

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ТРЕНАЖЕРНОЙ ПОДГОТОВКИ СУДОВОДИТЕЛЕЙ

Каштальян П. В., аспирант кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: kashtalyanp@gmail.com;

Терновая Т. И., к.т.н., доцент кафедры эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматики Херсонской государственной морской академии, e-mail: tti.kherson@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1902-6804;

Рожков С. А., д.т.н., заведующий кафедрой эксплуатации судового электрооборудования и средств автоматик Херсонской государственной морской академии, e-mail: rozhkov_ser@rambler.ru, ORCID: 0000-0002-1662-004X

Морской транспорт в настоящее время является одним из экономически выгодных видов транспорта. Его сравнительная дешевизна приводит к увеличению объемов перевозок грузов морским путем, но одновременно возрастают требования обеспечения безопасности таких перевозок. Одним из методов повышения безопасности морских перевозок является повышение квалификации судоводителей. На сегодняшний день существует большое количество различных технических и программных средств для обеспечения обучения и закрепления знаний и навыков экипажей судна. Для соответствия требованиям украинского и международного законодательства по отработке взаимодействия членов команды ходового мостика и судовых систем необходимо использовать только полноразмерные тренажерные комплексы, адаптированные к конкретным задачам и максимально приближенные к реальному объекту.

В статье рассмотрена возможность развития и адаптивного использования методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок. Проведен анализ модельных курсов IMO и их применимости к задачам тренажерной подготовки судоводителей. Проведена классификация основных задач судовождения, показан их формализованный вид и оптимальное решение. Предложена функция вероятности безаварийного плавания в качестве критерия оценки компетентности судоводителя.

Несмотря на высокий уровень автоматизации, многие задачи по навигации и управлению судном все еще осуществляются вручную. Это требует от штурманского состава знания особенностей своего судна в конкретных условиях и полной осведомленности о его навигационном оборудовании. Использование на практике нестандартной аппаратной и программной части навигационного оборудования, так же как и его эргономические особенности, на разных судах не позволяют последовать опыту авиации и проводить серийное макетирование реального оборудования в целях тренажерной подготовки. Таким образом, представляется целесообразным проводить базовое обучение штурманского состава на индивидуальных «малых» тренажерах/симуляторах с использованием адекватных математических моделей реальных судов.

Ключевые слова: *тренажерная подготовка, оптимальное управление, предыдущая прокладка, оптимальный маршрут, тренажерный комплекс, сценарий упражнения, принятие решения, оптимальное управление.*

DOI: 10.33815/2313-4763.2019.2.21.108-114

Постановка проблемы. Одним из экономически выгодных видов транспорта в настоящее время является морской транспорт. Его сравнительная дешевизна приводит к увеличению объемов перевозок грузов морским путем, но одновременно возрастают требования обеспечения безопасности таких перевозок. Одним из методов сведения к минимуму вероятности возникновения аварийных ситуаций является повышение квалификации судоводителей. Тренажерная подготовка судоводителей позволяет повысить квалификацию штурманского состава путем ознакомления с функционалом и ограничениями судового оборудования, а также выработки слаженности действий команды.

На сегодняшний день существует большое количество различных технических и программных средств для обеспечения обучения и закрепления знаний и навыков экипажей судна. Основой систем использующих эти средства являются разнообразные тренажеры и

стимуляторы [1], которые различаются по своему предназначению от моделирования работы с отдельным оборудованием до моделирования ходового мостика.

Для соответствия требованиям украинского [2] и международного законодательства по отработке взаимодействия членов команды ходового мостика и судовых систем необходимо использовать только полноразмерные тренажерные комплексы, адаптированные к конкретным задачам и максимально приближенные к реальному объекту.

Анализ последних исследований и публикаций. В настоящее время используются ряд специализированных курсов по подготовке членов команды ходового мостика, таких как: Maritime Resources Management, Bridge Team Resources Management, Master-Pilot Relations Course, управления крупнотоннажными судами и т.п. Большинство из них базируются на модельных курсах, разработанных Международной морской организацией (ИМО) с целью стандартизации и унификации подготовки плавсостава согласно Международной конвенции по подготовке и дипломированию моряков и несению вахты 1978/2010. Например, модельный курс 2.07 «Ship Simulator and Bridge Teamwork» [3] выдвигает требования к оборудованию и персоналу, который проводит обучение штурманского состава. Кроме технических навыков управления судном, в цели подготовки также входит умение грамотно организовывать несения вахты и взаимодействие всех задействованных в этом лиц [4–9]. Однако этот и аналогичные модельные курсы не предписывают детальной процедуры оценки компетентности учащегося, а также то, по каким принципам инструктор должен осуществлять генерацию сценариев.

В статье [10] рассмотрена предварительная прокладка маршрута Gdynia –Vallvik универсального сухогруза «НС Веа-Luna», выполненная навигационным помощником капитана. Как видно из анализа статьи, реальная траектория судна не совпадает с линиями генеральных курсов предварительной прокладки. Из этого можно сделать вывод, что предыдущая прокладка была неоптимальной. Или вахтенный помощник капитана сделал промах в расчете маневра. Также вероятно, что расчет был проведен таким образом вследствие дополнительных внешних возмущений (волнение моря, расхождение с другими судами или плавучей навигационной опасностью и т.п.). Функционал ECDIS (electronic chart display and identification system) TRASAS NAVISAILOR 4000™ позволяет записывать траектории и маршруты реальных судов, наличие целей в пределах действия УКВ-частот. При наличии подключения система может дополнительно фиксировать действие ветра, отклонение пера руля, крен судна и другую навигационную информацию. Анализ данной информации позволяет изучать поведение судоводителя при тренажерной подготовке команды ходового мостика.

Таким образом, существует аппаратно-программный комплекс, который позволяет оценивать базовую компетентность судоводителя (инструктора) путем построения оптимального маршрута и проводки судна по нему. Следующий уровень тренажерной подготовки должен проводиться в условиях, максимально приближенных к реальным с использованием полноразмерных симуляторов и взаимодействия обучаемых как команды ходового мостика [5].

Целью исследования является анализ возможности развития методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок.

Основная часть. Изложение основного материала исследования. Прежде всего, следует разделить классы задач на задачи базовой подготовки судоводителей, которая используется при несении самостоятельной вахты и задачи коллективного несения вахты в усиленном составе команды мостика (капитан, лоцман, вахтенный помощник, вперёдсмотрящий, рулевой и т.д.). Первая задача может проводиться обучаемым единолично с использованием малых тренажеров/симуляторов под контролем инструктора, и нацелена на приобретение навыков работы с ECDIS, решение задач на маневренном планшете, освоение особенностей поведения конкретной математической модели судна. Вторая задача должна выполняться на тренажерном комплексе с полной визуализацией в

составе команды ходового мостика, и имеет задачей приобретения навыков согласованной работы и ее организации каждым в пределах его должности.

Подготовку на тренажерном комплексе можно рассматривать как модель системы судна, информационно-управляемого с ходового мостика. При этом следует учитывать, что, независимо от уровня автоматизации судна, ответственность за результаты реализации управления несут члены команды ходового мостика, а ответственность за организацию работы остается за капитаном [6]. Поэтому далее будем рассматривать двойную задачу: базовую компетентность штурмана и его способность к слаженной работе в качестве члена команды ходового мостика данного типа судна (рис. 1).



Рисунок 1 – Уровни тренажерной подготовки судоводителей

Модель динамики принятия решения судоводителем как оператором принято описывать динамической системой [10]:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u} + \mathbf{Q}\mathbf{g} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{C}\mathbf{x} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

где вектор состояния \mathbf{x} описывает развитие процесса принятия решения. Управление \mathbf{u} и возмущение \mathbf{g} описывают входные воздействия, и вектор \mathbf{y} описывает уровень готовности решения. Матрицы $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{Q}$ описывают линейную динамическую систему в пространстве состояний.

Рассматривая векторную модель, следует учитывать сложные решения, имеющие несколько связанных компонент. Такой подход немного отличается от общепринятого [8–11], но он для решения поставленной задачи является перспективным. При этом следует учитывать, что в модели (1) присутствуют запаздывания. Это, во-первых, задержка восприятия информации τ_u и задержка исполнения решения τ_c . С учетом этого для i -го члена команды ходового мостика получаем модель:

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= \mathbf{A}_i\mathbf{x}_i(t) + \mathbf{B}_i\mathbf{u}_i(t + \tau_{ui}) + \mathbf{Q}_i\mathbf{g}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t + \tau_{ci}) &= \mathbf{C}_i\mathbf{x}_i(t) \end{aligned} \right\}. \quad (2)$$

При прийнятті рішення необхідно учити рівень відповідальності приймаемого рішення \mathbf{y}^*_i :

$$\left. \begin{aligned} \dot{\mathbf{x}}_i(t) &= A_i \mathbf{x}_i(t) + B_i \mathbf{u}_i(t + \tau_{ui}) + Q_i \mathbf{g}_i(t) \\ \mathbf{y}_i(t + \tau_{ci}) &= C_i \mathbf{x}_i(t) \\ \mathbf{y}_{ir} &= \begin{cases} \mathbf{y}_{ri} & \text{if } a(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}^*_i) \geq 0 \\ \mathbf{0} & \text{if } a(\mathbf{y}_i, \mathbf{y}^*_i) < 0 \end{cases} \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Різниця між векторами визначається метрикою $a(y_1, y_2)$, прийнятою в даному завданні. Моделью динаміки виконання кроку управління командою ходового мостика є послідовність операцій прийняття і виконання рішення:

$$\begin{aligned} &\mathbf{y}_{1r}, \dots, \mathbf{y}_m; \\ &\mathbf{u}_1, \mathbf{g}_1, \dots, \mathbf{g}_n \end{aligned} \quad (4)$$

При цьому план формування управління в j -й ситуації визначається послідовністю комутації каналу передачі інформації:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_1 \\ \mathbf{u}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{u}_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & \vdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & \vdots & K_{2n} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ K_{n1} & K_{n2} & \dots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{y}_1 \\ \mathbf{y}_2 \\ \vdots \\ \mathbf{y}_n \end{bmatrix}; \quad K_{ij} = \begin{pmatrix} k_{11} & k_{12} & \vdots & k_{1m} \\ k_{21} & k_{22} & \vdots & k_{2m} \\ \dots & \dots & \vdots & \dots \\ k_{m1} & k_{m2} & \vdots & k_{mm} \end{pmatrix}; \quad k_{ij} \in \{0,1\}. \quad (5)$$

Визначив послідовності прийняття рішення членами команди ходового мостика можна отримати очікуване час реакції при заданих рівнях відповідальності приймаемого рішення. В свою чергу, рівень прийняття рішення визначається очікуваними втратами або середнім ризиком рішення. Так, в ситуації розходження судів можуть бути прийняті чотири рішення: x_1 – руль на лівий борт з ймовірністю P_1 , x_2 – руль на правий борт з ймовірністю P_2 , x_3 – збільшити ход з ймовірністю P_3 , x_4 – зменшити ход з ймовірністю P_4 . При цьому, рішення x_i визначає витрати C_i з ймовірністю P_i . З урахування цього, очікувані втрати отримуємо як математичне сподівання [12]:

$$\bar{C} = M\{C\} = \sum_{i=1}^4 C_i P_i. \quad (6)$$

Следовательно, ми оцінюємо очікуваний ризик виконання маневру, який не більше максимального, і може служити оцінкою якості рішень судоводителя.

На рис. 2. [10] показана функція витрат відносно планованого маршруту, яку попередньо необхідно побудувати при підготовці завдання.

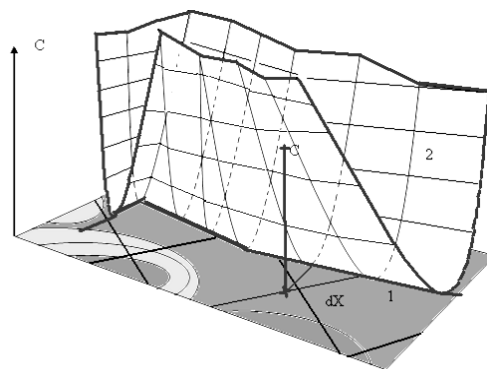


Рисунок 2 – Функція витрат по попередній прокладці маршруту

Слід врахувати, що при побудові функції витрат необхідно співвідносити відхилення від попередньої прокладки і умови плавання. Тому відхилення dX буде

вызывать различные расходы на глубокой воде и в узкости. Задача функции издержек свободное, но рационально использовать ветви квадратичных функций, различные для левого отклонения $h > 0$ и правого отклонения $h < 0$:

$$C(h) = \left. \begin{array}{ll} C_0 + r_+ dh^2 & \text{if } h > 0 \\ C_0 + r_- dh^2 & \text{if } h < 0 \end{array} \right\} \dots \quad (10)$$

Оценка риска и вероятность безаварийного плавания P может проводиться на основе анализа статистических данных прохождения судами данной акватории или путем аналитических вычислений [13]:

$$P = 1 - \exp\left(-\frac{D^2}{M^2}\right), \quad (11)$$

где D – минимальное расстояние от корпуса судна до ближайшей навигационной опасности с учетом траектории движения и положения корпуса судна на ней; M – радиальная среднеквадратическая погрешность места судна при подходе к опасности.

Оценка отклонений от оптимальных траекторий, которые могут быть и несущественными, должна происходить с учетом текущего трафика и внешних возмущений.

Выводы. Несмотря на высокий уровень автоматизации, многие задачи по навигации и управлению судном все еще осуществляются вручную. Это требует от штурманского состава знания особенностей своего судна в конкретных условиях и полной осведомленности о его навигационном оборудовании (до действий «вслепую»). Использование на практике нестандартной аппаратной и программной части навигационного оборудования, так же как, и его эргономические особенности, на разных (часто даже однотипных) судах не позволяют последовать опыту авиации и проводить серийное макетирование реального оборудования в целях тренажерной подготовки. Таким образом, представляется целесообразным проводить базовое обучение штурманского состава на индивидуальных «малых» тренажерах/симуляторах с использованием адекватных математических моделей реальных судов. В перспективе дальнейшего исследования возможности развития методов тренажерной подготовки судоводителей с целью повышения безопасности морских перевозок, следует рассмотреть тренажерную подготовку штурманского состава с учетом особенности работы в команде.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. TRANSAS Navi-Planner 4000. User manual. 2013. 234 p.
2. Про затвердження вимог до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань осіб командного складу та суднової команди : Наказ Міністерства інфраструктури України № 567 від 07.10.2014 : веб-ресурс. URL : www.zakon3.rada.gov.ua.
3. IMO model course 1.22. Ship Simulator and Bridge Team Work . IMO, London, 2002. 70 p.
4. IMO model course 7.03 Officer in charge of a navigational watch. London : IMO, 2014. 275 p.
5. Вимоги до тренажерного та іншого обладнання, призначеного для підготовки та перевірки знань судоводіїв на повномасштабних навігаційних тренажерах з візуалізацією : наказ Міністерства інфраструктури України №491 від 07.10.2014 : веб-ресурс. URL : www.zakon3.rada.gov.ua].
6. Міжнародна конвенція про підготовку і дипломування моряків та несення вахти 1978 долі (консолідований текст з манільськими поправками). К. : ТОВ «ВПК «Експрес-поліграф», 2010, 566 с.

7. Павловська О. О., Кондаков С. В. Алгоритм визначення параметрів математичної моделі механіка-водія, керівника криволінійним рухом швидкохідної гусеничної машини. *Вестник Юургу*. 2012. № 3. С. 43–47.
8. Weir, D. H. & McRuer, D.T. (1968). Models for Steering Control of Motor Vehicles. *Proc. 4th Annual NASA*. 192 p.
9. Устюжанін А. Д., Пупков К. А. Динамічна ідентифікація і оцінювання характеристик людини-оператора в системах «человек–машина». М. : Изд. РУДН, 2011. 180 с.
10. Kashtalyan P. V. and Rozhkov S. O. Mathematical and information provisions of bridge team training control systems. *Electronics and Control Systems : International scientific journal*. 2019. Vol 2, No 60. P. 61–69.
11. Петров Ю. П. Оптимальне управління рухом транспортних засобів. Л. : Енергія, 1969. 96 с.
12. Fossen T. I. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. John Wiley & Sons Ltd, 2011. 575 p.
13. Красовський Н. Н. Теорія управління рухом. М. : Наука, 1968. 476 с.

REFERENCES

1. TRANSAS Navi-Planner 4000. User manual. 2013. –234 p.
2. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukraini #567 vid 07.10.2014 «Pro zatverdzhennia vymoh do trenazhernoho ta inshoho obladnannia, pryznachenooho dlia pidhotovky ta perevirky znan osib komandnoho skladu ta sudnovoi komandy». Metod dostupu: of. tekst z сайту Verkhovnoi Rady Ukraini [www.zakon3.rada.gov.ua].
3. IMO model course 1.22 Ship Simulator and Bridge Team Work . IMO, London, 2002. –70p.
4. IMO model course 7.03 “Officer in charge of a navigational watch”. IMO, London – 2014. 275p.
5. Nakaz Ministerstva infrastruktury Ukraini #491 vid 07.10.2014 «Vymohy do trenazhernoho ta inshoho obladnannia, pryznachenooho dlia pidhotovky ta perevirky znan sudnovodiiv na povnomashtabnykh navihatsiinykh trenazherakh z vizualizatsiieiu». Metod dostupu: of. tekst z сайту Verkhovnoi Rady Ukraini [www.zakon3.rada.gov.ua].
6. Mizhnarodna konventsiiia pro pidhotovku i dyplomuvannia moriakiv ta nesennia vakhty 1978 doli (konsolidovanyi tekst z manilskymy popravkamy). Naukove vydannia. K.: TOV «VPK «Ekspres-polihraf»» - 2010, 566 s.
7. Pavlovskaiiao O.O. & Kondakov C.V. (2012) Alhorytm vyznachennia parametriv matematychnoi modeli mekhanika-vodiia, kerivnyka kryvoliniinym rukhom shvydkokhidnoi husenychnoi mashyny. *Vestnyk Iuurhu* 3, 43 –47.
8. Weir, D.H. Models for Steering Control of Motor Vehicles / D.H. Weir, D.T. McRuer // *Proc. 4th Annual NASA*, 1968. – 192 с.
9. Ustiuzhanin A.D. Dynamichna identyfikatsiia i otsiniuvannia kharakterystyk liudyny-operatora v systemakh «chelovek–mashyna»/ UstiuzhaninA.D., PupkovK.A. Moskva :Yzd. RUDN, 2011.–180.
10. Kashtalyan P.V. & Rozhkov S. O. (2019) Mathematical and information provisions of bridge team training control systems. *International scientific journal «Electronics and Control Systems»* (ISSN 1990-5548), 60, 61-69.
11. Petrov Yu. P. Optimal'noe upravlenie dvizheniem transportny'x sredstv./ Yu.P. Petrov, «Energiya», L., 1969.– 96 s.
12. T. I. Fossen. Handbook of marine craft hydrodynamics and motion control. FirstEdition. JohnWiley&SonsLtd, 2011. 575p. ISBN:978-1-119-99149-6.
13. Krasovskyi N.N. (1968). *Teoriia upravlinnia rukhom*. Moskva: Nauka.

Каштальян П. В., Тернова Т. І., Рожков С. О. РОЗВИТОК МЕТОДІВ ТРЕНАЖЕРНОЇ ПІДГОТОВКИ СУДНОВОДІЇВ

Морський транспорт в даний час є одним із економічно вигідних видів транспорту. Його порівняльна дешевизна призводить до збільшення обсягів перевезень вантажів морським шляхом, але одночасно зростають вимоги забезпечення безпеки таких перевезень. Одним із методів підвищення безпеки морських перевезень є підвищення кваліфікації судноводіїв. На сьогодні існує велика кількість різних технічних і програмних засобів для забезпечення навчання та закріплення знань і навичок екіпажів судна. Основою для систем, які використовують знання є різноманітні тренажери і стимулятори, які розрізняються за своїм призначенням від моделювання роботи з окремим обладнанням до моделювання ходового містка. Для відповідності вимогам українського та міжнародного законодавства з відпрацювання взаємодії членів команди ходового містка і судових систем необхідно використовувати тільки повнорозмірні тренажерні комплекси, адаптовані до конкретних завдань і максимально наближені до реального об'єкту.

У статті розглянута можливість розвитку і адаптивного використання методів тренажерної підготовки судноводіїв з метою підвищення безпеки морських перевезень. Проведено аналіз модельних курсів ІМО і їх застосовності до завдань тренажерної підготовки судноводіїв. Проведено класифікацію основних завдань судноводіння, показано їх формалізований вигляд та оптимальне рішення. Запропоновано функцію ймовірності безаварійного плавання в якості критерію оцінки компетентності судноводія.

Незважаючи на високий рівень автоматизації, багато завдань з навігації і керування судном все ще здійснюються вручну. Це вимагає від штурманського складу знання особливостей свого судна в конкретних умовах і повної поінформованості про його навігаційне обладнання. Використання на практиці нестандартної апаратної і програмної частини навігаційного обладнання, так само як і його ергономічні особливості, на різних судах не дозволяють піти досвідом авіації і проводити серійне макетування реального обладнання з метою тренажерної підготовки. Таким чином, вважаємо за доцільне проводити базове навчання штурманського складу на індивідуальних «малих» тренажерах / симуляторах з використанням адекватних математичних моделей реальних суден.

Ключові слова: *тренажерна підготовка, оптимальне управління, попередня прокладка, оптимальний маршрут, тренажерний комплекс, сценарій вправи, прийняття рішення, оптимальне управління.*

Kashtalyan P. V., Ternova T. I., Rozhkov S. O. DEVELOPMENT OF SIMULATOR TRAINING METHODS FOR NAVIGATORS

Sea transport is currently one of the most cost-effective types of transport. Its comparative cheapness leads to an increase of the volume of cargo transportation by sea, but at the same time, the requirements to ensure the safety of such transportation are increasing as well. One of the methods to improve the safety of transportation by sea is the advanced training of navigators. The article considers the possibility of the development and adaptive use of the simulator training methods for navigators in order to increase the safety of transportation by sea. The analysis of IMO model courses and their applicability to the problems of simulator training for navigators is carried out. The classification of the main navigation tasks is carried out; their formalized form and optimal solution are shown. The probability function of accident-free navigation is proposed as a criterion for assessing the competence of navigators.

Today, there are a large number of various hardware and software tools to provide training and consolidation of knowledge and skills of the ship crew. The basis of the systems using these tools is a variety of simulators and stimulators, which vary in their purpose from modeling robots with separate equipment to modeling the navigation bridge. To comply with the requirements of Ukrainian and international legislation on working out the interaction of the members of the navigation bridge team and ship systems, it is necessary to use only full-sized training complexes adapted to specific tasks and as close as possible to a real object.

Despite the high level of automation, many navigation and ship control tasks are still carried out manually. This requires the navigational staff to know the features of their ship in specific conditions and to be fully aware of its navigation equipment. The use in practice of non-standard hardware and software of navigation equipment, as well as its ergonomic features, on different vessels do not allow us to follow the experience of aviation and carry out serial prototyping of real equipment for training purposes. Thus, it seems appropriate to conduct basic training for the navigational staff on individual "small" simulators using adequate mathematical models of real ships.

Keywords: *simulator training, optimal control, previous laying, optimal route, training complex, exercise scenario, decision making, optimal control.*

© Каштальян П. В., Тернова Т. І., Рожков С. О.

Статтю прийнято
до редакції 10.08.19