

*О. М. АГАПОВ, О. Г. ЯНЧИК, В. М. КРАСНОКУТСЬКИЙ*

## **МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДИЧНОСТІ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ПЛАВАЮЧИХ БРОНЬОВАНИХ МАШИН**

У статті розглянуто питання забезпечення ефективності в організації проведення робіт з технічного обслуговування плаваючих броньованих машин. Проаналізовано особливості конструкції цих машин, специфіку умов експлуатації, основні ризики та небезпеки для екіпажів. Представлено систему організаційних та технічних заходів, спрямованих на підвищення безпеки персоналу. Як результат виникла необхідність в розробці методів щодо підвищення ефективності організації технічного обслуговування, запропоновано математичну модель визначення періодичності його проведення. Практичні рекомендації, зроблені в роботі, спрямовані на зниження ризику травматизму, профілактику професійних захворювань і підвищення ефективності в організації проведення робіт із технічного обслуговування плаваючих броньованих машин у складних умовах під час ведення бойових дій.

**Ключові слова:** плаваюча броньована машина, техніка безпеки, охорона праці, експлуатація, безпека екіпажу, ризик.

*O. AGAPOV, O. YANCHIK, V. KRASNOKUTSKIY*

## **MATHEMATICAL MODEL FOR DETERMINING THE PERIODICITY OF TECHNICAL MAINTENANCE OF FLOATING ARMORED VEHICLES**

The article considers the issue of ensuring efficiency in organizing maintenance work on floating armored vehicles. The design features of these vehicles, the specifics of operating conditions, the main risks and dangers for crews are analyzed. A system of organizational and technical measures aimed at increasing personnel safety is presented. As a result, there was a need to develop methods to increase the efficiency of organizing maintenance, and a mathematical model for determining the frequency of its implementation is proposed. The practical recommendations made in the work are aimed at reducing the risk of injury, preventing occupational diseases and increasing efficiency in organizing maintenance work on floating armored vehicles in difficult conditions during combat operations.

**Key words:** floating armored vehicle, safety, labor protection, operation, crew safety, risk.

Вступ. ПБМ належать до спеціальної військової техніки. Цей вид військової техніки виконує важливі завдання з перевезення особового складу, ведення розвідки, забезпечення вогневої підтримки та подолання водних перешкод. Ефективність їх застосування безпосередньо залежить від рівня підготовки екіпажу, технічного стану машини. Під час підготовки до експлуатації ПБМ, а саме з виконання завдань щодо технічного обслуговування, екіпаж стикається з низкою проблем як умов виконання робіт таке і при постійній загрозі вогневого ураження, нанесення авіаційних та ракетних ударів противником, а також особливого при діях із повітря безпілотних літальних апаратів. Тому питання забезпечення безпеки праці при обслуговуванні, русі та бойовому застосуванні ПБМ має особливе значення. Відповідно до міжнародних стандартів безпеки експлуатації машин та управління ризиками повинні застосовуватися системні методи аналізу ризиків та планування профілактичних заходів [1,2], що дозволяє визначити організаційні, технічні та індивідуальні засоби захисту, спрямовані на запобігання нещасним випадкам та забезпечення надійного функціонування техніки в екстремальних умовах.

Однією з проблем нинішнього часу є пошук можливостей забезпечити найбільш ефективної реалізації робочих властивостей, притаманних зразкам ПБМ в процесі їх експлуатації. Нерідко дійсна ефективність використання об'єктів не відповідає їх потенційними можливостями внаслідок нераціональної організації їх використання або технічного обслуговування (ТО), нестаточної надійності або високої трудоемкості виконання робіт з обслуговування. Тому, час, затрачений на приведення об'єкту до технічної справності та готовності до повторного використання, є одним з головних показників їх ефективності. [3]

Технічне обслуговування підвищує перебування об'єкту в працездатному стані і тим самим підвищує надійність функціонування системи ТО. Але в той же час воно потребує деяких витрат на проведення робіт. Звідси впливає необхідність вибору ТО, виходячи з економічних критеріїв. Вихідною інформацією при плануванні ТО є: напрацювання на відмову технічних систем зразка ПБМ, щільність розподілу чи інтенсивність відмов. Проведення ТО знижує інтенсивність відмов і тим самим підвищує безвідмовність. У статті запропоновано математичну модель визначення періодичності ТО ПБМ з шляхом підвищення надійності функціонування даної системи.

Таким чином, розроблення математичної моделі визначення періодичності ТО ПБМ є актуальним науковим завданням, успішне вирішення якого сприятиме подальшому удосконаленню процесу експлуатації зразків ПБМ, збільшенню періоду їхньої експлуатації, скороченню термінів пошуку несправних елементів та відновлення пошкоджених елементів, підвищенню якості ТО при скороченні його трудоемкості і тривалості.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** В ряді наукових публікацій проведений аналіз і систематизація розвитку озброєння і військової техніки більшості передових країн світу та досвід їхнього застосування під час війн і військових конфліктів останніх десятиліть, у тому числі в російсько-українській війні. [1,5] Правильне технічне обслуговування та експлуатація особливо важливі під час подолання складних водних перешкод [5]. Специфічні та різноманітні умови роботи плаваючих машин (автомобілі, транспортери-тягачі, лісосплавні трактори та снігоболотоходи) у цивільному секторі на різних ґрунтах і водних районах (прісна та солоня вода, море), з різним відсотком часу роботи на суші й воді, потребують більшої оперативності в організації їхнього ТО з унесенням низки коригувань. Зміст і обсяг ТО плаваючих машин також значною мірою визначаються конструктивними особливостями самих машин, ступенем їхньої надійності, використовуваними матеріалами, тому неможливо описати єдину картину ТО, яка підходила б у його змісті та обсязі для всіх типів плаваючих машин. Водночас слід мати на увазі, що, як і для інших типів машин, система обслуговування плаваючих машин є планово-попереджувальною. Використання цієї системи дає змогу підтримувати робочий стан машин, зменшити інтенсивність зносу деталей і вузлів, запобігти появі несправностей і збоїв, оперативно відновити працездатність окремих вузлів, систем тощо.

Плановість цієї системи визначає проведення всіх типів обслуговування плаваючих машин через регламентований час роботи на суші та воді. Це означає, що, незалежно від технічного стану, машина через заплановані періоди часу повинна проходити зовнішній огляд, контроль-регульовальні роботи, заміну необхідних експлуатаційних матеріалів тощо. Напруга і специфіка роботи плаваючих машин визначають значне скорочення часу періодичності ТО за одночасного збільшення (на 15... 25%) трудомісткості ТО порівняно із сухопутними машинами. Це одна з особливостей обслуговування плаваючих машин.

Складність обслуговування плаваючих машин збільшується порівняно із сухопутними транспортними засобами не тільки через необхідність підтримки конкретних і додаткових пристроїв плаваючих машин (водонепроникний корпус, русійно-кермовий комплекс (РКК), водовідливне обладнання тощо), а й через необхідність обслуговування перед роботою у водній зоні, під час цієї роботи і після неї. Крім того, під час роботи плаваючих машин у морських умовах додатково необхідно затратити значні зусилля на запобігання корозійним процесам корпусу, елементів шасі, агрегатів і компонентів передачі, систем двигуна та інших механізмів.

Обсяг ТО плаваючих машин, які працюють на суші, добре відомий і практично не відрізняється від обсягу ТО звичайних машин. У той же час експлуатація машин на воді впливає на вміст та об'єм ТО деяких систем та вузлів, які не використовуються під час роботи машин у воді. Але є інша група агрегатів, вузлів та систем, які або використовуються лише при експлуатації машин на воді, або завантажуються під час роботи на суші та воді. Контроль за технічним станом цієї групи в основному забезпечується в процесі щоденного ТО

плаваючих машин. В окремий обсяг в цьому процесі необхідно виділяти роботи, які обумовлені роботою машин на воді.

**Мета дослідження, постановка задачі.** Метою роботи є розроблення математичної моделі з визначення періодичності проведення ТО для ПБМ з шляхом підвищення надійності функціонування даної системи.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- провести аналіз особливості конструкції та умов експлуатації ПБМ;
- сформулювати ключові ризики та заходи безпеки при організації технічного обслуговування і експлуатації ПБМ;
- розробити математичну модель з визначення періодичності проведення технічного обслуговування для ПБМ.

**Аналіз систем технічного обслуговування ПБМ.** На цей час система технічного обслуговування, як сукупність технологічних і організаційних правил виконання операцій ТО потребує постійного удосконалення з врахування особливості конструкції та умов експлуатації плаваючих броньованих машин. ПБМ – це бойові або транспортні засоби, здатні рухатися як по суші, так і по воді. Основною особливістю їхньої конструкції є поєднання броньованого корпусу з амфібійними властивостями, що забезпечує можливість подолання водних перешкод без спеціальної підготовки. До таких машин належать, наприклад, БТР-80, БТР-4, ААВ-7, АСВ та інші [1, 2].

Конструкція і технологія експлуатації ПБМ відрізняються від звичайних броньованих машин через необхідність забезпечення плавучості, герметичності, корозійної стійкості та засобів водної тяги. Ефективність використання таких машин залежить як від конструктивних рішень, так і від підготовки особового складу та організації технічного сервісу.

Основою конструкції ПБМ є герметичний корпус, що забезпечує плавучість, в якому передбачаються водонепроникні перегородки й відсіки для підвищення живучості при частковому затопленні. Необхідність бронювання корпусу ускладнює пошук рішення щодо забезпечення достатньої плавучості, з цією метою в конструкції машин передбачаються баластні системи, герметичні відсіки та можливість скидання додаткових вантажів у разі необхідності. Наприклад, ААВ-7А1 має бронювання 45–50 мм у лобовій частині при збереженні повної маси близько 29 т, що дозволяє підтримувати плавучість завдяки герметичному корпусу з повітряними порожнинами [4,5]. Конструкція ПБМ повинна забезпечувати стійкість при завантаженні і під час хвильових впливів, що досягається відповідними положеннями центру мас та центру плавучості [6].

Трансмісія і приводи у ПБМ працюють у двох різних режимах: під час руху по суші крутний момент від двигуна передається на колеса (гусениці), а під час руху по воді – до гребних гвинтів або водометів. Специфічних технічних рішень вимагають питання охолодження двигуна і системи живлення в умовах плавання і бризок.

Конструктивні рішення спрямовані на герметизацію вузлів і спряжень, електричних та пневматичних мереж за рахунок посиленних сальників і ущільнень.

Для боротьби з корозією передбачається використання відповідних матеріалів, катодного захисту, антикорозійних покриттів з урахуванням експлуатації у прісній та солоній воді [7,8]. Конструктивні зазори для дренажу дозволяють ефективно виконати просушку ПБМ.

Сучасні машини оснащуються гідравлічними або електрогідравлічними приводами керма, системами стабілізації корпусу та GPS-навігацією, що враховує специфіку руху по воді [9].

Серед умов експлуатації доцільно виділити:

#### 1. Водні умови:

- тип води: прісна, солоня, мутна; кожен з них впливає на корозію, роботу двигуна і тягові характеристики;
- хвилювання, течії і зустрічні вітри впливають на стійкість, швидкість і безпеку десантних операцій;
- наявність плаваючих перешкод (дерева, уламки), мілін і мінних загроз.

## 2. Кліматичні фактори:

– температурні перепади (від дуже високої до дуже низької) впливають на мастила, акумулятори, пневматичні системи;

– пил, пісок, забруднення – прискорюють знос фільтрів і систем охолодження.

## 3. Тактичні та бойові умови:

– перебування під обстрілом (у зоні мінного ураження): ризик пошкодження корпусу, попадання по трансмісії, загроза витоку палива;

– необхідність швидкої евакуації та полегшення ремонту в польових умовах.

## 4. Логістика та обслуговування:

– потреба в спеціалізованих запасних частинах (ущільнення, насосні агрегати, елементи приводу водомета);

– підготовка польових ремонтних бригад, наявність переносного обладнання для герметизації та відкачування води.

## 5. Операційні обмеження:

– максимальна швидкість по воді та по суші; максимально допустиме хвилювання моря, при якому дозволено вихід у плавання: при хвилях понад 3 бали експлуатація без спеціальної підготовки забороняється [10];

– обмеження по завантаженню: тоннаж корисного навантаження, розподіл вантажу.

Особливості конструкції броньованих плаваючих машин визначають їхню унікальність порівняно із звичайною бронетехнікою. Оптимальне поєднання плавучості, броньового захисту, потужності двигуна та герметичності забезпечує надійність експлуатації у складних умовах – від болотистої місцевості до морських прибережних зон.

Дотримання вимог стандартів [10,13,14,15] гарантує безпеку, живучість та ремонтпридатність машин у бойових умовах.

Експлуатація броньованих плаваючих машин (БПМ) пов'язана з дією комплексу небезпечних і шкідливих виробничих факторів, які можуть призвести до погіршення самопочуття, травмування чи загибелі членів екіпажу. Їхній характер залежить від умов використання машини, технічного стану та специфіки виконуваних завдань.

Серед найбільш поширених небезпек можна виділити:

Механічні фактори. Травмування під час посадки, висадки, завантаження боєкомплекту, технічного обслуговування або ремонту. Існує ризик затискання рухомими частинами механізмів (люки, башта, приводи), падіння з корпусу, ударів об елементи внутрішнього обладнання під час руху чи подолання перешкод.

Температурні та мікрокліматичні фактори. Під час роботи броньованої машини температура в бойовому відділенні може перевищувати 50 °С, особливо влітку. Взимку, навпаки, екіпаж перебуває в умовах низьких температур при обмеженому обігріві. Різкі перепади температур і недостатня вентиляція можуть викликати перегрів, переохолодження або тепловий удар.

Хімічні фактори. У повітрі бойового відділення часто накопичуються пари палива, мастильних матеріалів, оксиди азоту, чадний газ, продукти згоряння порохових газів. Ці речовини становлять загрозу для органів дихання, можуть спричинити отруєння або втрату свідомості.

Фізичні фактори. Шум і вібрація: двигун, трансмісія, гусеничний або колісний рушій створюють високий рівень шуму та вібрації, що перевищує допустимі норми; тривала дія цих факторів призводить до втоми, зниження концентрації уваги, порушення слуху та координації рухів; вібрація впливає на опорно-руховий апарат, викликає судинні порушення й прискорене стомлення екіпажу. Травмування при неправильному поводженні зі зброєю, боєкомплектом або пусковими пристроями.

Електричні фактори. Небезпеку становить контакт з оголеними електропроводами, короткі замикання, ураження електричним струмом під час ремонту електрообладнання.

Психофізіологічні фактори. Бойові умови, дефіцит часу, висока відповідальність, шум, обмежений простір і небезпека ураження противником створюють значне психоемоційне навантаження. Це може призвести до стресу, зниження уваги, неузгоджених дій екіпажу і, як наслідок, підвищення ризику аварійних ситуацій.

На основі сформульованих діючих небезпек можна дати класифікацію ризиків для ПБМ:

- фізичні ризики: перекидання, затоплення, вибух, ураження екіпажу уламками при обстрілі;
- технічні ризики: відмова двигуна або систем, порушення герметизації, знос, корозія, коротке замикання;
- організаційні ризики: недотримання правил підготовки до виходу на воду, неякісне технічне обслуговування, нестача підготовки персоналу;
- фізіологічні ризики: втома, стрес, вплив шуму, вібрації, перегріву, переохолодження.

Для запобігання цим небезпекам застосовуються методи аналізу ризиків і формування матриць безпеки [8]. У військовій практиці використовують підходи, аналогічні до процедур наведених у стандартах [12.13], що передбачають поєднання технічних і людських факторів в системі оцінювання ризиків.

Відомі випадки аварій ПБМ в різних країнах в основному пов'язані з недотриманням правил підготовки машини перед подоланням водних перешкод. Аналіз описаних в літературі інцидентів показує, що основними причинами є помилки екіпажу і недостатня якість технічного обслуговування, зокрема, неповне виконання регламентних операцій перед входом у воду [2]. У численних дослідженнях безпеки складних технічних систем (авіація, безпілотні літальні апарати, транспорт) показано, що людський фактор може становити близько 60-80% причин аварійних подій [8,9,10]. З огляду на схожість організаційних і людських факторів, можна вважати, що для плаваючих броньованих машин помилки екіпажу і відхилення від регламентів технічного обслуговування є провідними причинами більшості інцидентів при подоланні водних перешкод.

Згідно з міжнародними стандартами ISO 12100 та MIL-STD-882E [14.15], система забезпечення безпеки броньованих машин повинна охоплювати низку заходів.

*Організаційно-технічні заходи:*

- встановлення чіткого регламенту технічного обслуговування, ремонту та перевірок перед плаванням чи виїздом у бойову зону; у дослідженні [19] зазначається, що правильне обслуговування бойової техніки значно підвищує надійність роботи екіпажу;
- організація постійного навчання екіпажів і технічного персоналу з питань безпеки, екстрених ситуацій, евакуації та використання засобів захисту;
- забезпечення персоналу необхідним обладнанням для безпечного обслуговування та експлуатації: стапелі, підйомники, освітлення, вентиляція; у роботі зазначається, що екіпаж броньованих машин піддається значному впливу шуму та вібрації, а це вимагає систематичного контролю засобами вимірювання;
- впровадження систем контролю стану техніки шляхом встановлення різноманітних датчиків для прогнозованого технічного обслуговування.

*Технічні заходи захисту:*

- вдосконалення конструкції корпусу, підвіски та сидінь для зменшення динамічних і вібраційних навантажень під час руху по пересіченій місцевості або водних перешкодах;
- забезпечення якісної вентиляції та відповідного температурного режиму для екіпажу та десанту за рахунок встановлення клімат-контролю з можливістю безпечного аварійного провітрювання – особливо актуально для ПБМ у складних умовах;
- використання шумопоглинаючих матеріалів, захист від електричних уражень та коротких замикань;
- забезпечення системами захисту від хімічного впливу (фільтрація повітря, герметизація відсіків, видалення шкідливих газів);

– суворе дотримання правил завантаження боєкомплекту, перевезення людей і вантажів, особливо в умовах плавання, з урахуванням зміщення центру ваги, ризику крену або перекидання.

*Безпека під час технічного обслуговування та ремонту:*

– перед початком обслуговування для виключення защемлення або падіння необхідно: заглушити двигун, відключити акумулятори і подачу палива, ізолювати приводи, заблокувати рухомі частини, встановити опори;

– провести інструктаж і здійснити контроль за дотриманням правил заземлення електрообладнання, наявністю відповідних засобів індивідуального захисту (рукавички, окуляри, каски, респіратори), станом освітлення та вентиляції;

– виконати контрольний огляд ПБМ (особливо після бойового застосування: оцінити стан трансмісії, ходової частини, корпусу, герметичності, електрики, засобів зв'язку);

– забезпечити дотримання правил проведення зварювальних та електромонтажних робіт, не допускати відкритого вогню при заправці, промиванні деталей або перевірці герметичності.

*Безпека під час експлуатації:*

– перед входом у воду перевірити герметичність усіх люків, кришок, зливів;

– екіпаж повинен бути в рятувальних жилетах, люки не блокуються;

– швидкість руху — не вище зазначеної в інструкції з експлуатації для даного типу ПБМ;

– дистанція між машинами повинна бути не менше 1,5–2 довжин корпусу;

– в процесі руху не виконувати різкі повороти і зупинки у воді;

– при підвищеній хвилі у водоймі, сильній течії, вітру – рух здійснюється тільки після оцінки ситуації командиром і його команди;

– у разі потрапляння води всередину – негайно увімкнути водовідкачувальні насоси;

– при виході ПБМ з води на сушу – перемикання трансмісії проводити тільки на твердому ґрунті;

– не залишати машину до повної зупинки і фіксації;

– не допускати перебування людей в зоні обертання гвинтів або водометних сопел;

– при пожежі застосовувати вуглекислотні або порошкові вогнегасники;

– після виходу з води обов'язково просушити і перевірити ущільнення, змастити необхідні елементи.

*Дії після експлуатації:*

– провести повне миття корпусу і ходової частини (видалити солону і брудну воду);

– перевірити наявність тріщин, течі, пошкоджень герметичності;

– обробити антикорозійними складами, змастити рухомі з'єднання;

– зробити запис в журналі технічного стану машини;

– повідомити відповідального за експлуатацію про виявлені несправності.

*Індивідуальні засоби захисту та підготовки екіпажу:*

- забезпечення екіпажу шоломофонами, засобами захисту слуху, антивібраційними сидіннями або накладками, засобами індивідуального захисту від викидів, газів, пилу;

- підготовка до роботи в стресових умовах: тренування аварійної евакуації, дії при потраплянні під обстріл або десантуванні у воду, психологічна підготовка; у дослідженні поведінки екіпажу броньованих машин підкреслюється важливість ситуаційної обізнаності;

- регулярні медичні огляди екіпажу: контроль слуху, вестибулярної системи, опорно-рухового апарату, серцево-судинної системи з урахуванням впливу вібрації, шуму і температури.

*Економічне обґрунтування заходів:*

- впровадження комплексних заходів безпеки та охорони праці не тільки знижує ризик травматизму та аварій техніки, але й підвищує бойову готовність, скорочує простой та витрати на капітальний ремонт;

- згідно з дослідженням про підвищення доступності військової техніки, системний підхід до обслуговування та модернізації позитивно впливає на готовність і зниження витрат.

На основі вищевикладеного була складена таблиця основних ризиків і заходів безпеки при експлуатації

Таблиця 1 – Ключові ризики та заходи безпеки при експлуатації броньованих плаваючих машин

Ризик	Суть небезпеки	Заходи безпеки / контроль	Нормативна/ довідкова опора*
Надмірний шум у відсіках	85–100+ дБА під час руху/стрільби: втрата слуху, втома	Програма збереження слуху, добір ЗІЗ* (HPD*), акустичний моніторинг [32], інженерні рішення шумопоглинання	OSHA 1910.95 ; MIL-STD-1474E ; ISO 1999 ; JASA (2024)
Вібрація цілого тіла (WBV*)	Порушення ОРА*, втома, зниження працездатності	Антивібраційні сидіння/кронштейни, маршрути з меншими ШВ*, ліміти часу	ДСТУ ISO 2631-1:2004; ДСТУ EN ISO 10326-1:2019
Перегрів/переохолодження екіпажу	Температура у відсіках, плавання в холодній воді	ККВ*/обігрів, вентиляція, теплові перерви, контроль мікроклімату	JSP 375 (H&S management)
Отруєння газами (CO, NOx, порохові гази, ПММ*)	Накопичення в замкнених відсіках	Герметизація, фільтровентиляція, контроль витоків, регламенти ТО	JSP 375
Електротравма під час ТО/ремонту	КЗ*, пошкоджена проводка	Блокування/вивішування (ЛОТО*), перевірка ізоляції, заземлення	JSP 375; TM 11395A-12&P/1
Травмування рухомими частинами, люками, баштою	Затискання, удари під час роботи	Чек-листи* перед запуском, блокування приводів, сигнальні команди в екіпажі	NAVMC AAV/ACV T&R; FM 5-144 (safety)
Ризики на воді: затоплення/ перекидання	Пошкодження корпусу, відмова водомету, буксирування	Переплавна інспекція герметичності, супровідний/ рятувальний катер, тренування евакуації з ЕЕВД*	NAVMC 3500.2D; Naval Safety Command AAV lessons; AAV investigation reports
Недостатня підготовка/порушення процедур	Людський фактор → аварії	Стандартизовані Т&R* події, регулярні тренування та перевірки	NAVMC 3500.2B/2D; JSP 375
Недотримання техобслуговування	Відмова систем у русі/на воді	Планове ТО, після бойові огляди, усунення дефектів до виходу	NAVMC [45, 48]; Navy/USMC investigation findings (maintenance gaps)
Балістичні/вибухові загрози екіпажу	Поранення від уламків/мін/ ІЕД*	Відповідність рівням STANAG 4569 (AEP-55), сертифіковані сидіння/підлога, маршрути	AEP-55 (STANAG 4569; огляди/ сертифікація TNO)

З таблиці: ЗІЗ – засоби індивідуального захисту; НРД – Hearing Protection Devices (засоби захисту слуху); WBV – Whole-Body Vibration (вібрація всего тіла); ОРА – опорно-руховий апарат; ШВ – швидкість вібрації; ККВ – клімат-контроль вентиляції; ПММ – паливно-мастильні матеріали; КЗ – коротке замикання; ЛОТО – міжнародний термін: «блокування/вивішування попереджень»; Чек-листи – перелік контрольних дій і пунктів; ЕЕВД – Emergency Escape Breathing Device (аварійний дихальний пристрій для екстреної евакуації); Т&Р – Training and Readiness (підготовка та готовність), ІЕД – Improvised Explosive Devices (саморобни вибухови пристрої).

З урахування проведеного аналізу щодо особливості роботи системи технічного обслуговування плаваючих броньованих машин з метою підвищення рівня безпеки виконання робіт екіпажем, пропонується визначати періодичності його проведення з використанням математичної моделі.

У загальному вигляді задачу визначення періодичності технічного обслуговування можна сформулювати так: знайти оптимальне значення, виходячи з мінімуму витрат на відновлення або заміну елемента на одиницю напрацювання:

$$C_t = M \left( \frac{C}{t} \right) \quad (1)$$

де:  $M$  - символ математичного сподівання;  $C$  - витрати на відновлення або заміну елемента;  $t$  - напрацювання елемента.

При постійному значенні  $C$ :

$$C_t = C \int_0^{\infty} \frac{g(t)}{t} dt \quad (2)$$

де:  $g(t)$  - функція щільності розподілу напрацювання до відмови.

Можна розглядати вирішення цієї задачі для чотирьох випадків: елемент замінюють при відмові; елемент відновлюють при відмові; елемент замінюють при відмові чи при досягненні напрацювання визначеного значення; елемент відновлюють при відмові чи при досягненні напрацювання  $T_{оп}$ .

Запишемо вираз (2) для останнього випадку:

$$C_t = C_{ОВО} = \left\{ \int_0^{T_0} \frac{g(t)}{t} dt + \frac{C_{ОВП}}{T_{оп}} [1 - G(T_{оп})] \right\} \quad (3)$$

де:  $C_{ОВО} = C_o + C_{ВО}$ ;  $C_{ОВП} = C_o + C_{ВП}$ ;  $C_o$ ,  $C_{ВО}$ ,  $C_{ВП}$  - відповідно вартості робіт, пов'язаних з розбиранням, виявленням відмови та збиранням; відновленням елемента при відмові; відновленням елемента при профілактичному обслуговуванні.

Враховуючи співвідношення при  $n = 2$  та після проведення диференціювання виразу (3), і прирівнявши нулю похідну, знайдемо співвідношення для визначення оптимального значення  $T_{оп}$ .

$$T_{оп} = \frac{C_{ОВП} [2 - \exp(-\alpha \cdot T_{оп})]}{2\alpha (C_{ВО} - C_{ВП}) [1 - \exp(-\alpha \cdot T_{оп})]} \quad (4)$$

При стратегії обслуговування, коли складова замінюється при відмові, а при профілактичному обслуговуванні відбувається її відновлення, оптимальне значення визначають з виразу

$$T_{оп} = \frac{C_{овп} [2 - \exp(-\alpha \cdot T_{оп})]}{2\alpha (C_3 - C_{вп}) [1 - \exp(-\alpha \cdot T_{оп})]} \quad (5)$$

де:  $C_3$  - вартість частини, що замінюється.

Можна стверджувати, що при неявних відмовах, коли відмова може бути виявлена тільки при технічному обслуговуванні, оптимальне значення періодичності  $T_{оп}$  одержують з відношення

$$\frac{1}{C_{ов} - C_{п}} \left\{ C_{п} + \frac{C_{пп}}{2\alpha} [x \cdot (4\alpha \cdot T_{оп} + 4 - 2\alpha \cdot T_{оп}x + x) - 3] \right\} = (1-x)(2\alpha \cdot T_{оп}x + x - 1) \quad (6)$$

де:  $x = \exp(-\alpha T_{оп})$ ;  $C_{ов}$ ,  $C_{п}$ ,  $C_{пп}$  - відповідно витрати на повне оновлення при відмові, профілактичне обслуговування, питомі витрати за одиницю часу від неявної відмови.

При проведенні оцінних розрахунків величину  $T_{оп}$  можна визначити з відношення

$$P_{mp} = 1 - G(T_{оп}) \quad (7)$$

де:  $P_{mp}$  - значення ймовірності безвідмовної роботи, необхідної на момент  $t = T_{оп}$ ;  $G(\dots)$  - функція розподілу часу безвідмовної роботи системи.

Якщо  $G(t)$  є розподілом Вейбулла, то:

$$T_{оп} = \left( -\frac{\ln P_{mp}}{\lambda} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (8)$$

де:  $\lambda$ ,  $\beta$  - параметри розподілу Вейбулла.

Для експоненціального розподілу можна використовувати дану формулу:

$$T_{оп} = -\frac{\ln P_{mp}}{\lambda} \quad (9)$$

Наведене свідчить про важливість врахування результатів при проведенні технічного обслуговування зразків ПБМ.

**Висновки.** Експлуатація плаваючих броньованих машин супроводжується дією комплексу небезпечних і шкідливих факторів – механічних, шумових, вібраційних, термічних, хімічних та психофізіологічних. Їхній вплив на екіпаж зростає під час бойового застосування та роботи в екстремальних умовах, що вимагає підвищеної уваги до питань техніки безпеки й охорони праці.

Аналіз літературних джерел і нормативної бази підтвердив, що перевищення допустимих рівнів шуму та вібрації суттєво впливає на працездатність і здоров'я екіпажів. Тому необхідним є систематичний контроль цих показників і застосування технічних рішень для їх зниження.

Основними напрямками забезпечення безпеки праці є:

- удосконалення конструкцій ПБМ (антивібраційні сидіння, шумоізоляція, системи вентиляції та пожежогасіння);
- підвищення рівня підготовки екіпажів та технічного персоналу з питань безпеки;
- впровадження сучасних засобів індивідуального захисту (активні протишумові навушники, захисні окуляри, спецодяг);
- регулярний моніторинг стану техніки й умов праці за допомогою сертифікованих приладів.

Практичні рекомендації, зроблені в роботі, спрямовані на зниження ризику травматизму, профілактику професійних захворювань і підвищення ефективності в організації проведення робіт із технічного обслуговування плаваючих броньованих машин у складних умовах.

Запропонований комплекс заходів відповідає вимогам чинного законодавства України в галузі охорони праці та узгоджується з міжнародними стандартами НАТО і ISO, що дозволяє інтегрувати вітчизняну практику експлуатації броньованої техніки у сучасну систему безпечного військового транспорту.

Робота комплексно розкриває проблематику безпечної експлуатації ПБМ, поєднує нормативні вимоги, аналіз шкідливих факторів і практичні рішення, що мають прикладне значення для військових підрозділів, навчальних закладів і конструкторських організацій.

#### Список літератури:

1. Чепков І.Б. Сучасні загальні тенденції розвитку засобів збройної боротьби [Текст]/ І.Б. Чепков, В. М. Можаровський, П.І. Нор // Озброєння та військова техніка – 2025. 27-35 с.
2. Агапов О. М. Аналіз ролі плаваючих броньованих машин у бойових умовах./ Агапов О. М., Краснокутський В. М., Зінченко О. І // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Машинознавство та САПР, 2025. – № 2. – С. 3–10.
3. Табуненко В.О. Методика визначення ефективності використання автобронетанкової техніки підрозділами Національної Гвардії України для охорони громадського порядку в мирний час / В.О. Табуненко, О.В. Іванченко, В.І. Кужелович, П.Д. Буряк // Честь і закон. – 2018. – Том 4, № 67. – С. 82-87.
4. Іванченко О. В. Визначення показника живучості бронетранспортерів на воді за наявності бойових пошкоджень / О. В. Іванченко, А. В. Ковтун, А. О. Іванченко // Збірник наукових праць Національної академії Національної гвардії України. – 2021. – Вип. 2 (38). – С. 5–11.
5. Дем'янчук Б.О. Основи технічного забезпечення. Обґрунтування рішень / Б.О. Дем'янчук, О.В. Малишкін. – Одеса : МО України. – 2014. – 208 с.
6. Янчик О.Г. Оцінка справності БТОТ з'єднання (частини) під час організації їх технічного обслуговування. ЦНДІ ЗС України. Зб. наук. пр. № 4 (58). – К., 2011. – С.307 - 314.
7. Кожушко А.П. Обґрунтування впровадження системи ресоруння кабіни колісного трактора / А.П. Кожушко, Б.І. Кальченко, Г.О. Кобець, О.Г. Янчик // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Автомобільне і тракторне будівництво - Харків: НТУ «ХПІ», 2022. - № 1. - С. 73-83.
8. Янчик О.Г. Вплив виробничих ризиків на безпеку виробничих процесів: аналіз та прогнозування./ Янчик О.Г. Зоря М.В., Райко В.Ф., Науково-виробничий журнал «Автошляховик України», 2024. - № 1 (278). С. 74-83.
9. Янчик О.Г. Проблемні питання відновлення БТОТ та можливий напрямок їх вирішення Інформаційні технології: наука, техніка, технологія, освіта, здоров'я: тези доповідей ХХVII міжнародної науково-практичної конференції MicroCAD-2020, 21-23 жовтня 2020 р.: у 5 ч. Ч. V. Харків: НТУ «ХПІ». – С. 265.
10. Янчик О.Г. Обґрунтування умов праці під час експлуатації транспортно-технологічних машин і обладнання/ Янчик О.Г. , В. М. Краснокутський, Д. А. Куртов, М. М. Мартиненко // Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія : Автомобіле- та тракторобудування Харків : НТУ «ХПІ», 2024. – № 2. – С. 108-118.
11. Ткачук М.М. Розвиток підходів, моделей та методів дослідження міцності та довговічності торсіонних валів систем підресорювання легких броньованих машин/Ткачук М.М Заворотній А.В., Зінченко О.І., Грабовський А.В., Ткачук М.А., Пінчук Н.В., Шевченко А.В., Цendra Г.В. Вісник Національного технічного університету «ХПІ», серія: Машинознавство та САПР. 2022. № 2. С. 80–93.
12. ДСТУ EN ISO 10326-1:2019 Вібрація механічна. Лабораторний метод оцінювання вібрації сидіння транспортного засобу. Частина 1. Основні вимоги.
13. ДСТУ ISO 2631-1:2004 Вібрація та удар механічні. Оцінка впливу загальної вібрації на людину. Частина 1. Загальні вимоги.
14. ISO 12100:2010. – Geneva : International Organization for Standardization, 2010. – 52 p. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:12100:ed-1:v1:en>
15. MIL-STD-810G – Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests <https://www.atec.army.mil/publications/Mil-Std-810G/Mil-Std-810G.pdf>

#### References (transliterated):

1. Chepkov I.B. Suchasni zahalni tendentsii rozvytku zasobiv zbroinoi borotby [Tekst]/ I.B. Chepkov, V. M. Mozharovskyi, P.I. Nor // Ozbroyennia ta viiskova tekhnika – 2025. 27-35 s.
2. Ahapov O. M. Analiz roli plavaiuchykh bronovanykh mashyn u boiovykh umovakh./ Ahapov O. M., Krasnokutskyy V. M., Zinchenko O. I // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Mashynoznavstvo ta SAPR, 2025. – № 2. – S. 3–10.
3. Tabunenko V.O. Metodyka vyznachennia efektyvnosti vykorystannia avtobronetankovoi tekhniky pidrozdilamy Natsionalnoi Hvardii Ukrainy dlia okhorony hromadskoho poriadku v myrnyi chas / V.O. Tabunenko, O.V. Ivanchenko, V.I. Kuzhelovych, P.D. Buriak // Chest i zakon. – 2018. – Tom 4, № 67. – S. 82-87.

4. Ivanchenko O. V. Vyznachennia pokaznyka zhyvuchosti bronetransporteriv na vodi za naiavnosti bioivnykh poshkodzhen / O. V. Ivanchenko, A. V. Kovtun, A. O. Ivanchenko // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Natsionalnoi hvardii Ukrainy. – 2021. – Vyp. 2 (38). – S. 5–11.
5. Demianchuk B.O. Osnovy tekhnichnoho zabezpechennia. Obgruntuvannia rishen / B.O. Demianchuk, O.V. Malyskin. – Odesa : MO Ukrainy. – 2014. – 208 s.
6. Ianchyk O.H. Otsinka spravnosti BTOT ziednannia (chastyny) pid chas orhanizatsii yikh tekhnichnoho obsluhovuvannia. TsNDI ZS Ukrainy. Zb. nauk. pr. № 4 (58). – K., 2011. – S.307 - 314.
7. Kozhushko A.P. Obgruntuvannia vprovadzhennia systemy resoruvannia kabiny kolisnogo traktora / A.P. Kozhushko, B.I. Kalchenko, H.O. Kobets, O.H. Yanchyk // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii: Avtomobilne i traktorне buduvannia - Kharkiv: NTU «KhPI», 2022. - № 1. - S. 73-83.
8. Ianchyk O.H. Vplyv vyrobnychkykh ryzykiv na bezpeku vyrobnychkykh protsesiv: analiz ta prohnozuvannia./ Yanchyk O.H. Zoria M.V., Raiko V.F., Naukovo-vyrobnychi zhurnal «Avtoshliakhovyk Ukrainy», 2024. - № 1 (278). S. 74-83.
9. Ianchyk O.H. Problemi pytannia vidnovlennia BTOT ta mozhlyvyi napriamok yikh vyrishennia Informatsiini tekhnolohii: nauka, tekhnika, tekhnolohiia, osvita, zdorovia: tezy dopovidei KhXVII mizhnarodnoi naukovo-praktychnoi konferentsii MicroCAD-2020, 21-23 zhovtnia 2020 r.: u 5 ch. Ch. V. Kharkiv: NTU «KhPI». – S. 265.
10. Ianchyk O.H. Obgruntuvannia umov pratsi pid chas ekspluatatsii transportno-tekhnolohichnykh mashyn i obladdnannia/ Yanchyk O.H. , V. M. Krasnokutskyyi, D. A. Kurtov, M. M. Martynenko // Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI». Serii : Avtomobile- ta traktorobuduvannia Kharkiv : NTU «KhPI», 2024. – № 2. – S. 108-118.
11. Tkachuk M.M. Rozvytok pidkhodiv, modelei ta metodiv doslidzhennia mitsnosti ta dovhovichnosti torsionnykh valiv system pidresoriuvannia lehkykh bronovanykh mashyn/Tkachuk M.M Zavorotnii A.V., Zinchenko O.I., Hrabovskyyi A.V., Tkachuk M.A., Pinchuk N.V., Shevchenko A.V., Tsendra H.V. Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu «KhPI», serii: Mashynoznavstvo ta SAPR. 2022. № 2. S. 80–93.
12. DSTU EN ISO 10326-1:2019 Vibratsiia mekhanichna. Laboratornyi metod otsiniuvannia vibratsii sydinna transportnogo zasobu. Chastyna 1. Osnovni vymohy.
13. DSTU ISO 2631-1:2004 Vibratsiia ta udar mekhanichni. Otsinka vplyvu zahalnoi vibratsii na liudynu. Chastyna 1. Zahalni vymohy.
14. ISO 12100:2010. □ Geneva : International Organization for Standardization, 2010. 52 p. <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:12100:ed-1:v1:en>
15. MIL-STD-810G – Environmental Engineering Considerations and Laboratory Tests <https://www.atec.army.mil/publications/Mil-Std-810G/Mil-Std-810G.pdf>

*Надійшла (received) 23.11.2025 р.*

*Відомості про авторів / About the Authors*

**Агаров Олег Миколайович (Aharov Oleh)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0652-2593>; e-mail: [agarovoleg@gmail.com](mailto:agarovoleg@gmail.com)

**Янчик Олександр Григорович (Yanchik Alexandr)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», доцент кафедри безпеки праці та навколишнього середовища, м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1214-4883>; e-mail: [alex\\_yanchik@ukr.net](mailto:alex_yanchik@ukr.net)

**Краснокутський Володимир Миколайович (Krasnokutskyyi Volodymyr)** – кандидат технічних наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут», професор кафедри автомобіле- і тракторобудування; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9484-4113>; e-mail: [hvukvn62@gmail.com](mailto:hvukvn62@gmail.com)