. Рухливість межі області розв'язку породжує специфічну нелінійність крайової задачі, що вносить додаткові труднощі в процес її чисельного розв'язання. Для чисельного розв'язання задачі застосовувався регулярний варіант методу граничних елементів. У запропонованій статті аналізуються і порівнюються різні функціональні представлення форми рухомої межі, а також різні схеми її розрахунку. Обговорюваний матеріал проілюстровано декількома прикладами чисельного моделювання потенціальної течії з вільною межею та чисельного розв'язання задачі Стефана.

Ключові слова: рухома межа; задача Стефана; наближення Лейбена; регулярний алгоритм методу граничних елементів; метод граничних елементів.

The motion of a fluid with a free surface is the subject of a separate section of theoretical hydromechanics. The development of this direction is stimulated by numerous applications to modern technologies, especially for the design and operation of hydraulic structures, shipbuilding and navigation, the study of ebbs and flows, tsunamis and other natural phenomena. The complexity of setting and

© О. К. Бразалук, О. Г. Гоман, Ю. В. Бразалук, 2021

solving this class of problems lies in the presence of a moving boundary of the solution area, called the free surface. From a mathematical point of view, the peculiarity of the considered class of problems lies in a specific non-linearity: a solution-dependent change in time of the shape of the solution area.

Assuming the fluid to be incompressible and in viscid, under the conditions of the potentiality of the field of body forces and the potentiality of the flow at the initial moment of time, we obtain that the flow is described by the Laplace equation for the velocity potential with the traditional boundary conditions of non-flow at the solid boundaries of the flow region, as well as special boundary conditions at the free boundary, one of which, the Cauchy-Lagrange integral, contains a quadratic nonlinearity in the flow velocity. The assumption made about the potentiality of the alternating field of body forces greatly simplifies the formulation of the problem and allows us to consider the problem formulated above as a model one for a wide class of fluid flows with a free surface. For the numerical solution of the problem described above, a regular version of the boundary element method was used. The use of regular algorithms of the boundary element method makes it possible to bypass numerous computational limitations and improve in one way or another the approximations of the shape of the moving boundary, known and unknown functions on it. To do this, the Laplace equation was transformed into a boundary integral equation of potential theory, and the time interval in which the flow field is studied was divided into the corresponding number of sufficiently small intervals. At each time step, the resulting boundary integral equation was solved using the standard algorithm of the boundary element method. The calculation of the new position of the free boundary of the flow was carried out using the Euler scheme.

Key words: moving boundary; Stefan problem; Leibenson approximation; regular algorithm of the boundary element method; boundary element method.

Постановка проблеми. В останні роки в обчислювальній механіці суцільних середовищ та в обчислювальному тепломасообміні простежується стійка тенденція збільшення частки задач, що формулюються в областях з рухомими або невідомими межами. Враховуючи, що переважна більшість таких задач добре відома протягом досить довгого часу, зазначена тенденція може бути пояснена насамперед успіхами методів чисельного розрахунку та зростання інсталяційної бази обчислювальної техніки, які надають суттєві додаткові можливості для розв'язання складних та ресурсоемких задач аналізованих областей. Найчастіше крайові задачі в областях змінної геометричної форми і близькі до них за математичними особливостями крайові задачі в областях з невідомою межею виникають у гідромеханіці – це так звані

течії з вільною поверхнею та спільні течії рідин, що не змішуються, а також в теорії тепломасообміну – так звані задачі тепломасообміну з фазовими переходами, наприклад, найпростіші задачі про фазовий перехід у нерухомих середовищах – задача Стефана (у різних дослідженнях задачею Стефана називають різні за фізичною природою задачі тепломасообміну з фазовими переходами, але тут і далі розумітимемо задачу Стефана в означеному вище сенсі). Область застосування задач з рухомими межами не вичерпується двома зазначеними прикладами; досить, наприклад, згадати задачу М. М. Веригіна з теорії фільтрації, але переважна більшість задач класу, що розглядається, припадає саме на вищеназвані випадки. Актуальність даної статті як частини великих та інтенсивних досліджень, що проводяться в зазначених галузях, визначається, з одного боку, необхідністю розвитку математичної фізики як науки в одному з найскладніших її розділів, а з іншого – прикладним значенням задач, які належать до розглядуваних класів, що робить розробку методів їх чисельного розв’язку дуже важливою.

Щоб підтвердити останню тезу, досить згадати, яку важливу роль відіграє вивчення течій рідини з вільною поверхнею для проектування та експлуатації гідротехнічних споруд, суднобудування та мореплавання, дослідження припливів та відливів, цунамі та інших природних явищ. Водночас задачі тепломасообміну з фазовими переходами описують ключові процеси під час виробництва численних матеріалів, насамперед, у металургійної промисловості. Крім того, процеси тепломасообміну з фазовими переходами визначають перебіг багатьох гідрометеорологічних явищ, таких як утворення сніжинок, градин чи дощових крапель у хмарах, випадання роси, утворення інію та зледеніння. Наведений далеко не повний список прикладних проблем, що моделюються крайовими задачами в областях з рухомими межами, наочно демонструє прикладне значення розвитку відповідних методів моделювання. Існує очевидна аналогія між розглянутими задачами течії з вільною поверхнею та задачею Стефана. Ця аналогія використовуватиметься в цій статті, хоча основна увага приділятиметься течії з вільною поверхнею, як більш складному випадку. Метод граничних елементів найпоширеніший, найпотужніший і найбільш універсальний серед альтернативних методів. Основна ідея методу граничних елементів полягає у переході від вихідної диференціальної постановки крайової задачі до граничних інтегральних рівнянь теорії потенціалу з їх подальшим розв’язуванням за допомогою процедур, близьких до методу скінчених елементів. Для лінійних однорідних диференціальних рівнянь у частинних похідних метод граничних елементів зменшує на одиницю розмірність області розв’язання задачі, локалізуючи процедуру розв’язання лише на межі області. Оскільки в цьому дослідженні розглядаються лише крайові задачі еліптичного типу з

лінійним диференціальним оператором, а саме для таких задач метод граничних елементів ефективніший, ніж традиційні методи скінчених різниць та скінчених елементів, то доцільність застосування в даному випадку саме методу граничних елементів не викликає жодного сумніву.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Задачі про течії рідини з вільною поверхнею добре відомі і вивчені, вони описані в численних публікаціях як у лінеаризованій постановці [1], так і в повністю нелінійних формулюваннях [2]. Значна кількість літератури повністю або частково присвячена методам розв'язання подібних задач. На жаль, обмежені рамки даної статті не дають можливості навести повний огляд і відповідний аналіз напряму, який розглядається, тому обмежимося посиланням на монографію Н. В. Полякова [3] та колективну монографію [10], що присвячені застосуванню методів обчислювальної теорії потенціалу для розв'язання задач течії рідини з вільною поверхнею. Не вдаючись у подробиці, зазначимо, що переважна більшість праць щодо течій рідини з вільною поверхнею пов'язана з мореплаванням, гідротехнічними спорудами, хвилями на поверхні рідини, що трапляються під час течій з великими числами Рейнольдса, для яких з достатнім ступенем точності можна використовувати модель потенційної течії ідеальної нестисливої рідини. Проблематика тепломасообміну з фазовими переходами висвітлена у фундаментальних монографіях [4–5], які присвячені задачі Стефана. Історично склалося так, що серед усіляких методів розв'язання задач Стефана найпопулярнішими були аналітичні підходи та метод скінчених різниць, що легко можна з'ясувати, звернувшись до оглядової монографії [6]. Число застосувань методу граничних елементів до задач Стефана відносно невелике, хоча для квазістаціонарного наближення, відомого також як наближення Лейбензона, метод граничних елементів дуже ефективний. У даній статті використовується не традиційний метод граничних елементів [7–8], а його регулярний варіант, описаний у праці [9]. Використання регулярних алгоритмів методу граничних елементів уможливорює обійти численні обчислювальні обмеження та вдосконалити таким чином апроксимацію форми рухомої межі та відомих і невідомих функцій на ній.

Мета статті – зробити аналіз можливостей удосконалення гранично-елементних алгоритмів для розв'язання еліптичних крайових задач в областях з рухомою межею.

Виклад основного матеріалу. Постановка крайових задач в областях з рухомими межами. Опишемо потенційну течію ідеальної нестисливої рідини в термінах потенціалу швидкостей φ :

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \varphi}{\partial z^2} = 0; \quad (1)$$

з граничними умовами на вільній поверхні у вигляді інтеграла Коші–Лагранжа [1–3] із заданим тиском P

$$\frac{\partial \varphi}{\partial \tau} + \frac{V^2}{2} + \frac{p}{\rho} + gz = q(\tau) \quad (2)$$

та кінематичними умовами у вигляді

$$\dot{x} = V_x, \dot{y} = V_y, \dot{z} = V_z, \quad (3)$$

які фізично означають, що рідинна частинка, котра була в певний час на вільній поверхні, на ній під час руху і залишається. Усі позначення в (1)–(3) розуміються у традиційному сенсі, граничні умови на інших межах також ставляться традиційним чином і стислості заради наводити їх не будемо.

Аналогічним є формулювання задачі Стефана в наближенні Лейбенсона (задача (1)–(3) є аналогом однофазної задачі Стефана, нижче наведено двофазну задачу):

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_1}{\partial z^2} = 0, \quad (4)$$

$$\frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T_2}{\partial z^2} = 0, \quad (5)$$

$$T_1|_{\Gamma_{p,t}} = T_2|_{\Gamma_{p,t}} = T_{p,t}, \quad (6)$$

умова Стефана

$$\lambda_1 \frac{\partial T_1}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{p,t}} - \lambda_2 \frac{\partial T_2}{\partial n} \Big|_{\Gamma_{p,t}} = \sigma \rho V_n, \quad (7)$$

де $\Gamma_{p,t}$ – межа фазового переходу;

$T_{p,t}$ – температура фазового переходу;

V_n – швидкість просування межі фазового переходу у бік нормалі до цієї межі. Всі інші позначення розуміються у традиційному сенсі [5–6]; умови на інших межах ставляться традиційним чином і тут опущені.

Застосування методу граничних елементів. Застосуємо до рівнянь Лапласа (1), (4), (5) метод теорії потенціалу [7–8] та перетворимо їх на граничні інтегральні співвідношення згідно зі схемою:

$$\begin{aligned}
u(x_0, y_0, z_0) = & \int_{\Gamma} \varphi_0(x, y, z, x_0, y_0, z_0) \frac{\partial u(x, y, z)}{\partial n(x, y, z)} dS(x, y, z) - \\
& - \int_{\Gamma} u(x, y, z) \frac{\partial \varphi_0(x, y, z, x_0, y_0, z_0)}{\partial n(x, y, z)} dS(x, y, z),
\end{aligned} \tag{8}$$

де φ_0 – фундаментальний розв’язок рівняння Лапласа:

$$\varphi_0 = \frac{1}{4\pi\sqrt{(x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 + (z-z_0)^2}}; \tag{9}$$

Γ – повна межа області розв’язування. У праці [9] було запропоновано розташовувати точки коллокації не на межі області, як у монографіях [7, 8, 10], а в середині області. Це дає змогу після стандартної розбивки межі Γ на граничні елементи використовувати широкий спектр апроксимацій як самої межі області розв’язування, так і відомих, а також і невідомих функцій на ній. Оскільки за такого підходу всі інтеграли (8) є регулярними, вони можуть бути визначені за допомогою будь-яких квадратурних формул.

Якщо для задачі Стефана формулювання крайової задачі на кожному з кроків за часом є природним, то для течії з вільною поверхнею виникає певна проблема під час використання інтеграла Коші–Лагранжа (2) при переході від заданого тиску до значення потенціалу або його нормальної похідної на межі. Наведемо один із прийомів [3] переходу з попереднього часового шару на наступний. Нехай у певний момент часу τ задачу про течію з вільною межею вже розв’язано, тобто відомо $\varphi(\tau)$, $\Gamma(\tau)$, $V_x(\tau)$, $V_y(\tau)$, $V_z(\tau)$, і для рідинної частинки, що міститься на вільній межі, з координатами $(x(\tau), y(\tau), z(\tau))$, можна за схемою Ейлера визначити нове положення:

$$\begin{aligned}
x(\tau + \Delta\tau) &= x(\tau) + V_x(\tau)\Delta\tau, \\
y(\tau + \Delta\tau) &= y(\tau) + V_y(\tau)\Delta\tau, \\
z(\tau + \Delta\tau) &= z(\tau) + V_z(\tau)\Delta\tau.
\end{aligned} \tag{10}$$

Щоб сформулювати крайову задачу в момент часу $\tau + \Delta\tau$, необхідно визначити в точці $(x(\tau + \Delta\tau), y(\tau + \Delta\tau), z(\tau + \Delta\tau))$ потенціал швидкостей

або його нормальну похідну. Розкладемо потенціал швидкостей у ряд Тейлора в околі моменту часу τ і точки $(x(\tau), y(\tau), z(\tau))$. Тоді:

$$\begin{aligned} \varphi(\tau + \Delta\tau, x(\tau + \Delta\tau), y(\tau + \Delta\tau), z(\tau + \Delta\tau)) &= \varphi(\tau, x(\tau), y(\tau), z(\tau)) + \frac{\partial\varphi}{\partial\tau}(\tau)\delta\tau + \\ &+ V_x^2(\tau)\Delta\tau + V_y^2(\tau)\Delta\tau + V_z^2(\tau)\Delta\tau + O((\Delta\tau)^2) = \varphi(\tau, x(\tau), y(\tau), z(\tau)) + q(\tau) - \\ &- \frac{P}{\rho} - gz(\tau) + \frac{1}{2}(V_x^2(\tau) + V_y^2(\tau) + V_z^2(\tau)) + O((\Delta\tau)^2). \end{aligned} \quad (11)$$

Зазначимо, що всі величини у правій частині співвідношень (11) є відомими та належать до моменту часу τ , тобто співвідношення (11) визначають граничні умови Диріхле для крайової задачі, що описує потенціал швидкостей на новому тимчасовому шарі.

Результати розрахунків. Наведемо результати розрахунку обтікання одно- та двоколових профілів шаром рідини з невідомою заздалегідь стаціонарною вільною поверхнею.

Глибина шару рідини на нескінченності приймалась $h_0 = 1$, швидкість потоку умовно бралась $v_\infty = 1$; коловий контур мав радіус $R = 0,25$, центр кола був розташований на глибині $h = 0,5$ від поверхні дна шару. Досліджувалась форма вільної поверхні залежно від величини циркуляції по одному чи двох колах.

Значення визначальних параметрів для рис. 1а) наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Визначальні параметри для випадку одного контуру в шарі рідини

Випадок	Відстань від центра до дна	Значення функції струму на контурі	Циркуляція по контуру
а)	0,62	-0,30	- 0,488 779
б)	0,62	-0,15	- 0,076 936
в)	0,3	0,00	0,472 590
г)	0,5	0,15	1,028 989
д)	0,5	0,30	1,572 495
е)	0,5	0,40	1,915 717

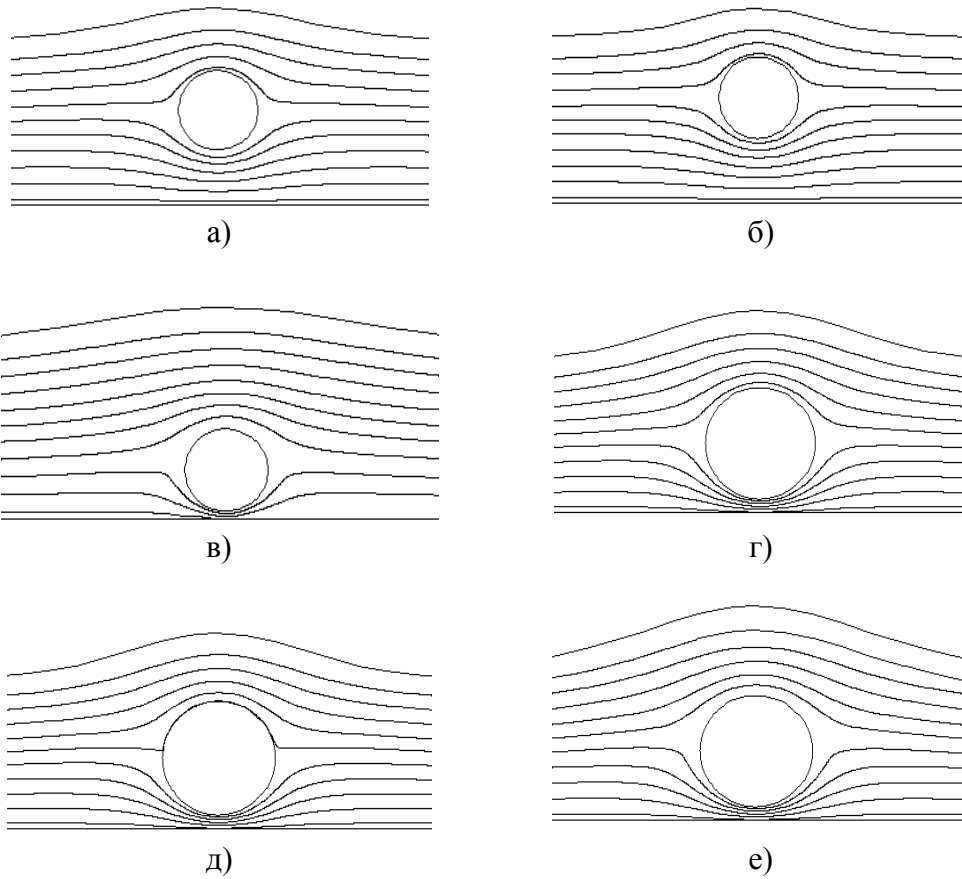


Рис. 1. Форма вільної поверхні

Таблиця 2

Параметри гідродинамічної взаємодії двох колових контурів з вільною поверхнею у шарі рідини скінченної глибини (рис. 2)

№	Параметри гідродинамічної взаємодії					
	γ_1	F_{x1}	F_{y1}	γ_2	F_{x2}	F_{y2}
а)	0,3210	0,6865E-01	-0,7272	0,3210	-0,6865E-01	-0,7272
б)	0,5664	0,4926E-01	-1,1875	0,7303E-01	-0,4917E-01	-0,2888

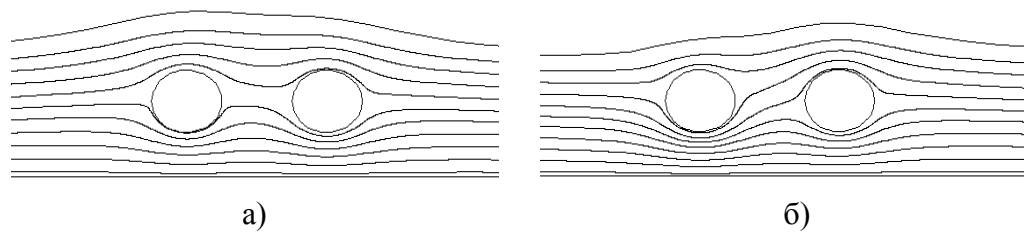


Рис. 2. Взаємодія двох колових контурів з вільною поверхнею у шарі скінченної глибини

У табл. 2 γ_1, γ_2 – циркуляції по контурах; $F_{x1}, F_{x2}, F_{y1}, F_{y2}$ – горизонтальна та вертикальна сили взаємодії відповідно.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Відсутність придатних для порівняння аналітичних розв’язків змусило авторів оцінювати похибку тестових розрахунків непрямим шляхом, удаючись до порівняння з розрахунками на подрібнених сітках. За всієї обмеженості можливостей такого підходу він чітко показує переваги підвищення точності та ефективності завдяки застосуванню регулярного методу граничних елементів. Основний висновок, зроблений у цій статті – позитивна оцінка перспектив застосування регулярних алгоритмів методу граничних елементів для розв’язання крайових задач в областях з рухомими межами. Застосування методу МГЕ для задачі з вільною поверхнею рідини з одним чи двома контурами у шарі рідини засвідчило його працездатність, що уможливило рекомендувати його як робочий метод для розрахунку таких та подібних задач.

Список використаних джерел:

1. *Сретенский Л. Н.* Теория волновых движений жидкости. Москва, 1936. 304 с.
2. *Логвинович Г. В.* Гидродинамика течений со свободными границами: монография. Киев: Наукова думка, 1969. 208 с.
3. *Поляков Н. В.* Методы решения нелинейных краевых задач. Задачи проникания: монография. Днепропетровск: Изд-во ДНУ, 2005. 356 с.
4. *Рубинштейн Д. И.* Проблема Стефана: монография. Рига: Звайгзне, 1967. 457 с.
5. *Мейрманов А. М.* Задача Стефана: монография. Новосибирск: Наука, 1986. 239 с.

6. Рядно А. А., Миносян Я. П. Сопряженные задачи теплопереноса в системах тел с подвижными границами: монография. Днепропетровск: ДГУ, 1983. 116 с.

7. Бреббия К., Теллес Ж., Вроубел Л. Методы граничных элементов. Москва: Мир, 1987. 524 с.

8. Бенерджи П., Баттерфилд Р. Метод граничных элементов в прикладных науках. Москва: Мир, 1984. 494 с.

9. Евдокимов Д. В. Разработка прямых регулярных алгоритмов вычислительной теории потенциала с точками коллокации внутри области решения // Восточноевропейский журнал передовых технологий. 2015. № 2/7 (74). С. 16–25.

10. Бразалук Ю. В., Гоман О. Г., Евдокимов Д. В., Кочубей О. О., Поляков М. В. Метод граничних елементів в задачах гідродинаміки та теплопровідності: монографія. Дніпро: Ліра, 2019. 228 с.

References:

1. Sretenskij L. N. Teorija volnovyh dvizhenij zhidkosti. M. : 1936. 304 s.
2. Logvinovich G. V. Hidrodinamika techenij so svobodnymi granicami : monografija. K. : Naukova dumka, 1969. 208 s.

3. Poljakov N. V. Metody reshenija nelinejnyh kraevyh zadach. Zadachi pronikanija : monografija. D. : Izd-vo DNU, 2005. 356 s.

4. Rubinshtejn D. I. Problema Stefana: Monografija. Riga : izd. Zvajgzne, 1967. 457 s.

5. Mejrmanov A. M. Zadacha Stefana : monografija. Novosibirsk : Nauka, 1986. 239 s.

6. Rjadno A. A., Minosjan Ja. P. Sopryazhennyye zadachi teploperenosa v sistemah tel s podvizhnyimi granicami: monografija. Dnepropetrovsk : Izd-vo DGU, 1983. 116 s.

7. Brebbija K., Telles Zh., Vroubel L. Metody granichnyh jelementov. M. : Mir, 1987. 524 s.

8. Benerdzhi P., Batterfild R. Metod granichnyh jelementov v prikladnyh naukah. M. : Mir, 1984. 494 s.

9. Evdokimov D. V. Razrabotka prjamyh reguljarnyh algoritmov vychislitel'noj teorii potenciala s tochkami kollokacii vnutri oblasti reshenija Vostochno-Evropejskij zhurnal peredovyh tehnologij. 2015. № 2/7 (74). S. 16–25.

10. Brazaluk Ju. V., Goman O. G., Evdokimov D. V., Kochubej O. O., Poliakov M. V. Metod granychnyh elementiv v zadachah gidrodynamiky ta teploprovodnosti : monografija. Dnipro : Lira, 2019. 228 s.

DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021.2-62.6>
УДК 656.029.4

Огієнко М. М., доктор економічних наук,
професор Національного авіаційного
університету
Огієнко А. В., доктор економічних наук,
доцент Національного авіаційного
університету
Багрій М. М., кандидат технічних наук,
доцент Національного авіаційного
університету

МУЛЬТИМОДАЛЬНІ СХЕМИ КОНТЕЙНЕРНОЇ ДОСТАВКИ ВАНТАЖІВ

У статті висвітлено актуальне питання розвитку контейнерних мультимодальних перевезень, які є пріоритетними в розвитку транспортних послуг, їх використання уможливить збільшити обсяги вантажів, що доставлятимуться до місця призначення найефективнішими видами транспорту (їх комбінацією). Контейнерне перевезення вантажів суттєво знижує витрати на доставку товарів від виробників до споживачів. Перевезення вантажів у контейнерах стали найбільш економічною безперевантажувальною технологією, насамперед у міжконтинентальному мультимодальному сухопутно-морському сполученні. Здійснено аналіз та проведено розрахунки даних процесів контейнерного транспортування для умов двох міжнародних транспортних коридорів: TRACECA та транскаспійського міжнародного транспортного маршруту, визначено, що використання ТМТМ з 20-футовим контейнером – це економічно привабливіший варіант і може бути рекомендований для використання.

Ключові слова: контейнерні перевезення; ланцюги постачання; логістика; міжнародні транспортні коридори; мультимодальні перевезення.

The article highlights the topical issue of development of container multimodal transport, which are a priority in the development of transport services, their use will increase the volume of cargo delivered to the destination by the most efficient modes of transport (their combination). Container transportation of goods significantly reduces the cost of delivery of goods from producers to consumers. Container trans

© М. М. Огієнко, А. В. Огієнко, М. М. Багрій, 2021

portation has become the most economical without transshipment technology, and, above all, in the intercontinental multimodal land-sea service.

The aim of the work is to study the practical aspects, substantiate practical recommendations for the logistics of multimodal container transportation of goods in global supply chains. Conduct a comparative analysis of the implementation of multimodal container traffic in different containers, namely 20 and 40 feet. The analysis and calculations of the data of container transportation processes for the conditions of two international transport corridors: TRACECA and trans-Caspian international transport route are carried out.

The cost of transportation by sea, although their number is small relative to the total share of routes, significantly affects the total cost of transportation. In order to stimulate freight traffic on these routes, member states have set discounts of up to 10% of the cost of the ferry fare. Studies suggest that the use of multimodal container traffic is currently economically feasible.

The conducted research of practical aspects and substantiation of practical recommendations on logistics of multimodal container transportation of goods in global supply chains suggests that the use of container transportation is a way of delivery today using multimodal options for delivery of goods. An in-depth comparative analysis of the implementation of multimodal container traffic in different containers, namely 20 and 40 feet, allows us to conclude that the use of the Trans-Caspian International Transport Route (TMTM) with a 20-foot container is a more economically attractive option and can be recommended.

Key words: container transportation; supply chains; logistics; international transport corridors; multimodal transportation.

Постановка проблеми. Транспортне забезпечення зовнішньоекономічної діяльності (ЗЕД) є одним із ключових елементів ефективної реалізації міжнародної торгівлі. Пріоритетним напрямком розвитку ринку транспортних послуг у ЄС є створення нових транспортних схем, згідно з якими великі обсяги вантажів доставлятимуться до місця їх призначення найефективнішими видами транспорту (їх комбінацією).

Основою вантажного транспортного сервісу, що становить значну частину глобального транспортно-логістичного ринку, є контейнерні перевезення [2]. На транспорті західноєвропейських країн, США та Японії контейнери різних типів почали використовуватися ще з 1920-х рр. Потужний поштовх контейнеризації трапився на початку 1950-х рр., коли стало очевидним, що перевезення готових виробів, а також деяких видів сировини в контейнерах суттєво знижує витрати на доставку товарів від виробників до споживачів. На думку фахівців, перевезення вантажів у контейнерах стали найбільш економічною безперевантажувальною технологією, насамперед, у міжконтинентальному мультимодальному сухопутно-морському сполученні [3].

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Праці багатьох вчених України висвітлюють проблематику розвитку логістичних мультимодальних схем доставки вантажів із використанням контейнерів: О. М. Загурського, Н. А. Троїцької, К. М. Разумової, К. І. Плужникової, М. В. Шилімова, І. Л. Роговського, О. Є. Соколової, В. В. Клименко, Н. Правдина, Г. Левікова, Н. І. Навальської, Л. Савченко та ін. У своїх працях науковці розкривають питання використання мультимодальних перевезень під час здійснення контейнерного транспортування товарів ланцюгами постачань, але дослідження потребує розширення кола наукових досліджень у питанні формування пріоритетних завдань організації транспортної системи контейнерної доставки вантажів з використанням мультимодальних перевезень [1, 2, 3, 6, 8, 9].

Мета статті – дослідження практичних аспектів, обґрунтування практичних рекомендацій щодо логістики мультимодальних контейнерних перевезень вантажів у глобальних ланцюгах постачання товарів. Провести порівняльний аналіз здійснення мультимодальних контейнерних перевезень різними контейнерами, а саме 20- та 40-футовими. Дослідження проведено на основі повного та системного підходу, використовуються економічні методи дослідження, а саме: методи наукових підходів, логіки та прямого аналізу, операційної декомпозиції бізнеспроцесів, сітьового планування логістичних систем.

Виклад основного матеріалу. Вартість доставки вантажів від Шанхаю до місця призначення в Одесі встановлюється залежно від типу контейнера 20 або 40 футів. Під час розрахунку вартості транспортування транспортним коридором TRASECA оператори включають у вартість ризик неповернення контейнерів. У дослідженнях Азіатського банку розвитку було зазначено, що з урахуванням порушення, невідповідність тарифної політики транзитних країн, неформальні зустрічі та інші платежі – реальні ставки на вантажному варіанті цього міжнародного транспортного коридору можуть бути вищими, ніж оголошено 25–30 %.

Слід зазначити, що країни-учасниці транспортного коридору TRASECA підписали документи, які забезпечують привілейовані умови та тарифи: знижка 50 % на залізничні перевезення й транспортування порожніх вагонів на залізничних поромках. Крім того, податки та збори для транзитних вантажів були скасовані, на державному рівні передбачені заходи, які забезпечують безпеку транспортування, збереження товарів і транспортних засобів.

Подібні знижки встановлені внаслідок підписання залізницями країн – учасниць коридору транкаспійського міжнародного транспортного маршруту (ТМТМ) з Україною угоди про пільгові транспортні тарифи, які забезпечують зменшення сухопутної вантажної частини маршруту на 40 % [6].

Вартість перевезення морськими шляхами, хоча їх кількість невелика щодо загальної частки маршрутів, значно впливає на загальну вартість транспортування. Щоб стимулювати вантажні перевезення за цими маршрутами державами-учасницями, знижки встановлені до 10 % вартості тарифу на перевезення поромами. Таким чином, сумарну вартість перевезення подано в табл. 1.

Таблиця 1

Вартість доставки за маршрутами, USD (побудовано на основі [3])

Контейнер	Маршрут	
	TRACECA	TMTM
20-футовий (1TEU)	2450	2179
40-футовий (1TEU)	4210	3643

З екологічної точки зору, транспортування вантажів водними шляхами – найбільш ефективний спосіб доставки, за цього варіанта переміщення вантажів скорочуються вуглецеві викиди більш ніж на 90 %.

Основними джерелами викиду парникових газів під час використання залізничного транспорту є тепловози. У ході роботи магістральних тепловозів в атмосферу здійснюються викиди відпрацьованих газів, що за складом аналогічні викидам автомобільних дизелів.

Залежно від обсягів перевезених вантажів розраховано обсяги викидів транспортними коридорами (табл. 2).

Таблиця 2

Екологічний ефект від перевезень за маршрутами (побудовано на основі [4])

Показник	Маршрут	
	TRACECA	TMTM
Кількість викидів оксиду вуглецю, т/рік	1225	568
Плата за викиди оксиду вуглецю, USD/рік	6125	2840
Кількість викидів діоксиду азоту, т/рік	1031	745
Плата за викиди діоксиду азоту, USD/рік	6680	4827
Кількість викидів сірчистого ангідриду, т/рік	219	140
Плата за викиди сірчистого ангідриду, USD/рік	1125	719
Кількість викидів сажі, т/рік	185	119
Плата за викиди сажі, USD/рік	928	597
Сума платежів, USD/рік	14 860	8985
Сума платежів на 1TEU, USD	8,92	8,42

За кіотськими нормативами, плату за викиди однієї тонни речовин оцінюють на рівні оксиду вуглецю – 5,00 USD, діоксиду азоту – 6,48 USD, сірчастого ангідриду – 5,14 USD, сажі – 5,02 USD [4].

Необхідний парк контейнерів може бути визначений, виходячи з місячних обсягів постачання та обігу контейнера за формулою [9]:

$$N_k = \frac{\theta \cdot U}{30}, \quad (1)$$

де θ – обіг контейнера, доба;

U – об'єми поставки, 1TEU/міс.

Обіг контейнера обчислюється виходячи з нормативних термінів доставки вантажу за маршрутами $T_{дост}$, тривалості його перебування в пунктах транshipmentу $T_{трш}$, навантаження та вивантаження $T_{гр}$, під операціями митного очищення $T_{тв}$. Таким чином, оборот контейнера може бути розрахований, як:

$$\theta = 2(T_{дост} + T_{трш} + T_{гр}) + T_{тв}. \quad (1)$$

Нами прийнято, що контейнер у зворотному напрямі повертається порожнім; тривалість перебування контейнера у пунктах навантаження і розвантаження становить 3 доби, під митною обробкою – 2 доби, під операціями зміни модальності – 2 доби. Таким чином, обіг контейнера за варіантами мультимодальних схем доставки (1 – TRACECA; 2 – TMTM) становитиме: $\theta_1 = 45$ діб, $\theta_2 = 42$ доби.

У табл. 3 наведено показники маршрутів згідно з відповідним типом контейнерів за визначеними раніше мультимодальними транспортними коридорами.

Подані розрахунки здійснено відповідно для умов двох МТК: TRACECA та TMTM. Також за кожним із маршрутів розраховано купівлю необхідної кількості контейнерів: 20-футовий (1TEU) та 40-футовий (1TEU). В табл. 3 вартість доставки брали з табл. 1 для кожного варіанта. Залежно від типу контейнера врахована його повна заповнюваність.

Для розрахунку прийнято середній щомісячний попит на купівлю товарів з Китаю 50–65 тонн. Залежно від цього була розрахована кількість контейнерів, також урахувуючи їх максимальну підйомну масу. У логістичні витрати входять витрати на транспортування та контейнерне обслуговування.

**Показники мультимодальних маршрутів доставки вантажів
(побудовано на основі [3])**

Показники	20-футовий		40-футовий	
	TRACECA	TMTM	TRACECA	TMTM
Вартість доставки, USD/1 поставка	2450	2179	4210	3643
Кількість тонн товарів, т/місяць	65,76	65,76	54	54
Кількість контейнерів, (1TEU)/місяць	3	3	2	2
Обіг контейнера, діб	45	45	42	42
Максимальне завантаження, 1 TEU/т	21,92	21,92	27	27
Кількість контейнерів, (1TEU)/рік	29	29	19	19
Вартість 1 TEU	2310	2310	3920	3920
Загальна вартість контейнерів USD/рік	66 528	66 528	75 264	75 264
Загальні витрати на поставку товарів, USD/рік	88 200	78 444	101 040	87 432
Загальні логістичні річні витрати, USD/рік	154 728	144 972	176 304	162 696
Собівартість 1 т сировини, USD/т	380	380	380	380
Ринкова надбавка компанії під час реалізації товару, %	50	50	50	50
Отриманий прибуток від реалізації товарів, USD/рік	89 959,68	89 959,68	73 872	73 872

Далі наведемо розрахунки ефективності проектних рішень за кожною зі схем МТК та типів контейнерів. У розрахунках скористаємось формулою [6]:

$$NPV = \sum_{t=0}^N \frac{CF_t}{(1+r)^t}, \quad (2)$$

де CF_t – очікуваний чистий грошовий потік (різниця між вхідним та вихідним грошовим потоком) за період t ;

r – ставка дисконту;

N – термін реалізації проекту.

Розрахунки показника NPV подано в табл. 4–7.

Таблиця 4

**Розрахунок значення NPV проєкту транспортування сировини
з Китаю у МТК TRASECA з використанням 20-футового контейнера
(побудовано на основі власних розрахунків)**

№ з/п	Роки	Доходи, у. о.	Витрати у. о.	Чисті вигоди, у. о.	Коефіцієнт дисконтування			Дисконтовані чисті вигоди		
					r=10 %	r=15 %	r=20 %	r=10 %	r=15 %	r=20 %
1	2022	89959,68	54728,00	64768,32	0,91	0,87	0,83	- 58 880	- 56 320	- 53 973
2	2023	98955,65	88200,00	10755,65	0,83	0,76	0,69	8889	8132	7469,20
3	2024	108851,21	88200,00	20651,21	0,75	0,66	0,58	15 515	13 578	11 950,93
4	2025	119736,33	88200,00	31536,33	0,68	0,57	0,48	21 539	18 031	15 208,49
5	2026	131709,97	88200,00	43509,97	0,62	0,50	0,40	27 016	21 632	17 485,68
	Значення NPV							14 080	5054	-1859,29

Таблиця 5

**Розрахунок значення NPV проєкту транспортування вантажів
з Китаю у МТК Транскаспійському з використанням
20-футового контейнера
(побудовано на основі власних розрахунків)**

№ з/п	Роки	Доходи, у. о.	Витрати, у. о.	Чисті вигоди, у. о.	Коефіцієнт дисконтування			Дисконтовані чисті вигоди		
					r=10 %	r=15 %	r=20 %	r=10 %	r=15 %	r=20 %
1	2022	89 959	144 972	-55 012	0,91	0,87	0,83	- 50 011	- 47 837	- 45 844
2	2023	98 955	78 444	20 511	0,83	0,76	0,69	16 951	155 097	14 244,2
3	2024	108 851	78 444	30 407	0,75	0,66	0,58	22 845	199 932	17 596,8
4	2025	119 736	78 444	41 292	0,68	0,57	0,48	28 203	236 091	19 913
5	2026	131 709	78 444	53 265	0,62	0,50	0,40	33 074	264 826	21 406,4
	Значення NPV							51 063	377 57	27 317

Таблиця 6

**Розрахунок значення NPV проєкту транспортування сировини
з Китаю у МТК TRACESA з використанням
40-футового контейнера
(побудовано на основі власних розрахунків)**

№ з/п	Роки	Доходи, у. о.	Витрати, у. о.	Чисті вигоди, у. о.	Коефіцієнт дисконтування			Дисконтовані чисті вигоди		
					r=10%	r=15%	r=20%	r=10%	r=15%	r=20%
1	2022	73 872,00	176 304,00	-102 432	0,91	0,87	0,83	-93 120,00	-89 071,3	-85 360
2	2023	81 259,20	101 040,00	-19 780,8	0,83	0,76	0,69	-16 347,77	-14 957,1	-13 736,6
3	2024	89 385,12	101 040,00	-11 654,88	0,75	0,66	0,58	-8756,48	-7663,27	-6744,72
4	2025	98 323,63	101 040,00	-2716,37	0,68	0,57	0,48	-1855,32	-1553,09	-1309,98
5	2026	108 156,00	101 040,00	7116,00	0,62	0,50	0,40	4418,47	3537,91	2859,76
Значення NPV								-115 661	-1 097 069	-104 291

Таблиця 7

**Розрахунок значення NPV проєкту транспортування сировини
з Китаю у МТК Транскаспійському з використанням
40-футового контейнера
(побудовано на основі власних розрахунків)**

№ з/п	Роки	Доходи, у. о.	Витрати, у. о.	Чисті вигоди, у. о.	Коефіцієнт дисконтування			Дисконтовані чисті вигоди		
					r=10%	r=15%	r=20%	r=10%	r=15%	r=20%
1	2022	73 872	162 696	-88 824	0,91	0,87	0,83	-80 749	-77 238	-74 020
2	2023	81 259	87 432	-6172	0,83	0,76	0,69	-5101	-4667	-286
3	2024	89 385	87 432	1953	0,75	0,66	0,58	1467	1284	1130,28
4	2025	98 323	87 432	10 891	0,68	0,57	0,48	7439	6227	5252
5	2026	1 081 560	87 432	20724	0,62	0,50	0,40	12 868	10 303	8328
Значення NPV								-64 076	-64 090	-63 595

Згідно з отриманими розрахунками чистої теперішньої вартості проєктів порівняємо значення даного показника з урахуванням коефіцієнта дисконту, рівному 10 %, 15 %, 20 % у табл. 8 та зобразимо схематично на рис. 1.

Таблиця 8

**Порівняння значень показника NPV за різними варіантами
мультимодальних схем доставки товарів
(побудовано на основі власних розрахунків)**

Значення NPV за різних ставок дисконту	TRACECA, 20 футів	TMTM, 20 футів	TRACECA, 40 футів	TMTM, 40 футів
NPV, $r=10\%$	14 080,24	51 063,16	- 115 661,10	- 64 076,07
NPV, $r=15\%$	5 054,19	37 757,81	- 109 706,89	- 64 090,76
NPV, $r=20\%$	- 1 859,29	27 317,12	- 104 291,61	- 63 595,36

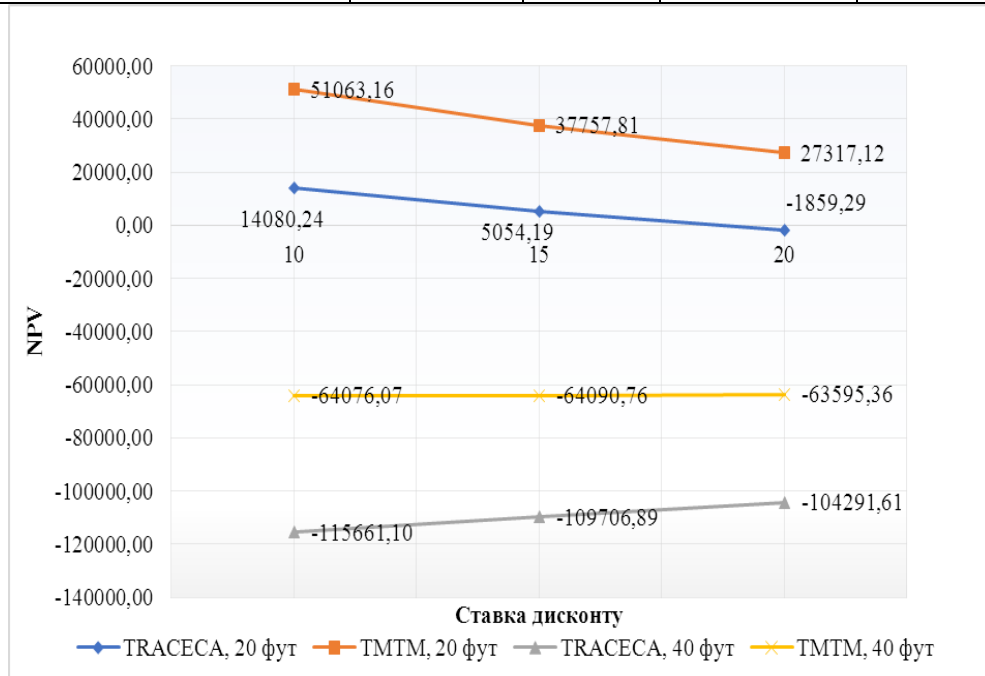


Рис. 1. Розрахунки значень показника NPV за різними варіантами мультимодальних схем доставки товарів з використанням 2 типів контейнерів

Джерело: побудовано на основі власних розрахунків

Розраховано внутрішню норму рентабельності (Internal Rate of Return або IRR). IRR проекту є ставкою дисконту, за якою NPV проекту прирівнюється до нуля. IRR дорівнює максимальному відсотку за позиками, який можна залишити у точці беззбитковості [10].

Розрахунок IRR проводиться за такою формулою, а результати розрахунків будуть подані в табл. 9:

$$\sum_{t=1}^n \frac{B_t - C_t}{(1+i)^t} = 0. \quad (3)$$

Таблиця 9

Результати розрахунків IRR проектів мультимодальної доставки вантажів з Китаю (побудовано на основі власних розрахунків)

Показник	TRACECA, 20 футів	TMTM, 20 футів	TRACECA, 40 футів	TMTM, 40 футів
IRR	17,80	29,19	107,13	- 21 794,44

Проведені дослідження дають можливість стверджувати, що використання мультимодальних контейнерних перевезень нині економічно доцільно. Як видно, в організації перевезень за маршрутом TMTM з використанням 20-футових контейнерів, проект є інвестиційно привабливим. Взагалі проведені розрахунки засвідчили, що використання 40-футового контейнера із заданим попитом для запропонованого прикладу економічно недоцільне.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Проведені дослідження практичних аспектів та обґрунтування практичних рекомендацій щодо логістики мультимодальних контейнерних перевезень вантажів у глобальних ланцюгах постачання товарів дають можливість стверджувати, що використання контейнерних перевезень є способом доставки нинішнього часу з використанням мультимодальних варіантів організації доставки товарів. З проведеного глибокого порівняльного аналізу здійснення мультимодальних контейнерних перевезень різними контейнерами, а саме 20- та 40-футовими, можна зробити висновок, що використання транскаспійського міжнародного транспортного маршруту (TMTM) з 20-футовим контейнером є економічно привабливішим варіантом і може бути рекомендованим для використання.

Список використаних джерел:

1. *Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I.* Global supply chain in context of new model of economic growth. Conceptual bases and trends for development of social-economic processes: monograph. Opole. Poland, 2018. P. 64–74.
2. *Разумова К. М., Кириленко О. М., Новак В. О., Зарубінська І. Б., Мостенська Т. Л.* Транспортна політика Європейського Союзу і України. Київ: Кондор-Видавництво, 2021. 57 с.
3. *Klyutenko V., Novalska N., Lozova G.* Development of Multimodal Transport Corridors to Ensure Economic Growth in Ukraine // Concepts, strategies and mechanisms of economic systems management in the context of modern world challenges: scientific monograph // VUZF University of Finance, Business and Entrepreneurship. Sofia: VUZF Publishing House “St. Grigorii Bogoslov”, 2021. P. 216–225. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/35604/1/Monograph-VUZF-2021.pdf>
4. *Zagurskiy O., Ohiienko M., Pokusa T., Zagurska S., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I.* Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty : monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020.
5. *Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L. e.c.t.* Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines : monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole, 2020. 164 p.
6. *Новальська Н. І., Клименко В. В.* Інвестиційно-інноваційна діяльність транспортно-логістичних підприємств в умовах сучасного бізнес-середовища // Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Економіка і управління. 2021. Т. 32 (71). № 4. С. 64–69. URL: http://www.econ.vernadskyyournals.in.ua/journals/2021/32_71_4/13.pdf
7. *Zagurskiy O., Zagurska S., Ohiienko M.* Current trends in development of transport and logistics systems of delivery of fast perishable foodstuffs: monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. 2021.
8. *Разумова К. М., Багрій М. М., Коновалова О. В., Чайка Н. Г.* Питання сучасного стану інфраструктури транспортної системи // Наукоємні технології. 2021. № 3 (51). С. 265–270.
9. *Лозова Г. М., Клименко В. В.* Оцінювання ефективності та конкурентоспроможності транспортно-логістичних підприємств // Теоретичні та прикладні питання економіки: збірник наукових праць. 2021. Вип. 1 (42). С. 142–155. URL: http://tppe.econom.univ.kiev.ua/data/2021_42/zb42_12.pdf
10. *Lagodiienko V., Karyu O., Ohiienko M., Kalaman O., Lorvi I., Herasimchuk T.* Choosing Effective Internet Marketing Tools in Strategic Management // International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. Vol. 8. № 3. P. 5220–5225. URL: <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i3/C5868098319.pdf>

References:

1. Zagurskiy O., Ohiienko M., Rogach S., Pokusa T., Titova L., Rogovskii I. (2018). Global supply chain in context of new model of economic growth. *Conceptual bases and trends for development of social-economic processes. Monograph. Opole.*, pp. 64–74. Retrieved from: https://www.wszia.opole.pl/wpcontent/uploads/2020/09/2019_konceptualne_podstawy_i_tendencje_w_zakresie_rozwoju_proceow_spoleczno_ekonomicznych.pdf. [in Poland].
2. Razumova K.M., Kirilenko O.M., Novak V.O., Zarubinska I.B., Mostenska T.L. (2021). Transportna politika Evropejskogo Soyuzu I Ukrayini [Transport Policy of the European Union and Ukraine]. Kondor-Vidavnistvo, Kyiv. P.57. [in Ukrainian].
3. Klymenko V., Novalska N., Lozova G. (2021). Development of Multi-modal Transport Corridors to Ensure Economic Growth in Ukraine. *Concepts, strategies and mechanisms of economic systems management in the context of modern world challenges: scientific monograph*. VUZF University of Finance, Business and Entrepreneurship. Sofia: VUZF Publishing House “St. Grigorii Bogoslov” pp. 216-225. URL: <https://dspace.uzhnu.edu.ua/jspui/bitstream/lib/35604/1/Monograph-VUZF-2021.pdf> [in Bulgaria].
4. Zagurskiy O., Ohiienko M., Pokusa T., Zagurska S., Pokusa F., Titova L., Rogovskii I. (2020). Study of efficiency of transport processes of supply chains management under uncertainty. Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole. Retrieved from: https://www.wszia.opole.pl/ebook/7_2020.pdf [in Poland].
5. Loveikin V., Romasevych Y., Shymko L., Ohiienko M., Duczmal W., Potwora W., Titova L., Rogovskii I. (2020). Agrotechnics and optimal control of cranes and hoisting machines: *monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole*. 164 p. Retrieved from: https://www.wszia.opole.pl/wpcontent/uploads/2020/09/2020_agrotechnics_and_optimal_control_of_vranes_and_hosting_machines.pdf. [in Poland].
6. Novalska N.I., Klymenko V.V. (2021). Investytsiino-innovatsiina diialnist transportno-lohistychnykh pidpriemstv v umovakh suchasnoho biznes-seredovyscha [Investment and innovation activity of transport and logistics enterprises in the modern business environment]. *Vcheni zapysky TNU imeni V. I. Vernadskoho. Seriya: Ekonomika i upravlinnia. Tom 32 (71). № 4*, pp C.64-69 URL: http://www.econ.vernadskyjournals.in.ua/journals/2021/32_71_4/13.pdf. [in Ukrainian].
7. Zagurskiy O., Zagurska S., Ohiienko M., Titova L., Rogovskii I., Pokusa T., Ohiienko A., Razumova K. (2021). Current trends in development of transport and logistics systems of delivery of fast perishable foodstuffs. *Monograph. Opole: The Academy of Management and Administration in Opole*, ISBN 978-83-66567-35-1. Retrieved from: https://www.wszia.opole.pl/wp-content/uploads/2020/05/Mon_Zagurskiy.pdf. [in Poland].
8. Razumova K.M., Bagrly M.M., Konovalova O.V., Chayka N.G. (2021) Pitannya suchasnoho stanu Infrastrukturi transportnoyi sistemi [Issues of the

modern state of the transport system infrastructure]. *Naukoemni tehnologiyi*. #3 (51). P. 265–270. [in Ukrainian].

9. Lozova H.M., Klymenko V.V. (2021). Otsiniuvannya efektyvnosti ta konkurentospromozhnosti transportno-lohistychnykh pidpriemstv [Evaluating the efficiency and competitiveness of transport and logistics companies]. *Teoretychni ta prykladni pytannia ekonomiky: zbirnyk naukovykh prats. Vypusk 1 (42)*. pp. 142–155. URL: http://tppe.econom.univ.kiev.ua/data/2021_42/zb42_12.pdf[in Ukrainian].

10. Lagodiienko V., Karyu O., Ohienko M., Kalaman O., Lorvi I., Herasimchuk T. Choosing Effective Internet Marketing Tools in Strategic Management. *International Journal of Recent Technology and Engineering*. 2019. Vol. 8. no. 3. P. 5220-5225. <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i3/C5868098319.pdf>. [in India].



DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-6643-2021.2-627>
УДК 656.078.14

Кузьменко А. І., кандидат технічних наук,
доцент, доцент кафедри транспортних
технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
Музикін М. І., кандидат технічних наук,
доцент кафедри транспортних технологій
та міжнародної логістики Університету
митної справи та фінансів
Нестеренко Г. І., кандидат технічних наук,
доцент Українського державного
університету науки і технологій
Стрелко О. Г., доктор історичних наук,
декан факультету управління залізничним
транспортном,
професор Державного університету
інфраструктури та технологій

АНАЛІЗ ВПЛИВУ ПЛАНУ ТА ПОЗДОВЖНЬОГО ПРОФІЛЮ КОЛІЇ НА УМОВИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОНТРЕЙЛЕРНИХ ПОЇЗДІВ

У статті проаналізовано вплив плану і поздовжнього профілю колії на умови експлуатації контрейлерних поїздів. Визначено економічні показники організації контрейлерних поїздів на напрямку Львів – Мукачєво та порівняно їх

© А. І. Кузьменко, М. І. Музикін, Г. І. Нестеренко, О. Г. Стрелко, 2021

з показниками роботи автомобільного транспорту на маршруті між тими ж містами. Досвід і практика контрейлерних перевезень засвідчила про їхню доцільність та переваги. План і поздовжній профіль залізничної лінії подано у вигляді комбінації окремих реальних еталонних ділянок зазначеного напрямку, в межах якого здійснюються контрейлерні перевезення. Побудовано гістограми розподілу ухилів та кривих на ділянках Львів – Стрий, Стрий – Лавочне, Лавочне – Мукачево. Наведено результати тягово-експлуатаційних розрахунків. Запропоновано систему критеріїв для оцінювання прямих автомобільних і комбінованих (контрейлерних) перевезень. Установлено залежність собівартості перевезень і приведених витрат від їх дальності для автомобільного та контрейлерного перевезення при технічній швидкості 50 км/год.

Ключові слова: контрейлерні перевезення; автомобільний транспорт; поздовжній профіль; вантажні тарифи.

In this paper, the influence of the plan and longitudinal profile of the track on the operating conditions of piggyback trains is analyzed. The economic indicators of the organization of piggyback trains in the direction Lviv – Mukachevo are determined and compared with the indicators of road transport on the route between the same cities. An analysis of recent research and publications on the development of piggyback transport shows that further research in this area is necessary and relevant. The experience and practice of piggyback transportation has shown their feasibility and advantages.

As you know, container transportation is the transportation of loaded trucks or semi-trailers on special railway platforms. That is, this part of the road meets the basic rules for determining the technical, operational and economic performance of railway transport. It should be noted that on the railways, the indication of the group of indicators, including the cost of transportation, among other factors, is significantly influenced by the plan and profile of the track. Therefore, in this paper, the plan and longitudinal profile of the railway line is presented as a combination of individual real reference sections of the specified direction, within which the piggyback transport is carried out.

According to the results of calculations of the volumes of possible cargoes, directions of transportations and terminals where it will be possible to carry out loading and unloading of piggybacks, perspective directions of piggyback trains have been established. Histograms of the distribution of slopes and curves in the sections Lviv – Stryi, Stryi – Lavochno, Lavochno – Mukachevo were constructed. The results of traction and operational calculations are given. The train of the established lengths with evenly distributed weight is accepted as calculation model. The settlement train consists of a locomotive, two passenger cars for drivers and forty or twenty long-base platforms loaded with road trains.

A system of criteria for the evaluation of direct road and combined (piggyback) transportation is proposed. Two variants of cargo delivery organization between Lviv and Mukachevo are compared: automobile and piggyback. The dependence of the cost of transportation and reduced costs on their range for road and piggyback transportation at a technical speed of 50 km/h.

Further scientific research may be aimed at improving the technical component that affects the economic attractiveness of piggyback transport for domestic and foreign indicators. After all, the development of this type of transportation will help strengthen Ukraine's competitive position in the European logistics market.

Key words: piggyback transportation; road transport; longitudinal profile; freight rates.

Постановка проблеми. В Україні велика увага приділяється розвитку транспортної системи країни, її інтеграції в міжнародну транспортну мережу. Дослідження, які проводились Комісією Європейського Союзу стосовно транспорту [1], виявили суттєві переваги контрейлерних перевезень над звичайними автоперевезеннями, адже вони забезпечують: високу швидкість і гарантію доставки вантажів відповідно до графіка руху поїзда; гарантовану безпеку перевезення за будь-яких погодних умов; гарантовану охорону транспортних засобів і вантажів під час руху та стоянки поїзда; значне скорочення часу проходження прикордонного й митного контролю; збереження транспортного засобу, заощадження його моторесурсу та економію палива; збереження автомобільних доріг; збереження екології навколишнього середовища; економію витрат на паливо та оформлення товаросупроводжувальних документів.

На шляху реалізації контрейлерного способу доставки вантажів виникають проблеми, пов'язані зі специфічними умовами перевезень, які виявляються у відсутності вивчених характеристик транспортного процесу, критеріїв ефективності, що відповідають ринковим умовам, теоретичних розробок в галузі створення контрейлерних технологій перевезень [2].

Нині частка ринку транспортно-експедиційних послуг українських автоперевізників на ринку міжнародних перевезень знижується [1]. Серед причин зазначається обмежений обсяг дозволів на в'їзд в ряд країн. Загальний обсяг дозволів для українських автоперевізників не задовольняє фактичної потреби. Впровадження контрейлерних перевезень в Україні на взаємовигідних та привабливих умовах для всіх учасників процесу перевезень може стати подоланням цієї проблеми. Також важливою проблемою є значна завантаженість автомобільних доріг України [1]. Одним із найдієвіших способів з розвантаження міжнародних автомобільних трас також може стати використання контрейлерних перевезень.

Як відомо, контрейлерні перевезення – це транспортування на спеціальних залізничних платформах навантажених фур або напівпричепів. Тобто ця частина шляху відповідає основним правилам визначення техніко-експлуатаційних та економічних показників роботи залізничного транспорту. Слід зауважити, що на залізницях на зазначені групи показників, у тому числі й вартість перевезень, крім інших факторів, суттєво впливають план та профіль колії. Тож методи досліджень, запропоновані у даному дослідженні, дуже актуальні й націлені на популяризацію контрейлерних перевезень серед провідних перевізників нашої країни.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Питанням розвитку контрейлерних перевезень присвячена велика кількість наукових праць, статей та публікацій. Зокрема, в свої працях їх розглядали такі автори, як: Е. М. Воевудський, Г. І. Кирпа, Л. Н. Матюшин, В. К. Мироненко, Є. В. Нагорний, Н. А. Нефедов, Н. В. Пономарьова, Ю. О. Сілантьєва, Б. Н. Стрекалов, Т. В. Харченко та багато інших. Наприклад, у своєму спільному дослідженні [3] С. В. Ширяєва та Т. І. Конрад виконали аналіз організації закордонних автомобільно-залізничних перевезень вантажів, який засвідчив про необхідність подальшого залучення міжнародного досвіду організації змішаних вантажних перевезень. Але вони не враховують ряд факторів, які впливають на виконання перевезень. Тому подальше дослідження даного напрямку необхідне та актуальне.

Зокрема, метою статті [4] є аналіз наявних проблем і перспектив організації контрейлерних перевезень та оцінка ефективності використання даної технології в Україні на прикладі одного з найбільш перспективних маршрутів. Виконати порівняльну оцінку витрат вантажовідправників на перевезення вантажів за різними технологіями між терміналами Дніпро–Ліски і Чоп.

Автори дослідження [2] вважають, що головна мета активізації перевезень у контрейлерному сполученні полягає в переключенні частини вантажопотоків з автомагістралей на залізничний транспорт та в створенні більш збалансованої транспортної системи, що знижує екологічне навантаження і підвищує ефективність міжнародних перевезень. На їхню думку, до об'єктивних чинників, що сприяють розвитку контрейлерних перевезень в Україні, поряд з економією палива і ресурсного пробігу автомобільних транспортних засобів, зниженням імовірностей дорожньо-транспортних подій і схоронністю автодорог, належить також усунення обмежень на масу автопоїздів, зниження залежності перевізних процесів від погодних умов, готовність Укрзалізниці до виконання таких перевезень завдяки наявності спеціалізованих платформ.

У своєму науковому доробку І. С. Рикованова [5] проаналізувала європейський досвід створення та розвитку системи комбінованих перевезень “залізниця-автомобіль”, визначила основні показники діяльності компаній –

членів Міжнародного союзу комбінованих автомобільних та залізничних перевезень (UIRR), що дало можливість обґрунтувати перспективність розвитку системи мультимодальних комбінованих перевезень в Україні як країни-транзитера на шляху “Китай – ЄС”.

У статті [6] авторами також досліджено особливості організації інтермодальних перевезень в Україні. Надано порівняльну характеристику контрейлерних транспортних систем та розраховано собівартість доставки вантажів з використанням даної технології. Представлено проєкт “Чумаки”, що передбачає оптимізацію транспортної логістики міжнародного холдингу “Кюне + Нагель” шляхом запровадження контрейлерних перевезень. Визначено витрати на реалізацію проєкту та окреслено можливі бар’єри для його реалізації.

Авторка дослідження [1] ставила за мету підвищення ефективності доставки вантажів у міжнародному контрейлерному сполученні за критерієм вартості перевезень. Вона виконала багатоваріантний аналіз рівноцінної відстані доставки на основі моделювання контрейлерних перевезень вантажів у міжнародному сполученні.

Виклад основного матеріалу. Першою вдалою спробою організувати курсування поїздів комбінованого транспорту був “Ярослав”. Проєкт засновано у 2003 р. Учасниками та операторами проєкту “Ярослав” виступали ДП “Український державний центр транспортного сервісу “Ліски” з боку України та ООО ПКП “ЛХС” з боку Польщі [7]. Курсування даного поїзда здійснювалось за маршрутом Київ – Славкув. На прохання автоперевізників, маршрут поїзда було продовжено до Луганська. Перевезення автопоїздів цим маршрутом здійснювались за 2,5–3 доби.

У лютому 2005 р. поїзд комбінованого транспорту “Ярослав” зупинив курсування через підвищення польською стороною тарифних ставок. До цього моменту було перевезено у складі поїзда 3,2 тис. автопоїздів [7].

У 2009 р. проєкт було відновлено. 28 березня 2009 р. вирушив поїзд комбінованого типу “Ярослав” у демонстраційний рейс за маршрутом Київ – Славкув. У складі поїзда було 15 платформ із контрейлерами, 12 платформ із контейнерами та 2 пасажирські вагони. Тривалість його руху з Києва до Славкува становила 74 год, швидкість – 600 км на добу. Цього ж року сторони встановили знижки до базових тарифів на перевезення (ООО ПКП “ЛХС” на 30 %, Укрзалізниця – на 20 %) [7].

Не можна обійти увагою також і контейнерні поїзди, адже залізничне сполучення через Сілезьку станцію Славкув має оптимальну довжину та ідеально вписується в програму створення Транс’європейської транспортної мережі (TEN-T) [8]. Перший інтермодальний поїзд прибув до Польщі 5 січня 2020 р. безпосередньо з Китаю по Новому Шовковому шляху. З китайського міста Сіань за 12 днів поїздом пройдено 9,5 тис. км. Це вдвічі швидше, ніж морем. Дебютний контейнеровоз вирушив 24 грудня 2019 р. з міста Сіаня по

ширококоліїному шляху. 45 контейнерів проїхали 9,5 тис. км через Китай, Казахстан, Росію та Україну [8]. До Польщі поїзд в'їхав через прикордонний перехід Ізов – Хрубешув.

“Євротермінал Славкув” розташований недалеко від Домброва – Гурнича, – це найзахідніше місце в Європі, до якого діходить ширококоліїна залізниця. Славкувська ширококоліїна металургійна лінія (LHS) – найдовша лінія в Польщі, призначена для вантажних перевезень. Поєднує польсько-український залізничний прикордонний перехід Хрубешув – Ізов із Сілезьким воєводством. Довжина лінії становить 400 км, вона проходить через п'ять воєводств: Люблінське, Підкарпатське, Свентокшиське, Малопольське та Поморське [8].

За результатами розрахунків обсягів можливих вантажів, напрямів перевезень та терміналів, на яких можна буде здійснювати навантаження–вивантаження контейнерів, виконаних ПАТ “Укрзалізниця”, спільно з АСМАП та представниками Міністерства інфраструктури встановлено перспективні напрямки прямування контейнерних поїздів [9]. Ще 2018 р. відбувся запуск першого тестового контейнерного поїзда з України до Австрії та Італії, транзитом через територію Угорщини. Відправлення таких поїздів можливе з трьох станцій: Вадул-Сірет, Чоп – Захонь та Мостиська 2. Досвід та практика контейнерних перевезень засвідчили їхню доцільність і переваги. Це уможливить розв'язати проблему транзиту через Угорщину і Румунію, зменшить навантаження на українські автошляхи та сприятиме збільшенню транзитних перевезень через територію України [9].

Разом із потенційними операторами перевезень уже відпрацьовувалися варіанти завантаження автомобілів на залізничні платформи як у прикордонних терміналах на території України в м. Чоп ЦТС “Ліски” та Компанії “Єврокар”, так і в терміналах суміжних країн в м. Захоні (Угорщина) та Добра (Словаччина). Оператори порушують питання оренди спеціального залізничного рухомого складу, зокрема Ro-La – платформ [10].

Але зазначені маршрути проходять частково гірською місцевістю, що негативно відображується на цілій низці показників. Тому буде доцільним план і поздовжній профіль залізничної лінії представити у вигляді комбінації окремих реальних еталонних ділянок вказаного напрямку, в межах якого здійснюються контейнерні перевезення. Подальші розрахунки здійснювалися на прикладі ділянок Львівської залізниці. У якості еталонних було прийнято ділянки головного електрифікованого ходу Львів – Стрий – Лавочне – Мукачево. Аналіз плану і поздовжнього профілю цих ділянок подано в табл. 1 та на гістограмах (рис. 1–6).

**Характеристика еталонних ділянок
за показниками поздовжнього профілю і плану**

Найменування показників	Одиниці виміру	Показники профілю і плану за ділянками		
		Львів–Стрий	Стрий–Лавочне	Лавочне–Мукачево
Довжина	км	74,89	71,77	77,09
Середній ухил	%	3,1	5,3	10,6
Протяжність ухилів крутіше ніж 6 % в процентах від довжини ділянки	%	16,0	41,3	58,2
Протяжність кривих у процентах від загальної довжини ділянки	%	24,5	41,5	52,8
Середній радіус	м	1553	943	827
Прийнята характеристика еталонної ділянки		легка	середньої важкості	важка

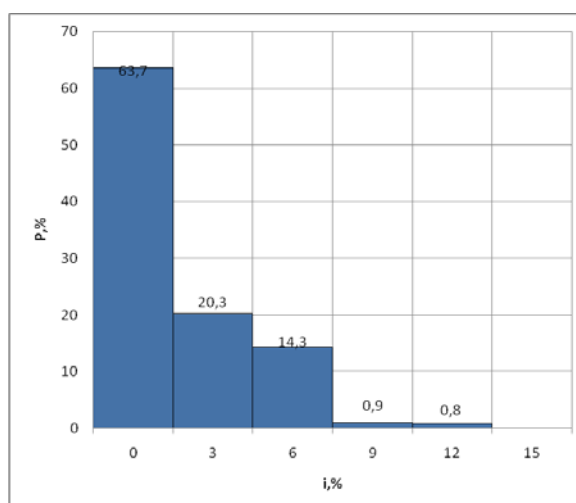


Рис. 1. Гістограма розподілу ухилів на ділянці Львів – Стрий.
Протяжність ухилів $i > 0,006 = 16\%$; $i_{сер} = 0,00031$
(побудовано авторами)

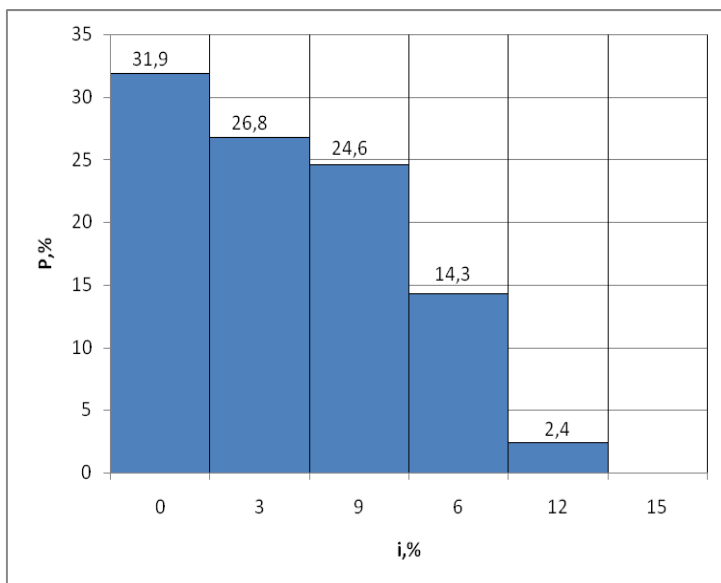


Рис. 2. Гістограма розподілу ухилів на ділянці Стрий – Лавочне.
Протяжність ухилів $i > 0,006 = 41,3 \%$; $i_{сер} = 0,00053$ (побудовано авторами)

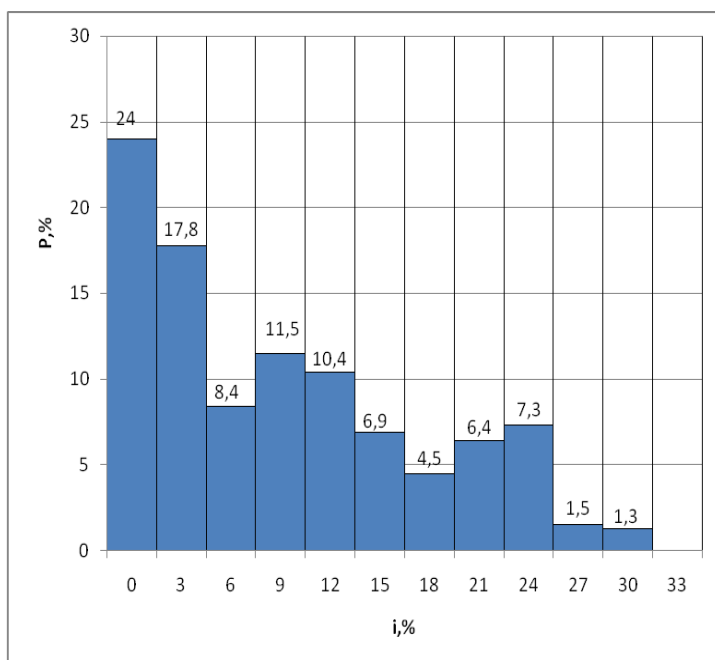


Рис. 3. Гістограма розподілу ухилів на ділянці Лавочне – Мукачево.
Протяжність ухилів $i > 0,006 = 58,2 \%$; $i_{сер} = 0,0106$ (побудовано авторами)

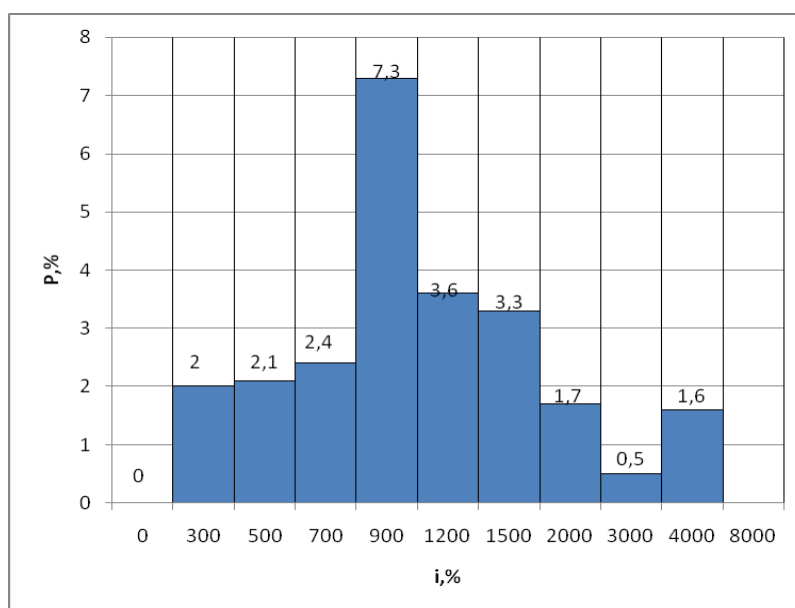


Рис. 4. Гістограма розподілу кривих на ділянці Львів – Стрий.
Протяжність кривих – 24,5 %; $R_{сер} = 1553$ м (побудовано авторами)

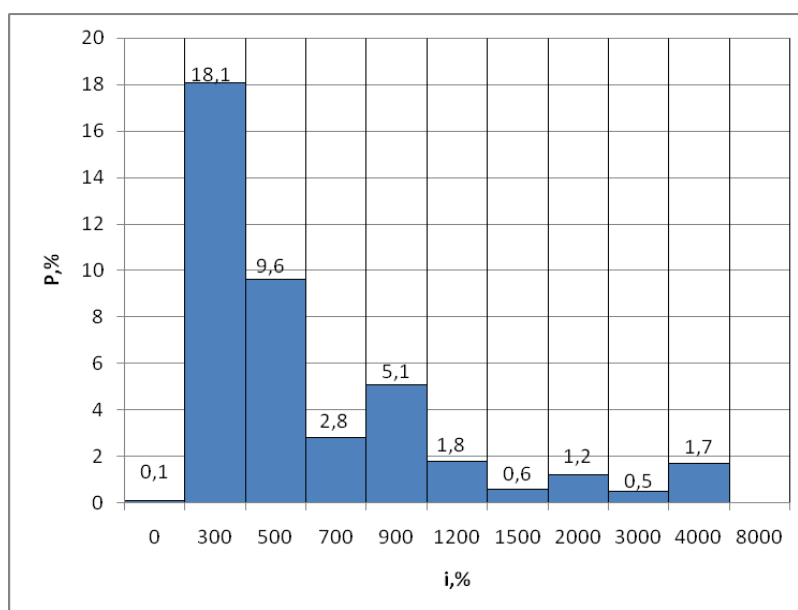


Рис. 5. Гістограма розподілу кривих на ділянці Стрий – Лавочне.
Протяжність кривих – 41,5 %; $R_{сер} = 943$ м (побудовано авторами)

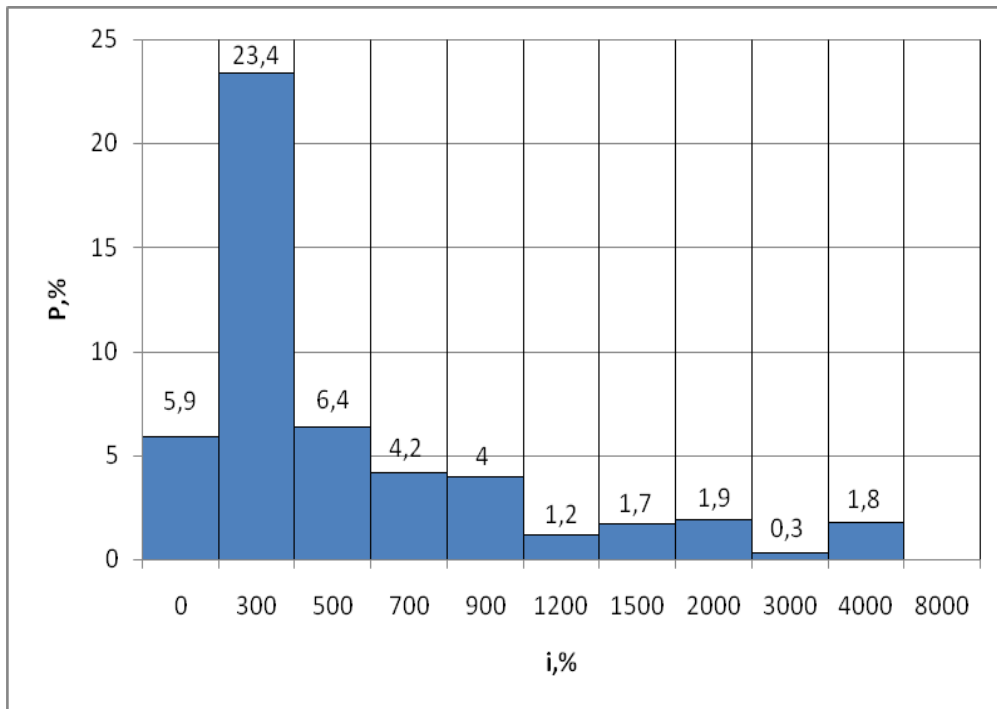


Рис. 6. Гістограма розподілу кривих на ділянці Лавочне – Мукачево.
Протяжність кривих – 52,8 %; $R_{сер} = 827$ м (побудовано авторами)

Для реальних еталонних ділянок за розробленою програмою виконано тягові та експлуатаційні розрахунки [11].

В якості розрахункової моделі прийнято поїзд довжиною L_n з рівномірно розподіленою масою. Під час руху поїзда додатковий опір від ухилу змінюється поступово, в міру переходу поїзда з одного елемента поздовжнього профілю на інший. Середній ухил під поїздом визначався за формулою:

$$i_{сер} = \sum_{j=1}^k \frac{i_j \cdot L_j}{l_n}, \quad (1)$$

де L_j – частина довжини поїзда, яка знаходиться на ухилі i_j ;

k – кількість елементів профілю.

Основні характеристики локомотивів, прийнятих до досліджень, подано в табл. 2.

Таблиця 2

Основні характеристики локомотивів

Показник	Локомотиви	
	ВЛ-11	2М62
Осьова характеристика	2о-2о-2о-2о	2(3о-3о)
Рід служби	Вантажний	Вантажний
Потужність годинного режиму, kW	5360	2x1470
Тривала швидкість, km/h	46,7	20,0
Маса локомотива, t	184	2x120
Сила тяги дотична, kG	46000	40000
Сила тяги під час руху, kG	62600	71400
Довжина по осях автозчеплення, m	33	33

Тягові розрахунки виконані для кількох розрахункових станів (табл. 3). Розрахунковий поїзд складається з локомотива, двох пасажирських вагонів для водіїв і сорока або двадцяти довгобазових платформ, які завантажені автопоїздами.

Таблиця 3

Маса складу в різних типах автопоїздів на платформі

Показник	Позначення	Варіант 1	Варіант 2	Варіант 3
Марка тягача	–	MA3-6422	Mercedes	MA3-5432
Марка напівпричепа	–	MA3-9398	Schmitz	MA3-9397
Маса тягача	q_T	9,050	9,050	7,050
Маса напівпричепа	$q_{нп}$	6,300	6,500	5,800
Вантажопідйомність напівпричепа	$q_{вп}$	32,400	26,200	20,000
Маса платформи	$q_{пл}$	24,000	24,000	24,000
Маса пасажирського вагону	q_v	52,000	52,000	52,000
Маса складу нетто	$Q_{нетто}$	1130	910	730
Маса складу брутто	$Q_{брутто}$	2800	2600	2300

У табл. 3 подано розрахункові дані за умов розміщення сорока платформ у складі поїзда.

Маса складу за цих умов визначається за формулами:

$$Q_{\text{брутто}} = 2 \cdot q_v = (q_m + q_{\text{нп}} + q_{\text{ен}} + q_{\text{пл}}) \cdot S; \quad (2)$$

$$Q_{\text{нетто}} = (q_{\text{ен}} \cdot a) \cdot S, \quad (3)$$

де S – кількість платформ у складі поїзда;

a – коефіцієнт використання вантажопідйомності напівпричепа.

В якості прикладу в табл. 4 наведено результати тягово-експлуатаційних розрахунків для ділянки Львів – Стрий при сорока платформах у складі поїзда.

Таблиця 4

**Результати тягово-експлуатаційних розрахунків
для ділянки Львів – Стрий**

Швидкість, км/г		Напрямок туди/ звідти	Час, хв	Механічна робота, ткм	Вартість пробігу		Витрати електроенергії	
max	min				грн/ поїзд	Грн /км	кВт год/ поїзд	кВт год/ км
90	77	туди	59	882	6350,7	83,6	3085	76,5
90	76	звідти	60	859	6260,8		3008	
80	73	туди	63	754	5931,3	79,2	2640	72,3
80	72	звідти	63	768	5931,3		2688	
70	66	туди	69	650	5332,2	71,2	2276	66,2
70	66	звідти	69	688	5332,2		2408	
60	58	туди	78	568	4373,6	58,4	1987	58,5
60	59	звідти	78	603	4373,6		2112	

Для встановлення впливу параметрів плану і поздовжнього профілю на вартість пробігу контейнерного поїзда в табл. 5, 6 наведено порівнювальні дані для легкої і важкої за параметрами траси ділянок.

Аналіз даних (табл. 5, 6) засвідчує, що під час переходу від легкого до важкого ухилу і плану лінії вартість пробігу контрейлерного поїзда збільшується в середньому у 1,6 – 1,7 раза для прийнятих вихідних даних.

Основні положення методики визначення раціональної дальності контрейлерних перевезень повинні також враховувати план та поздовжній профіль траси. Згідно з пунктом 12.2 “Збірника тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України” та пов’язані з ними послуги [12], плата за перевезення вантажів контрейлерними відправками у власних вагонах у складі контрейлерних поїздів визначається за контрейлеро-кілометр за ставками: 2,2 грн для порожнього контрейлера та 3,5 грн – для завантаженого. Але, як свідчать дослідження, ці значення можуть збільшуватись на 0,2 грн/контрейлер/км під час проїзду складних ділянок.

Таблиця 5

**Порівнювальні дані за вартістю пробігу поїзда
(склад із 40 платформ)**

Ходова швидкість V_x , км/год.	Вартість пробігу C_0 , грн/поїздо-км для ділянок		Коефіцієнт збільшення вартості k_f
	Львів – Стрий	Лавочне – Мукачево	
40	9,84	16,23	1,65
50	11,11	17,52	1,58
60	12,39	18,80	1,52
70	13,67	20,09	1,47

Таблиця 6

**Порівнювальні дані за вартістю пробігу поїзда
(склад із 20 платформ)**

Ходова швидкість V_x , км/год	Вартість пробігу C_0 , грн/поїздо-км для ділянок		Коефіцієнт збільшення вартості, k_f
	Львів – Стрий	Лавочне – Мукачево	
40	6,7	9,83	1,47
50	7,72	12,83	1,66
60	8,74	15,82	1,81
70	9,75	18,83	1,93

З іншого боку, вартість одного кілометра пробігу автомобіля буде набагато більшою. Розрахунок вартості перевезення вантажу автомобільним транспортом зазвичай ґрунтується на базі основних витрат, необхідних для транспортування. Тарифи можуть різнитися у компаній, що надають схожі послуги, і це залежить від типів і видів вантажу, маршруту, перевезення, наявності певних умов транспортування. Можна виділити кілька основних аспектів, з яких і формується сума доставки вантажів [13]:

1. Дальність. Це один із ключових чинників, що впливає на ціну доставки. Розрахунок кілометражу залишається актуальним навіть у тому випадку, якщо транспортні тарифи не прив'язані до ціни перевезень вантажу за кілометр. При цьому тарифи відрізняються в межах міста і за його межами, а також по різних регіонах держави. Особливо високими вони будуть на досліджуваному полігоні, адже більша частина маршруту пролягає у складних гірських умовах.

2. Витрати на обслуговування транспортного засобу. Від цього пункту також залежить ціна необхідної доставки. Розрахунок здійснюється з урахуванням коефіцієнта зносу автомобіля, витрати палива, суми на обслуговування та інших технічних характеристик. Необхідно зазначити, що для аналізованого маршруту Львів – Мукачево ці витрати також дещо більші середніх, адже в складних умовах експлуатації транспортних засобів витрати на їх обслуговування збільшуються.

3. Послуги, пов'язані з експедируванням і охороною. Вони також беруться до уваги, коли потрібно розрахувати вартість вантажоперевезення, але дорожні умови на їх величину майже не впливають.

4. Вид вантажу та маса відправлення. Різні типи вантажів потребують певних умов перевезення: додержання швидкісного режиму, акуратність водіння, правильний вибір виду транспортного засобу тощо.

5. Роботи, пов'язані з навантаженням і розвантаженням. Вони враховуються у разі, якщо вантажовідправник не виконує ці операції особисто. У цьому випадку тариф на транспортування залежатиме від механізації навантажувально-розвантажувальних робіт, наявності або відсутності упаковки (контейнера) і подібних пунктів.

6. Географія перевезення вантажу. Іноді навіть між одними й тими ж самими пунктами відправлення та призначення можливі декілька варіантів маршрутів, що різняться дорожніми умовами. Відповідно й тарифна вартість проїзду 1 км для них буде різною. Наприклад, дороги державного значення популярніші й зазвичай на них сума перевезень нижча у порівнянні з вартістю доставки у віддалену місцевість, де погано розвинена транспортна інфраструктура.

7. Крім основних витрат, в тарифи враховуються також додаткові, які входять у кінцеву суму за перевезення вантажу. Серед них виділяються витрати, необхідні для оформлення митних документів і документів транзиту; засоби для необхідного маркування товарів; сума упаковки та інших пакувальних матеріалів; оплата складських послуг тощо.

За даними [14], тарифна вартість варіюється у межах від 25,5 до 45,8 грн/км, а на найважчих ділянках сягає 63 грн/км. На рис. 7 зображено динаміку зміни цін на перевезення вантажів територією України у тентованому автомобілі для розрахункової ваги 20 тонн за дев'ять останніх місяців 2021 р.

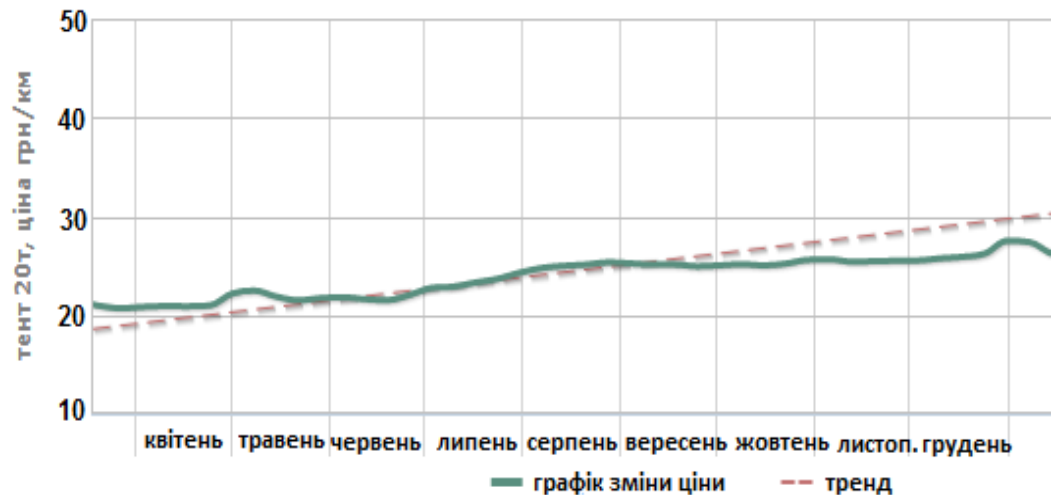


Рис. 7. Динаміка зміни цін на перевезення вантажів територією України (тент, 20 тонн) [14]

Визначальним показником у виборі виду транспорту для вантажних перевезень вважають собівартість перевезень і питомі капітальні вкладення в основні та оборотні засоби. Однак середні (звітні) показники за собівартістю перевезень залізничним та автомобільним транспортом зіставляти не можна, тому що їх розраховано за різних величин вантажонапруженості й дальності перевезень. При цьому на автомобільному транспорті в собівартість не враховано витрати на утримання колійного господарства (дорожня складова). У пропонованій [15] методиці для обґрунтування раціональної сфери контрейлерних перевезень враховано вищезазначені недоліки. При цьому було розглянуто чотири групи критеріїв (рис. 8).



Рис. 8. Система критеріїв для оцінювання прямих автомобільних і комбінованих перевезень (запропоновано авторами)

Так як в економічних показниках відображуються практично всі аспекти роботи транспорту, то під час порівняння варіантів (автомобільне або контейнерне перевезення) передусім розглядалися економічні критерії, а вже потім враховувались інші.

Собівартість перевезень визначається грошовим вираженням поточних витрат на виконання одиниці перевезень:

$$C_i = \frac{E_i}{(p \cdot L)_i}, \quad (4)$$

де E_i – експлуатаційні витрати, грн, які визначаються за формулою:

$$E_i = E_{np} + E_{час} + E_{дор}, \text{ грн}, \quad (5)$$

де E_{np} , $E_{час}$, $E_{дор}$ – експлуатаційні витрати, пов’язані відповідно з пробігом, (паливо, мастило, технічне обслуговування та ін.), з часом (заробітна платня, амортизаційні відрахування та ін.) та із утриманням колійного господарства дорожня складова);

pL – вантажообіг (обсяг, помножений на дальність перевезення), *т-км*;

i – варіант перевезення.

Іншим критерієм є мінімум витрат праці на доставку продукції від складу відправника до складу одержувача, тобто приведені витрати на всьому шляху прямування. Зазначений критерій має такий вигляд:

– під час прямих автомобільних перевезень

$$P_a = E_a + Ш_a + E_n \cdot (K_a + C_a), \quad (6)$$

– під час контрейлерних перевезень

$$P_{a-z} = P_a + P_z, \quad (7)$$

де P_a – приведені витрати на перевезення автомобільним транспортом, *грн*;

P_z – приведені витрати на перевезення залізничним транспортом, які визначаються за формулою:

$$P_z = E_z + Ш_z + E_n \cdot (K_z + C_z) + C_{зб} + C_{нро}, \quad (8)$$

де E_a , E_z – поточні річні експлуатаційні витрати відповідно під час автомобільних та залізничних перевезень;

$Ш_a$, $Ш_z$ – шкода, яку спричиняє транспорт навколишньому середовищу;

K_a , K_z – одночасні капітальні вкладення та вартість рухомого складу;

C_a , C_z – вартість вантажної маси (зворотні фонди);

$C_{зб}$, $C_{нро}$ – витрати відповідно на зберігання та навантажувально-розвантажувальні операції на станціях;

E_n – нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат, який приймається 0,15 – 0,12.

У визначенні експлуатаційних і капітальних витрат на залізничному транспорті враховувались: вид тяги, кількість головних колій, план та профіль колії, маса поїзда та ін. При виконанні розрахунків для автомобільного транспорту враховувались тип і вантажопідйомність автотранспортних засобів, категорії доріг, швидкості руху та ін. Вихідні дані, що були прийняті для розрахунків, подано в табл. 7.

Витратні ставки при автомобільних перевезеннях

Найменування	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
Витрати, пов'язані з пробігом	e_{np}	у.о./км	24,715
Втрати, пов'язані з часом	$e_{час}$	у.о./год	340,000
Витрати з утримання доріг	$e_{дор}$	у.о./т/км	0,713
Коефіцієнт використання пробігу	b	–	0.800
Коефіцієнт використання вантажопідйомності вагонів	a	–	0,870
Коефіцієнт використання автопарку	k_n	–	0,700
Тривалість перебування автомобілів у наряді	$t_{нар}$	год	12
Тривалість перебування автомобіля під навантаженням/вивантаженням	$t_{нв}$	год	1,5
Витратна ставка під час використання автомобіля з дизельним двигуном	U_a	у.о./км	3,88

Спочатку було виконано розрахунок витрат при прямому автомобільному перевезенні. Поточні експлуатаційні витрати визначалися за формулою:

$$E_a = \frac{e_{np} \cdot L}{a \cdot b \cdot q_{ен}} + \frac{e_{час} (L + b \cdot V_{mex} \cdot t_{нар})}{a \cdot b \cdot q_{ен} \cdot V_{mex}} + \frac{e_{дор} \cdot L}{a}, \text{ у.о./т} \quad (9)$$

де e_{np} , $e_{час}$, $e_{дор}$ – витратні ставки відповідно до прийнятих вихідних даних для розрахунку (див. табл. 7);

$q_{ен}$ – вантажопідйомність напівпричепу, т.

Збиток від забруднення атмосфери викидами автомобільного транспорту при використанні автомобілів з дизельними двигунами розраховується за формулою:

$$E_a = \frac{U_a \cdot L}{a \cdot b \cdot q_{en}}, \text{ у.о./м} \quad (10)$$

де U_a – витратна ставка при використанні автомобіля з дизельним двигуном (див. табл. 7).

Капітальні вкладення в рухомий склад і постійні засоби автотранспорту визначалися за формулою:

$$E_a = \frac{100 \cdot (C_a + C_b) \cdot t_c}{365 \cdot \kappa_n \cdot t_{нар} \cdot a \cdot b \cdot q_{en} \cdot V_{mex}}, \text{ у.о./м} \quad (11)$$

де C_a, C_b – вартість відповідно автотранспортного засобу і виробничо-технічної бази, віднесена до одного автомобіля, у.о.;

t_c – час однієї поїздки, год., який визначається за формулою:

$$t_c = \frac{L + b \cdot V_{mex} \cdot t_{np}}{b \cdot V_{mex}}, \text{ год.} \quad (12)$$

Матеріальні засоби, які знаходяться в обігу, розраховуються за формулою, яка аналогічна для обох видів транспорту:

$$C = \frac{100 \cdot C_b + O_a}{365}, \text{ у.о./м} \quad (13)$$

де O_a – обіг автомобіля, год., який визначається за формулою:

$$O_a = \frac{t_e + t_r}{24}, \text{ год.} \quad (14)$$

де t_e – втрати часу на заїзди для технічного обслуговування, ремонту, заправки та ін. (орієнтовно прийнято $t_e = 0,021$, год.);

C_b – вартість 1 т вантажу, грн.

За умов різних вихідних даних (дальності перевезення вантажів, швидкості руху, вантажопідйомності автотранспортних засобів та ін.) були визначені собівартість перевезень, питомі капітальні вкладення та якісні показники (витрата палива, необхідна кількість автопоїздів).

Про ступінь зниження собівартості перевезень із зростанням відстані при різній технічній швидкості і вантажопідйомності напівпричепів яскраво свідчать залежності, показані на рисунку 9. Більш інтенсивне зниження собівартості перевезень спостерігається при дальності до 200 – 250 км. Для більших значень відстані зниження собівартості незначне.

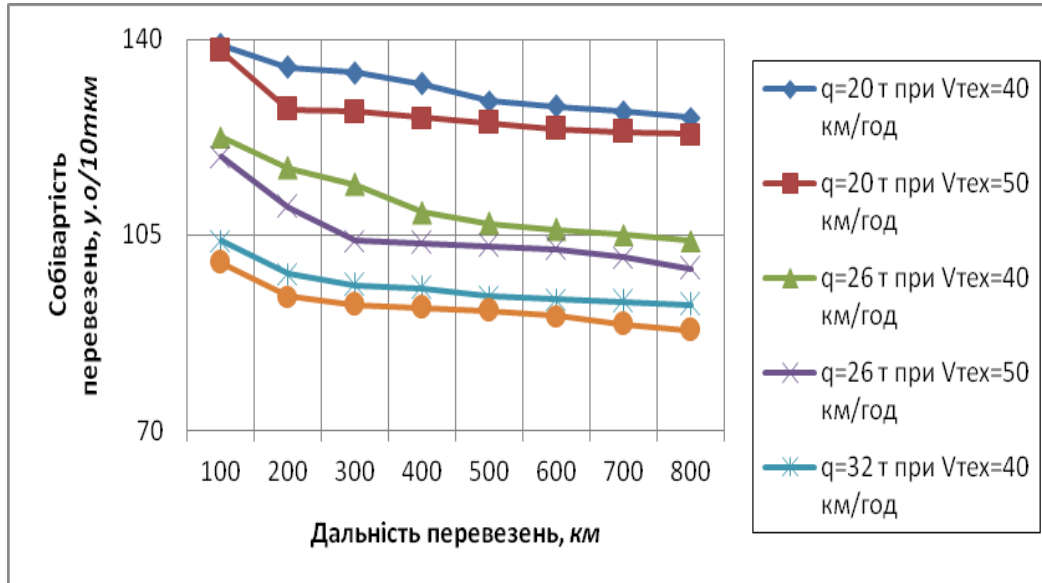


Рис. 9. Залежність собівартості перевезень від дальності перевезень і вантажопідйомності автомобілів (побудовано авторами)

Експлуатаційні витрати при залізничних перевезеннях (організації контрейлерних поїздів) розраховуються за формулою [16]:

$$E_z = e_{np} + e_{фр} + e_{рух} + e \cdot L + e_{тех} \cdot N_{тех} + e_{пз} + e_{зб}, \text{ грн./т} \quad (15)$$

де e_{np} , $e_{фр}$, $e_{рух}$, $e_{тех}$, $e_{пз}$, $e_{зб}$ – витратні ставки відповідно на навантаження-розвантаження, формування і розформування составів, рух поїздів, обслуговування на технічних станціях, утримання постійних засобів і зберігання вантажів (див. табл. 8).

**Витратні ставки при залізничних перевезеннях
під час організації контрейлерних перевезень**

Найменування	Позначення	Одиниця вимірювання	Величина
Витрати на виконання початкових та кінцевих операцій	$e_{фр}$	грн./т	488,33
Витрати на рух поїзда	$e_{рух}$	грн./т-км	0,28
Пропуск поїздів через технічні станції без переробки вагонів	$e_{бп}$	грн./т	3,8
Те ж – з переробкою	$e_{зп}$	грн./т	46,19
Навантаження та розвантаження платформ	$e_{нв}$	грн./т	1,89
Витрати на утримання постійних засобів	$e_{пз}$	грн./т-км	35,43
Утримання складів і зберігання вантажів на станціях	$e_{зб}$	грн./т	4,50
Коефіцієнт нерівномірності перевезень	γ	—	1,10-1,15

Вартість локомотивного парку і парку платформ для організації контрейлерних перевезень визначається за формулою:

$$K_z = k_{рл} \cdot N_{лок} \cdot Ц_{лок} + k_{рп} \cdot N_{пл} \cdot Ц_{пл}, \text{ у.о.} \quad (16)$$

де $N_{лок}$, $N_{пл}$ – кількість відповідно платформ і локомотивів;

$k_{рл}$, $k_{рп}$ – коефіцієнти, які враховують резерв рухомого складу (локомотивів та платформ відповідно);

$Ц_{лок}$, $Ц_{пл}$ – вартості, відповідно, локомотиву і платформи.

Вартість вантажів, які знаходяться в процесі перевезень, розраховано за формулою (4), яка однакова як для автомобільного, так і для залізничного транспорту, що виконує контрейлерні перевезення.

Наступним кроком було визначено вартісні показники по варіантах перевезення (суто автомобільному та контрейлерному, тобто залізничному). На рисунку 10 наведено графіки собівартості перевезень $C_e(a)$, $C_e(z)$ та питомих приведених витрат $\Pi_{\text{TKM}}(a)$, $\Pi_{\text{TKM}}(z)$ під час перевезення вантажів автомобільним та залізничним транспортом при однаковій технічній (ходовій) швидкості 50 км/год. У даному випадку мається на увазі, що (а) – це показники для автомобільного транспорту, а (з), відповідно, – для залізничного під час здійснення контрейлерного перевезення.

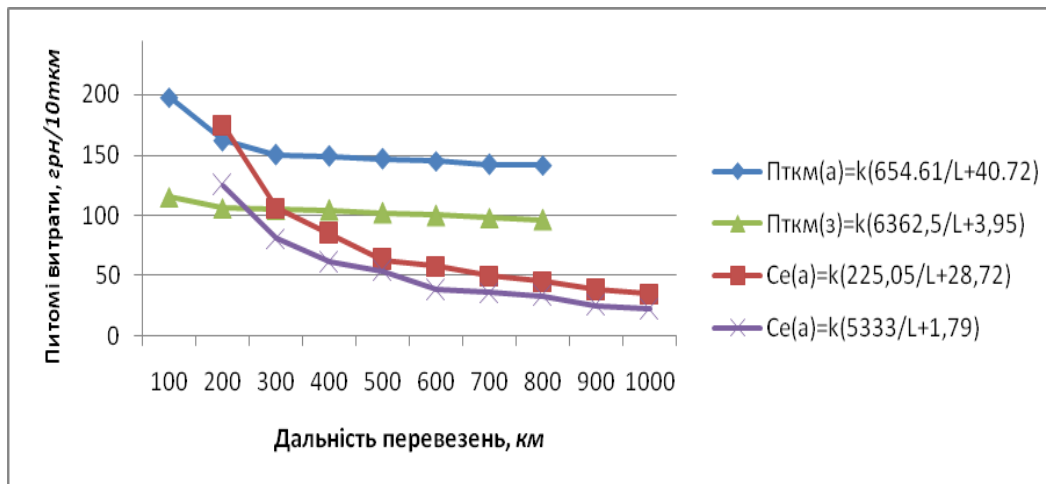


Рис. 10. Залежність собівартості перевезень і приведених витрат, які віднесено до 10 т-км, від дальності перевезень для автомобільного та залізничного транспорту при технічній швидкості 50 км/год. (побудовано авторами)

Аналіз залежності $C_e(z)$ показав, що у відмінності від автотранспорту при збільшенні дальності собівартість перевезень залізничним транспортом різко знижується. При однаковій дальності перевезень рівність приведених витрат $\Pi_{\text{TKM}}(a) = \Pi_{\text{TKM}}(z)$ має місце при відстані 150 – 160 км, рівність собівартості перевезень $C_e(a) = C_e(z)$ – при дальності 190 – 200 км для прийнятих вихідних даних.

Якщо нормативний коефіцієнт ефективності капітальних витрат E_n буде дорівнювати 0,15, тобто буде аналогічним для того, що розглядався на автомобільному транспорті, приведені витрати зростуть за рахунок підви-

щення вартості засобів, які знаходяться в обігу, і вартості рухомого складу. Умова рівності $P_{TKM}(a) = P_{TKM}(z)$, як і собівартість перевезення, буде мати місце при дальності перевезень біля 200 км.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі. Перспективність розвитку контрейлерних перевезень в Україні пов'язана із можливістю: по-перше, забезпечувати високі швидкості доставки при дотриманні режиму праці і відпочинку водіїв; по-друге, задовольняти екологічні вимоги в різних країнах до автомобільного транспорту; по-третє, знизити собівартість перевезень, що підвищить конкурентоспроможність національних перевізників; по-четверте, поступово інтегрувати національну транспортну систему до європейської. Але є ряд чинників, що негативно впливають на подальший розвиток даного виду перевезень. У роботі було досліджено вплив плану і поздовжнього профілю колії на умови експлуатації контрейлерних поїздів та економічні показники організації маршрутів за участю автомобільного та залізничного транспорту. Подальші наукові розвідки можуть бути націлені на удосконалення технічної складової, яка впливає на економічну привабливість контрейлерних перевезень для вітчизняних та іноземних показників. Адже розвиток даного виду перевезень сприятиме посиленню конкурентних позицій України на ринку логістичних послуг Європи.

Список використаних джерел:

1. Денис О. В. Підвищення ефективності доставки вантажів у міжнародному контрейлерному сполученні. дис. ... канд. тех. наук 05.22.01 – транспортні системи. Київ: НТУ, 2021. 198 с.
2. Чапенко О. С. Розвиток контрейлерних перевезень вантажів і проблеми їх впровадження. *Двадцять другі економіко-правові дискусії*. 29.11.2017. URL: <http://www.spilnota.net.ua/ua/article/id-2169/>
3. Ширяєва С. В., Конрад Т. І. Аналіз закордонного досвіду організації автомобільно-залізничних перевезень вантажів. *Управління проектами, системний аналіз і логістика. Технічна серія*. 2012. Вип. 10. С. 292–297.
4. Вернигора Р. В., Журавель І. Л., Єльнікова Л. О. Дослідження ефективності застосування контрейлерної технології перевезення вантажів в Україні. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2021. Вип. 22. С. 56–66. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2021/247884>
5. Рикованова І. С. Контрейлерні перевезення: європейський досвід та проблеми і перспективи розвитку в Україні. *Науковий вісник Ужгородського національного університету*. 2020. Вип. 32. С. 74–80. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2020-32-12>

6. Горбась І. М., Федоренко М. А. Проектування контрейлерних перевезень в Україні. *Електронне наукове фахове видання «Ефективна економіка»*. 2020. №5. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.5.90>

7. Ярослав (поїзд). URL: [https://www.wiki.uk-ua.nina.az/%D0%AF%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2_\(%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3\).html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/%D0%AF%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2_(%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3).html)

8. Здибель Г. Перший контейнерний поїзд з Китаю до Польщі прибуває в Славкув. URL: <https://asstra.com.ua/ukr/novini-asstra/2020/1/pershij-kontejnernij-poizd-z-kitayu-do-polshhi-pribuvae-v-slavkuv/>

9. Лавренюк Ю. Міністерство інфраструктури приступило до відновлення контрейлерних перевезень. URL: <https://mtu.gov.ua/news/29666.html>

10. Савченко К. Без розвинутої мультимодальної інфраструктури ми нікуди не поїдемо. *Автор Rail.insider*. 2020. URL: <https://www.railinsider.com.ua/savchenko-bez-rozvyunutoyi-multymodalnoyi-infrastruktury-my-nikudy-ne-poividemo/>

11. Гребенюк П. Т., Долгунов А. Н., Скворцова А. И. Тяговые расчеты: Справочник / Под ред. Гребенюка. М.: Транспорт, 1987. 272 с.

12. Збірник тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ними послуги. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#Text>

13. Офіційний сайт ПП “Транс-Атлас”. URL: <https://trans-atlas.com.ua/ua/article/94>

14. Динаміка зміни цін на перевезення вантажів Україна, тент 20 тонн (статистика цін на перевезення Україна вантажів автомобільним транспортом 20 тонн за останній рік). URL: <https://della.ua/price/local/>

15. Савенко А. С., Музыкина Г. И. Экономическая эффективность контрейлерных перевозок на железных дорогах Украины. *Залізничний транспорт України*. 1999. № 5. С. 22–23.

16. Кірдіна О. Г., Коловойда Н. В., Шамрай А. Є. Підходи до обліку експлуатаційних витрат підприємств залізничного транспорту. *Вісник економіки транспорту та промисловості*. 2019. № 68. С. 279–288.

References:

1. *Denys O. V.* Pidvyshchennia efektyvnosti dostavky vantazhiv u mizhnarodnomu kontreilernomu spoluchenni. dys. ... kand. tekhn. nauk 05.22.01 – transportni systemy. Kyiv: NTU, 2021. 198 p.
2. *Chapenko O. S.* Rozvytok kontreilernykh perevezen vantazhiv i problemy yikh vprovadzhennia. *Dvadtsiat druhi ekonomiko-pravovi dyskusii*. 29.11.2017. URL: <http://www.spilnota.net.ua/ua/article/id-2169/>
3. *Shyriaieva S. V. & Konrad T. I.* Analiz zakordonnoho dosvidu orhaniazatsii avtomobilno-zaliznychnykh perevezen vantazhiv. *Upravlinnia proektamy, systemnyi analiz i lohistyka. Tekhnichna serii*. 2012. Issue 10. P. 292-297.
4. *Vernyhora R. V., Zhuravel I. L. & Yelnikova L. O.* Doslidzhennia efektyvnosti zastosuvannia kontreilernoï tekhnolohii perevezennia vantazhiv v Ukraini. *Transportni systemy ta tekhnolohii perevezen*. 2021. Issue 22. P. 56-66. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2021/247884>
5. *Rykovanova I. S.* Kontreilerni perevezennia: yevropeiskyi dosvid ta problemy i perspektyvy rozvytku v Ukraini. *Naukovyi visnyk Uzhhorodskoho natsionalnoho universytetu*. 2020. Issue 32. P. 74-80. DOI: <https://doi.org/10.32782/2413-9971/2020-32-12>
6. *Horbas I. M. & Fedorenko M. A.* Proektuvannia kontreilernykh perevezen v Ukraini. *Elektronne naukove fakhove vydannia «Efektyvna ekonomika»*. 2020. №5. DOI: <https://doi.org/10.32702/2307-2105-2020.5.90>
7. Yaroslav (poizd). URL: [https://www.wiki.uk-ua.nina.az/%D0%AF%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2_\(%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3\).html](https://www.wiki.uk-ua.nina.az/%D0%AF%D1%80%D0%BE%D1%81%D0%BB%D0%B0%D0%B2_(%D0%BF%D0%BE%D1%82%D1%8F%D0%B3).html)
8. *Zdybel H.* Pershyi konteinernyi poizd z Kytaiu do Polshchi prybuvaie v Slavkuv. URL: <https://asstra.com.ua/ukr/novini-asstra/2020/1/pershij-kontejnernij-poizd-z-kitayu-do-polshhi-pribuvae-v-slavkuv/>
9. *Lavreniuk Yu.* Ministerstvo infrastruktury prystupilo do vidnovlennia kontreilernykh perevezen. URL: <https://mtu.gov.ua/news/29666.html>
10. *Savchenko K.* Bez rozvynutoi multymodalnoi infrastruktury my nikudy ne poidemo. Avtor Rail.insider. 2020. URL: <https://www.railinsider.com.ua/savchenko-bez-rozvynutoyi-multymodalnoyi-infrastruktury-my-nikudy-ne-poyidemo/>
11. *Hrebenuk P. T., Dolhunov A. N. & Skvortsova A. Y.* Tiahovye raschety: Spravochnyk / Pod red. Hrebenuka. M.: Transport, 1987. 272 p.

12. Zbirnyk taryfiv na perevezennia vantazhiv zaliznychnym transportom u mezhakh Ukrainy ta poviazani z nymy posluhy. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#Text>

13. Ofitsiyni sait PP “Trans-Atlas”. URL: <https://trans-atlas.com.ua/ua/article/94>

14. Dynamika zminy tsin na perevezennia vantazhiv Ukraina, tent 20 tonn (statystyka tsin na perevezennia Ukraina vantazhiv avtomobilnym transportom 20 tonn za ostannii rik). URL: <https://della.ua/price/local/>

15. *Savenko A. S. & Muzykyna H. I.* Ekonomycheskaia efektyvnost kontreilernykh perevozok na zheleznykh dorohakh Ukrainy. *Zaliznychnyi transport Ukrainy*. 1999. № 5. P. 22-23.

16. *Kirdina O. H., Kolovoida N. V. & Shamrai A. Ye.* Pidkhody do obliku ekspluatatsiinykh vytrat pidpriemstv zaliznychnoho transportu. *Visnyk ekonomiky transportu ta promyslovosti*. 2019. № 68. S. 279-288.

Шановні автори!

Просимо враховувати такі вимоги до рукописів статей і порядку їх подання до друку:

1. Приймаються статті, написані українською, англійською мовами, обсягом 0,5–1 авт. арк.

2. Рукопис статті повинен мати такі елементи:

– на початку статті англійською мовою: прізвище, ініціали автора, назва статті, адресні дані авторів (назва установи, закладу, відомча належність, адреса організації, місто, країна, інформація щодо ORCID (zareestruvatisia можна за адресою <https://orcid.org>), розширена англійська анотація (від 1800 знаків), ключові слова, пристатейні списки використаних джерел у романському алфавіті (латиницею);

– прізвище та ініціали автора, науковий ступінь, посада (укр. мовою);

– назва статті (українською мовою);

– УДК;

– анотація українською мовою (анотація за змістом статті повинна містити не менше 450 знаків без пробілів. При перекладі з робочої української на англійську мову кількість знаків не має значення. З робочої англійської (450 знаків без пробілів) – на українську мову);

– основний текст статті;

– список використаних джерел.

3. Основний текст статті складається з таких структурних елементів.

Ключові слова (4–5 слів).

Постановка проблеми.

Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Мета статті.

Виклад основного матеріалу.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі; на англ. мові “Conclusions and Future Researches”.

Список використаних джерел (оформлюється відповідно до ДСТУ 8302:2015).

Зазначені елементи виділяються в рукописі напівжирним шрифтом.

4. Текст статті має бути набраний у текстовому редакторі Microsoft Word.

Поля з усіх сторін – 20 мм.

Шрифт – Times New Roman 14 з інтервалом 1,5.

Найбільш складні рисунки пропонується набирати, застосовуючи графічний редактор Microsoft Visio.

Формули пропонується набирати, застосовуючи вбудований у MS Word редактор формул MathType 4.0(6.0) Equation. Номери формул “притискаються” до правого краю сторінки, сама формула розташовується по середині сторінки.

Посилання на літературу подаються безпосередньо в тексті. У квадратних дужках зазначається порядковий номер використаного джерела в порядку згадування, а через кому – конкретна сторінка.

5. До редакції подаються:

- паперовий варіант статті за підписом автора;
- електронний варіант статті;
- завірена рецензія доктора або кандидата наук відповідного профілю;
- довідка про автора українською мовою (прізвище, ім'я, по батькові повністю, організація, посада, адреса, науковий ступінь, вчене звання, контактні телефони, електронна адреса).

Передрук матеріалів дозволяється лише за письмової згоди редакції.

Матеріали, що публікуються, відображають позицію автора, яка може не збігатися з поглядом редакції. За достовірність фактів, статистичних даних та іншої інформації відповідальність несе автор.

Редакція залишає за собою право наукового та літературного редагування статей без додаткової консультації з автором. Листування з читачами ведеться лише на сторінках журналу.