

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЛЬВІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ
ФАКУЛЬТЕТ МЕХАНІКИ, ЕНЕРГЕТИКИ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ
ТЕХНОЛОГІЙ
КАФЕДРА АВТОМОБІЛІВ І ТРАКТОРІВ**

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

другого (магістерського) рівня вищої освіти

на тему: **«Дослідження прохідності автомобіля польовими
грунтовими дорогами під час транспортування цукрових
буряків»**

Виконав: студент групи АіН-61
Спеціальності 208 „Агроінженерія”

(шифр і назва)

Богдан БЕРЕЗЯК

(ім'я та прізвище)

Керівник: Любомир КРАЙНИК

(ім'я та прізвище)

Дубляни 2024

УДК 656.075

Березяк Богдан Орестович. «Дослідження прохідності автомобіля польовими ґрунтовими дорогами під час транспортування цукрових буряків» Кваліфікаційна робота. Дубляни: Львівський національний університет природокористування, 2024. 89 с.

Табл. 11; рис. 22; бібліогр. джерел 27.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ ТА УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	
ВСТУП.....	
РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОТРАНСПОРТУ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ....	
1.1. Типаж автомобілів у аграрному секторі	
1.2. Характеристики досліджуваних автомобілів ...	
РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУХУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОМОБІЛІВ БЕЗДОРІЖЖЯМ.....	
2.1 Теоретичні основи руху автомобілів бездоріжжям...	
2.2. Імітаційне моделювання руху колісних машин бездоріжжям	
2.3 Моделювання руху автомобіля у програмному середовищі MATLAB Simulink.....	
2.4 Розрахункова частина.....	
РОЗДІЛ 3 АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМОБІЛІВ ГАЗ І КАЗ В АГРАРНІЙ СФЕРІ	
3.1. Особливості застосування автотехніки в аграрній сфері	
3.2. Паливна економічність в умовах бездоріжжя	
3.3 Перспективи розвитку транспорту в аграрній сфері	
РОЗДІЛ 4 ОХОРОНА ПРАЦІ.....	
РОЗДІЛ 5 ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА.....	
ВИСНОВОК.....	
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	

ВСТУП

Автомобільний транспорт аграрних підприємств понад 80% перевезень виконує власне на внутрішніх маршрутах з поля до складів, комор, де домінують ґрунтові дороги та бездоріжжя / сільськогосподарські угіддя [1 і інш.]. Метою дослідження є імітаційне моделювання та оцінка мобільності та паливної економічності перевезень власне в цих умовах на прикладі використання ще донедавна найбільш розповсюдженого в аграрному секторі вантажного автомобіля/самоскида ГАЗ-53 (поряд з ГАЗ 52/51) та спеціалізованого, власне для сільського господарства, самоскида КАЗ 4540, що у часи СРСР планувався власне як наступна генерація автотранспорту для колективізованого аграрного господарства. Окрім цього для порівняння розглянуто також нова, двовісна повнопривідна модель КрАЗ 5233, повнопривідні вантажівки аналогічного класу використовуються в ЄС (Mercedes-Benz Zetros та MAN використовуються у аграрному секторі ФРН для аналогічних внутрішніх господарських перевезень [2,3]. Порівняльний аналіз повнопривідних вантажівок з одинарними шинами (КАЗ) та класичної задньопривідної моделі з здвоєними шинами ведучої осі (ГАЗ) є цікавим і з точки зору формування типажу вантажівок нового покоління для фермерських господарств та агрохолдингів. Актуальність теми обумовлена необхідністю підвищення ефективності транспортних операцій у сільському господарстві, що сприятиме зменшенню витрат на логістику, покращенню умов зберігання продукції та зростанню прибутковості аграрних підприємств.

Результати дослідження знайдуть практичне застосування при формуванні типажу та модельного ряду автотехніки агропромислового комплексу України, сприятимуть впровадженню інноваційних підходів у виробництво та створенню нових конкурентоспроможних зразків техніки на ринку.

РОЗДІЛ 1. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА АВТОТРАНСПОРТУ В АГРАРНОМУ СЕКТОРІ

1.1. Типаж автомобілів у аграрному секторі

З 1930-х р.р. у сільському господарстві України послідовно у часи СРСР відбулась зміна генерацій базових моделей вантажівок, на виробництві яких спеціалізувався ГАЗ – від ГАЗ –АА, післявоєнного ГАЗ-51 у 1950-60-і роки до того ж модернізованого ГАЗ-51 – ГАЗ-52 та нової моделі більшої вантажності ГАЗ-53, а з 1980-х років уже спеціалізованого повнопривідного самоскида (з причепом) КАЗ 4540 [1]. Ліквідація колгоспного укладу та перехід до фермерських та особистих господарств, а також утворення найбільших в Європі агрохолдингів і практичне припинення з 2014 р. імпорту вантажівок ГАЗ зумовили нову ситуацію з автотранспортом в аграрному секторі. Звично, що у фермерських і особистих господарствах ще використовується доволі значний парк вантажівок ГАЗ і менше КАЗ, що залишився з часів СРСР, однак питання їхньої заміни є відкритим. Уже звичний імпорт вантажівок категорій N1 та N2 з ЄС, здебільшого вживаних, та нових з КНР і Індії зорієнтований на експлуатацію по автодорогах з твердим покриттям, повнопривідні моделі цих категорій в ЄС не є зорієнтованими на аграрний сектор, це насамперед військовий автопарк і частково будівельна сфера. Загалом повнопривідних вантажівок цих класів у ЄС мало і вони відчутно дорожчі. Існуюче вітчизняне виробництво вантажівок – КрАЗ зорієнтовано на великотоннажні моделі, що може бути актуальним тільки для агрохолдингів та великих фермерських господарств, окрім цього при використанні машин цього класу значно зростає (практично у 2-3 рази) питоме навантаження і ущільнення ґрунту, що є уже проблемним з точки зору агроекології. А ця проблема наразі як ніколи є актуальною для аграрного сектора України [4,5].

З іншого боку машинобудівний потенціал України дозволяє (при відповідній підтримці і розумінню з боку центральної влади) створити власне виробництво мало- і середньотонажної повнопривідної авто техніки для аграрного виробництва (що актуально і для військових та енергетиків).

В рамках даної роботи вимушені обмежитись існуючим типажем вантажівок, що характерні для фермерських і особистих господарств – ГАЗ 53 (вантажністю 4 т) і КАЗ 4540 (вантажністю 5,5 -6 т), а також великотоннажної, категорії НЗ, КрАЗ 5322, двовісної повнопривідної моделі (вантажністю 7-8 т), що може бути актуальною для великих агрохолдингів.

1.2. . Характеристики досліджуваних автомобілів

1.2.1. ГАЗ 53-12 [6]



Рис. 1.1 Автомобіль-самоскид ГАЗ (САЗ) 53-12

Даний автомобіль досі є найбільш масово розповсюдженим у фермерських і одноосібних господарствах і потреба поступового оновлення практично зармотизованого парку цих машин є очевидною.

Основні технічні характеристики ГАЗ 53-12

Довжина, мм	6395
Ширина, мм	2380

Висота, мм	2220	
Кліренс, мм	265	
Колісна база, мм	3700	
Колія передня/задня, мм	1630/1690	
Тип кузова	самоскид	
Кількість дверей	2	
Кількість місць	1+2	
Діаметр повороту, м	16.0	
Споряджена/ повна маса, кг		3250/8250
Розмірність шин		8.25-20
Радіус кочення, м		0,463
Коеф. аеродинаміки, Нс/м кв.		2,72

Розміщення двигуна	переднє, поздовжнє
Тип двигуна	V-подібний
Система живлення	карбюратор
Робочий об'єм, куб.см.	4250
Кількість цилиндрів	8
Кількість клапанів на цилиндр	2
Хід поршня, мм	80.0
Діаметр циліндра, мм	92.0
Ступінь стиску	6.7
Кількість передач вперед	4
Передавальні числа передач	
1-ї	6,48
2-ї	3,09

3-ї					1,71
4-ї					1,00
Головна передача					6,83
Характеристика двигуна					
Частота обертання, об/хв	1000	2000	2500	3200	3300
Крутний момент, Нм					
Питома витрата палива, г/кВт.год					
	Привід		Задній		
Максимальна швидкість, км/год					85
Потужність, к.с.					115
Тип палива, бензин					АИ-80
Місткість паливного бака, л.					90
Витрата палива на ґрунтових дорогах,					40.0 л/100 км
Лінійна норма витрати палива, л./100км					24.0

1.2.2. КАЗ 4540 [7]



Рис. 1.2. Сільськогосподарський автомобіль КАЗ 4540

Основні технічні характеристики автомобіля КАЗ 4540

Довжина, м	6,575
Ширина, м	2,500
Висота, м	2,830
Колісна база, м	2,020
Споряджена маса, т	3,610
Повна маса, т	9,110
Силовий агрегат, дизель	ЯМЗ-642
Тип	V6
Робочий об'єм двигуна, л	8,14
Потужність, к.с./об/хв	153-160/2600
Характеристика двигуна	
Частота обертання, об/хв	
Крутний момент, Нм	
Питома витрата палива, г/кВт.год	
Колісна формула	4x4
Лінійна норма витрати палива	25-30 л/100км
Витрата палива на ґрунтових дорогах	37-40 л/100 км
Максимальна швидкість, км/год	80
Маса буксируваного причепа, т	9
Шини, типорозмір	14,00-20
Трансмсія механічна, кількість передач	4x2
Передавальне число головної передачі	6,4
Передавальні числа роздавальної коробки	1,00 / 1,43
Передавальні числа коробки передач:	
1-а	5,4
2-а	3,5
3-а	2,1
4-а	1,0
Коеф. аеродинаміки, Нс/м кв.	3,50 (орієнт)



Рис.1.3. Типовий процес збирання та транспортування буряків

1.2.3. КрАЗ 5233 [8]



Рис.1.4. Двовісний КрАЗ 5233

Колісна формула: 4x4 Configuration

Маса спорядженого автомобіля, кг 11100

Вантажопідйомність, кг 7000 Load carrying capacity, kg

Двигун: дизельний, з турбонаддувом Engine: diesel, turbocharged

Потужність, к.с. 300...400 Power, h.p.

Максимальна швидкість, км/год. 120 Top speed, km/h

Шини 525/70R21 550/75R21 Tyre

Максимальний підйом, що долається, град 35

Максимальний боковий уклін, що долається, град 20

Трансмісія механічна, кількість передач 4x2

Передавальне число головної передачі 8,173

Передавальні числа роздавальної коробки 0,95 / 1,31

Передавальні числа коробки передач:

1-а	7,3	5-а	2,09
2-а	4,86	6-а	1,39
3-а	3,50	7-а	1,0
4-а	2,48	8-а	0,71

Коеф. аеродинаміки, Нс/м кв. 3,50 (орієнт)

Характеристика двигуна

Частота обертання, об/хв

Крутний момент, Нм

Питома витрата палива, г/кВт.год

РОЗДІЛ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ РУХУ ТА МОДЕЛЮВАННЯ РУХУ АВТОМОБІЛІВ БЕЗДОРІЖЖЯМ

2.1. Теоретичні основи руху автомобілів бездоріжжям

У класичній теорії руху автомобіля опір рухові і зчеплення шини з деформованою поверхнею окрім звичного для доріг з твердим покриттям опору коченню шини внаслідок її деформації і гістерезисних втрат у самій шині f_u додатково формується [9-16] (рис. 2.1):

деформацією опорної поверхні та утворенням колії певної глибини f_d ;

опору зміщенню ґрунту (піску) від зсуву вперед (т.зв. бульдозерний ефект) f_b ;

опору додаткової затрати енергії внаслідок пробуксовування ведучого колеса і додаткового заглиблення в опорну поверхню та переміщення частини ґрунту (піску) із зони контакту у напрямку обертання колеса (т. зв. екскалаційний ефект) f_E ;

опору горизонтальному зміщенню верхньої частини опорної поверхні, еквівалентної поперечній площині колії, що утворюється внаслідок руху колеса (т.зв. тиск відпаду) f_g ;

для зв'язних опорних поверхонь також додатковий опір коченню колеса внаслідок прилипання частинок ґрунту до шини f_n .

Практично аналогічні чинники формують і силу зчеплення шини з опорною поверхнею.

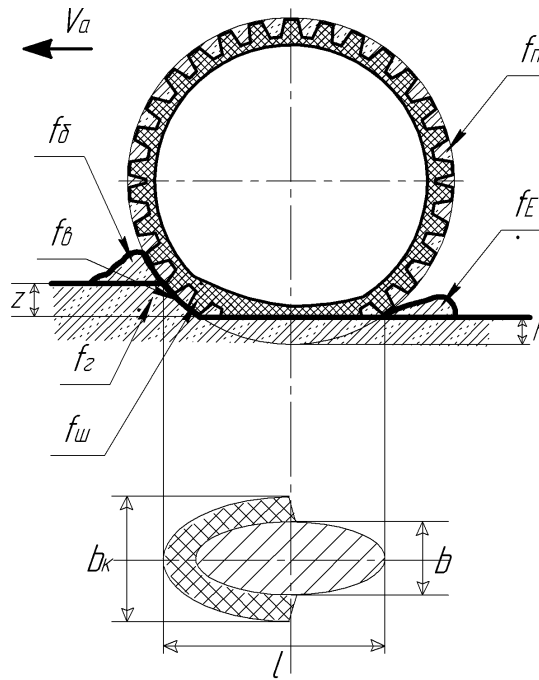


Рис. 2.1 Розрахункова схема взаємодії колеса з ґрунтом

Донедавна практично всі розрахунки щодо оцінки взаємодії шини з деформованою ОП, у т.ч. і методами імітаційного моделювання, базувались виключно на емпіричних залежностях складових f_{δ} – f_{π} від заданих характеристик шини, опорної поверхні та навантажень на шину. Поява в інженерній практиці методу скінченних елементів (МСЕ) і його реалізація в комп'ютерному моделюванні деформації принаймні ґрунтових поверхонь під дією колеса автомобіля [16] дозволяють констатувати альтернативний і більш точний щодо відтворення фізико-механічних характеристик і плями контакту варіант, принаймні поки що стосовно ґрунтів як ОП. Разом з тим використання МСЕ через значно більшу розрахункову трудомісткість практично поки що використати у складі загальної моделі руху повнопривідної ВАТ бездоріжжям з використанням імітаційного моделювання руху наприклад у середовищі MATLAB Simulink достатньо проблемно [16]. А власне остання і є необхідним кінцевим елементом оцінки прохідності та ефективності конструкції ВАТ, де взаємодія шини з ОП відіграє важливу роль тільки однієї із ключових підпрограм розрахунку, поряд із підпрограмами динаміки силового приводу і автомобіля, водія у цілому.

Власне з умов оцінки режимів руху автомобіля в цілому, принаймні на даному етапі розвитку імітаційного моделювання, в основу формування відповідної схеми

Simulink взаємодії шини з ОП, обмежимося використанням емпіричних характеристик ОП і шини. Відомі методики і підходи однак обмежуються двома суттєвими допущеннями:

рух колеса автомобіля є прямолінійним;

бездоріжжя розглядається як однорідна і рівна ОП.

Використання програмного середовища MATLAB Simulink дозволяє шляхом задання профілю нерівної опорної поверхні врахувати на базі відомих емпіричних залежностей деформацію плями контакту і корекцію радіальних і тангенціальних реакцій у зоні контакту при переїзді шиною нерівностей ОП [17]. Однак для конкретності моделювання – розрахунку, очевидно, окрім зміни висот ординат профілю ОП слід паралельно врахувати зміну принаймі вертикального навантаження, внаслідок роботи підвіски і коливань автомобіля на нерівній ОП та відповідних коливань сили зчеплення шини з ОП, що формуватиме і зміни інтенсивності пробуксовування шини. Ці обставини відтворюються окремою підпрограмою, що моделює динаміку підресорених і непідресорених мас автомобіля при русі по нерівній дорозі, однак з врахуванням уже взаємних деформацій ОП і шини та відповідних пружно-демпфуючих характеристик ОП, шини, підвіски. Очевидно, що та сама шина при взаємодії з нерівною ОП і статично однаковому вертикальному навантаженні матиме різні характеристики залежно від характеристик підвіски, динамічного перерозподілу навантажень на осі, швидкості руху і т.д.

Звично, що у основу імітаційної моделі взаємодії шини з дорогою закладається відповідні емпіричні моделі фізико-механічних характеристик як самої шини, так і ОП. Останні суттєво відрізняються для 3-х основних типів опорної поверхні (грунти, піски, сніги). У нашому випадку це ґрунтові поверхні. Очевидним є також паралельний розрахунок із випередженням кількісної оцінки зчеплення шини з ОП та наступною квантифікацією опору рухові взаємозв'язаного з інтенсивністю пробуксовування шини, на що, у свою чергу, окрім характеристик зчеплення шини з ОП впливатиме і величина підведеного до колеса обертового моменту, надлишок якого інтенсифікує пробуксовування, але неоднозначно, не обов'язково, збільшує швидкість поступального руху автомобіля. Вплив коливань автомобіля і

робота підвіски на формування вертикальних навантажень і відповідно силу зчеплення шини з ОП теж очевидні. Тобто, підпрограма моделювання реакції автомобіля на нерівності ОП у цьому аспекті до відтворення динаміки взаємодії шини з ОП є допоміжною, але дозволяє на наступному кроці ітерації чисельного інтегрування диференціальних рівнянь руху автомобіля у поздовжньому напрямку дати більш реальну кількісну та якісну характеристику взаємодії шини з ОП, а відповідно, і динаміки руху автомобіля в цілому.

Наукові дослідження і математичні моделі руху автомобілів бездоріжжям у аграрній сфері розвинуті незрівнянно менше у порівнянні з аналогічними роботами щодо військової автотехніки. В силу певної інформаційної закритості цих робіт після II-ї світової війни у період так зв. „холодної війни” між СРСР та країнами НАТО можна констатувати наявність двох наукових шкіл – у СРСР і пострадянських державах („Східна” – [9-11 і інш.] та країнах НАТО („Західна” - [12-16]). Суттєві відмінності підходів в оцінці прохідності “Східної” та “Західної” наукових шкіл починаються з різних показників опорно-зчіпних характеристик поверхні руху.

Домінуюча, ще з часів Другої світової війни, впроваджена інженерним корпусом армії США (англ. - US Army Corps of Engineer), методика - WES (англ. Waterways Experiment Station) оперативна оцінка несної здатності (твердості) ОП руху (грунту, піску і т.і.), що базується на стандартизованому виміру опору деформації зазначеної ОП конусоподібним пенетрометром. Кут конуса 30° з площею основи $0,5\text{in}^2$ – дюйма квадратного – $3,23\text{ см}^2$, що переміщається на глибину до 15-20 см із швидкістю переміщення 3 см/с. Зазначена методика знайшла своє відображення ще у 70-х рр. минулого століття у стандарті ISO [18] – названого конусним індексом CI (англ. Cone Index). (Цей стандарт уже віднедавна прийнятий як ГОСТ Р в РФ, що актуально і для України).

Для „Західної” школи (НАТО – WES) характерним є більш практичний підхід із акцентом на оперативну оцінку прохідності місцевості і потенційної швидкості руху, у „Східній” школі натомість акцент зроблено на оцінку запасу тягового зусилля на буксирному гаці автомобіля, максимальні значення якого характерні для низьких швидкостях руху і фактично відсутній при русі з максимально

можливою технічно швидкістю руху бездоріжжям. Тобто фактично нівелюється оцінка мобільності – максимально можливих швидкостей руху конкретним бездоріжжям, що є визначальною для військової автотехніки. Власне тому оцінку швидкісних характеристик (і паливної економічності) руху бездоріжжям значно простіше робити на базі методології „західної” школи, зрештою це неминуче у світлі задекларованих офіційно вступів України в НАТО та ЄС.

Попередня і послідовно деталізована оцінка взаємодії коліс ВАТ з ОП – оцінка прохідності в країнах НАТО у військових формуваннях стандартизована і базується на декількох етапах:

оцінка прохідності ВАТ на базі оперативного визначення експериментального значення конусного індексу CI і базових параметрів ВАТ, діаметру D і ширини колеса B , а у деяких випадках навантаження на колесо G_a , ще висоти самої шини H та її радіальної деформації h_z та нескладного розрахунку т.зв. індексу (номера мобільності) військової авто техніки (ВАТ) – MN , введеного згідно з методикою WES, що є базою для подальшого вибору емпіричних моделей характеристик взаємодії шин ВАТ та конкретного типу ОП щодо кількісної оцінки характеристик і параметрів опору рухові і зчеплення шин з ОП, визначення відповідної глибини колії, як оцінки прохідності загалом щодо конкретного типу ВАТ із розрахунком відповідного порогового значення конусного індексу VCI (англ. – Vehicle cone index) як результату отриманих значень конусного індексу CI та MN [19,20].

Поряд з тим для обидвох наукових шкіл характерно наявність декількох різних емпіричних залежностей, що описують фізико-механічні властивості ОП і оцінку прохідності ВАТ, що, очевидно обумовлено і характерною різноманітністю типів і станів ОП. Хоча стосовно армій США чи Англії слід зазначити однозначність емпіричних залежностей оцінки прохідності ВАТ, процедури яких стандартизовані відповідно на базі VCI (США) чи MP (англ. - Mean maximum pressure) (Англія). Щодо 6 різновидів однотипної емпіричної залежності з визначення індексу прохідності MN – залежність запропоновану D. Rowland [21], що використовується і у військових відомствах Англії та ФРН

$$MN_R = \frac{CI \times B^{0,85} \times D^{1,15}}{W} \sqrt{\frac{\delta}{B}}, \quad (2.1)$$

де CI – значення конусного індексу, МПа; W – вага автомобіля, т; D , B – діаметр і ширина шин, м; δ – деформація шини під номінальним навантаженням на твердій опорній поверхні;

або більш просту залежність D. Freitag з корекцією, введеною у практику інженерним корпусом армії США [22,23]

$$MN_F = \frac{CI \times B \times D}{W} \sqrt{\frac{h_z}{H_T}} \times \left(\frac{1}{1 + \frac{B}{2D}} \right), \quad (2.2)$$

Відповідно теоретична оцінка глибини колії на ОП визначається [24]

$$z = \left(0,003 + \frac{0,287}{MN_F} \right) \times D, \quad (2.3)$$

або

$$z = \left(-0,001 + \frac{0,248}{MN_R} \right) \times D, \quad (2.4)$$

Остання є визначальною для комплексного розрахунку відповідно до коефіцієнтів зчеплення μ та сумарного опору рухові шини без врахування мікропрофілю місцевості, відповідно при використанні MN_R [24]:

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_F - 2,45} + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \quad (2.5)$$

$$f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_F - 2,5}, \quad (2.6)$$

або за нещодавною альтернативною пропозицією Maclaurin [25]:

$$\mu = 0,817 - \frac{3,2}{MN_F + 1,91} + \frac{0,453}{MN_F}; \quad f = 0,017 + \frac{0,453}{MN_F} \quad (2.7)$$

або при використанні MN_R :

$$\mu = 0,84 - \frac{1,31}{MN_R - 0,95} + \frac{0,2}{MN_R - 1,35}; \quad f = 0,04 + \frac{0,2}{MN_R - 1,35} \quad (2.8)$$

Як свідчить аналіз відомих досліджень [14-16 і інші] власне залежності (2.5)-(2.8) забезпечують кращу збіжність результатів розрахунку та дорожніх випробувань насамперед на ґрунтових ОП.

В основу російської методології, у т.ч. вітчизняної наукової школи оцінки руху колісної військової автотехніки [9] („Східна школа”), починаючи з 1950-х років

покладена оцінка фізико-механічних характеристик ОП на базі модуля деформації E – фактично модуля Юнга стосовно деформованих тіл, що однак безпосередньо у формулах не фігурує. Розрахунок опору рухові колеса автомобіля на деформованих ОП базується не на узагальненій сумарній оцінці-розрахунку результуючого коефіцієнта сили опору рухові f/F_f на відміну від „Західної” школи, а на диференціації відповідних вищезазначених складових опор рухові f_u, f_e, f_e, f_n , для розрахунку яких необхідна також додаткова кількісна оцінка, окрім модуля E таких фізико-механічних характеристик ОП, як:

кут внутрішнього тертя у ОП (грунті) φ_0 ;

опір ОП (грунту) зсуву;

внутрішнє зчеплення у ґрунті C_0 , МПа.

Розрахунок основної складової опору рухові – деформації ОП f_e та коефіцієнта зчеплення μ базується на базових емпіричних залежностях, опрацьованих Агейкіним Я.С. [10], що отримали подальший розвиток у недавніх наукових працях В.В. Ларіна [11] та Вольської Н.С.:

$$\mu = K_H \times f_T + (1 - K_H) \times \left(\operatorname{tg} \varphi_0 + \frac{C_0}{q_0} \right); \quad f_T = q_0 \times z \times 0,3 \times \left(\frac{B + B_1}{W_z} \right), \quad (2.9)$$

де q_0 – тиск статичний, у роботі [11] – динамічний у контактї шини з ОП; z – глибина колїї; W_z – вертикальне навантаження на колесо; B_1 – ширина колїї; K_H – коефіцієнт насиченості протектора; C_0 – внутрішнє зчеплення у ґрунті (ОП); φ_0 – кут внутрішнього тертя у ґрунті (ОП); f_T – коефіцієнт тертя гуми шини до ОП.

Залежності (2.9) обумовлюють необхідність попереднього розрахунку щодо оцінки значень питомого тиску q у контактї шини з ОП та глибини z і ширини B_1 утвореної колїї:

$$q = 0,5 \times \delta_r \times \frac{P_u + P_K}{B_1} \times \left(\frac{B}{H} + \frac{3H}{B} \right) \times \left(1 - \frac{\delta_r}{B} \right), \quad (2.10)$$

$$q_0 = \frac{q}{1 + \frac{V_a}{2 \times \varphi_0 \times n \times l}} \quad (2.11)$$

$$q_d = \frac{E \times z}{0,5 \times a \times (B + B_k) \times \arctg\left(\frac{H_\Gamma - z}{0,5 \times a \times (B + B_k)}\right)} + \frac{2E \times Z \times \arctg\left(\pi \frac{H_\Gamma - z}{(B + B_k)}\right)}{\pi \times q_s}, \quad (2.12)$$

де q – статичний тиск у контакті шини з ОП; $P_{ш}$ – тиск повітря у шині; P_k – тиск на ОП від жорсткості каркаса шини; δ_Γ – деформація шини на ОП; q_d – динамічний тиск у контакті шини з ОП; V_a – швидкість автомобіля; z – глибина колії; n – кількість осей; l – довжина поверхні контакту колеса з ОП; f_Γ – товщина м'якого шару ОП; q_s – несна здатність ґрунту; a – коефіцієнт зміни напружень в ОП за глибиною.

Взаємопов'язане з q і q_d значення глибини колії z визначається спільним розв'язком рівнянь (10)-(12) та залежності [11]

$$z = \left(\frac{W_z}{C_\Gamma \times F_{ш} \times 10^6} \right)^{\frac{1}{\gamma}}, \quad (2.13)$$

де C_Γ – коефіцієнт деформації ґрунту; $F_{ш}$ – площа плями контакту шини з ОП; γ – показник щільності ґрунту.

У свою чергу площа плями контакту $F_{ш}$ визначається спрощеним прямокутним контуром з ширини колії B_k та довжини плями контакту l і суміщеним розв'язуванням (2.10)-(2.13) з врахуванням перерозподілу відомого вертикального навантаження на колесо W_z та деформаційних характеристик шини і ОП:

$$W_z = 0,25 \times \pi \times q \times \left[(1 - 0,5\xi) \times B \times 2\sqrt{D \times \delta - \delta^2} + \xi \times B_k \sqrt{D(\delta + z) - (\delta + z)^2} \right] \quad (2.14)$$

Додаткові уточнювальні складові опору рухові від горизонтального зміщення ОП:

бульдозерний ефект для гальмування та ведених коліс

$$f_\delta = 0,5 \times \gamma \times q \times z \times \text{tg}^2\left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2}\right) + 2 \times C_0 \times \text{tg}\left(45^\circ + \frac{\varphi_0}{2}\right), \quad (2.15)$$

ескалаційний ефект для ведучих коліс при пробуксовуванні

$$f_e = \frac{1,5 \times 10^6}{(\mu + 1)^{W_z}} \times \left[\frac{Z_{ш} \times (L_{ш} - e_{ш})}{(1 - S_\delta) \times (0,5D - \delta) \times 2 \arcsin \frac{L_{ш}}{D}} \right]^{\mu-1} \times B_k \times C, \quad (2.16)$$

де Z_n , L_n , e_n – висота, крок, ширина ґрунтозачепів протектора шини; C – безрозмірний емпіричний коефіцієнт ОП; S_δ – коефіцієнт пробуксовування колеса.

Ефект ескалації ґрунту супроводжується винесенням часток ОП із зони контакту і відповідним додатковим поглибленням колії ΔZ .

Прилипання частинок ґрунту або піску у впадинах протектора

$$f_n = 0,5q_n \times B \times \frac{L}{W_z}, \quad (2.17)$$

де q_n – питома сила прилипання часток мокрої ОП до колеса.

Очевидно, що процедура розрахунку сумарного опору рухові автомобіля на ґрунтових поверхнях, що деформуються, за методологією „Східної” школи значно складніша та вимагає експериментального визначення – оцінки несучої здатності ОП – ґрунту не одного комплексного показника – конусного індекса СІ (що враховує і вертикальну деформацію і зсув ОП в горизонтальному напрямі, характерних для взаємодії колеса з ОП), як у „Західній” школі, а декількох, вищезазначених (у т.ч. з проблемністю оперативної оцінки результатів).

Для „Західної” школи характерна і кількісна оцінка змін деформації і ущільнення ОП при проходженні наступних, другої і третьої осей, загалом до 50 проходів осей – рух колони однотипною колією [9-11]. Глибина входу шин при звичній для ВАТ одноколійності глибина колії буде меншою, а відповідно змінюються – зростає величина опору деформації (несуча здатність) ОП та зменшується опір рухові для коліс кожної з наступних осей. Звично, що і для 2- і 3-вісних ВАТ для кожної з задніх осей ефект ущільнення ОП змінює для кожної з них як сили опору руху, так і зчеплення.

Кількісна оцінка ефекту ущільнення ґрунтових і піщаних ОП внаслідок багаторазового проходження коліс є достатньо близькою в обидвох наукових школах. У роботах [24,25] запропоновано узагальнену емпіричну модель оцінки збільшення глибини колії Z_n при n циклів проходження колеса

$$z_n = z_1 \times n^{\frac{1}{a}} \quad (2.18)$$

Де a – коефіцієнт врахування циклів навантаження ОП, який для піщаних ОП згідно з [25] знаходиться у діапазоні $a=2 \div 26$ залежно від кількості циклів n проходження колеса, для зв’язних ОП – $a=2 \div 5$.

У роботах [24,25] запропоновано емпіричні залежності розрахунку коефіцієнта циклічності, а в залежності від конусного індексу CI чи індексу прохідності MN

$$a = 1,5 \times MN_F^{0.7}; a = 0.011 \times CI^{0.9} \quad (2.19)$$

Загалом починаючи від практично перших робіт у цій сфері слід констатувати близькість результатів оцінки ущільнення ОП і зміни z при багаторазовому проходженням колесом колії обидвох наукових шкіл. Однак практичною перевагою „Західної” школи є безпосередня прив’язка до базового параметра CI механіко-деформаційних характеристик ОП. У практиці НАТО, як інженерного корпусу армії США, так і центру у сфері озброєння армії Англії стандартизовані табульовані значення поправочного коефіцієнта до конусного індексу CI [26,27], або показника т.зв. ефективного тиску на ОП – ММР [28] щодо кількості зміни ущільнення ОП залежно від кількості проходів коліс по ОП. Очевидно, що при формуванні національної нормативної бази у сфері прохідності та відповідних наукових досліджень і дослідно-конструкторських робіт по ВАТ та аграрній автотехніці доцільно орієнтуватись власне на ці дані з додатковими уточненнями щодо специфіки вітчизняних чорноземів і заболочених місцевостей.

2.2. Імітаційне моделювання руху колісних машин бездоріжжям.

Моделювання – розрахунок параметрів руху повноприводних автомобілів опорними поверхнями, що деформуються (бездоріжжя), суттєво відрізняються від класичного розрахунку параметрів руху автомобільними дорогами з твердим покриттям і обумовлює принаймі двомірну динамічну еквівалентну систему, у т.ч. з врахуванням не тільки деформації шин, але і деформації опорної поверхні (зріз ґрунту і додатковий опір рухові, а також і вплив коливань), зміни вертикальних навантажень на шину під впливом коливань автомобіля під час руху макро- і мікронерівностями бездоріжжя.

У розвиток спрощеної моделі [16] та вітчизняних досліджень [17] на базі вищевикладених теоретичних основ руху автомобіля бездоріжжям „Західної” школи опрацьовано, враховуючи сучасний розвиток програмного комп’ютерного

забезпечення Simulink MATLAB, динамічну еквівалентну модель автомобіля типу 4x4, 4x2, рис.2.1.

Остання передбачає 4 основні складові підпрограми:

моделювання – розрахунок взаємодії шини та опорної поверхні з розрахунком деформації шини і деформації ґрунту – оцінки опору рухові “WHEEL”;

моделювання – розрахунок поздовжньо-вертикальних коливань автомобіля під впливом макро- і мікро- профілю опорної поверхні – визначенням відповідних коливань величини вертикальних навантажень у контакті шини з опорною поверхнею і відповідного впливу на зчеплення та пробуксовування шини “TERRA”;

моделювання – розрахунок режимів роботи силового приводу – від двомірного інтерполювання режиму роботи двигуна, фіксації – вибору відповідної передачі у трансмісії до врахування впливу диференціалів у трансмісії на формування тягового зусилля у контакті шини з опорною поверхнею “ENGINE”;

моделювання – розрахунок тягово-швидкісних характеристик і витрати палива руху автомобіля у цілому з обмеженням потенційної максимальної швидкості із умов граничних віброприскорень “VEHICLE”.

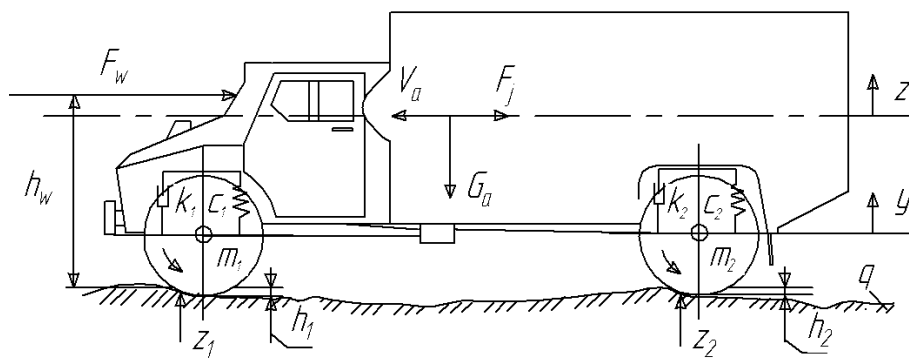


Рис.2.1. Узагальнена динамічна еквівалентна модель автомобіля на твердому бездоріжжі [16].

При цьому у базовий алгоритм моделювання закладено:

розрахунок додаткового опору рухові і відповідно додаткових затрат енергії та деформації (зрізу ґрунту) опорної поверхні на підставі наявних емпіричних характеристик ґрунтів, типових для плантацій цукрового буряка на теренах Західної України (достатньо зволожений суглинок у період збирання врожаю і

помірних дощів) з відповідно визначеним експериментально значенням показника - конусного індексу СІ;

алгоритм вибору режиму роботи двигуна і передачі у механічній коробці передач задається оператором, у т.ч. метод перебору можливих варіантів. У моделі не розглядаються варіанти з гідروоб'ємною чи гідромеханічною трансмісією, що є предметом окремих досліджень.

В основу розрахунку взаємодії шини з опорною поверхнею покладено наявність плоскої поверхні контакту.

Деформація шини

$$q = \pi \times h \frac{(P_u + P_0)}{2B} \times \left[\frac{B}{H} + \frac{3H}{2B} \right] \times \left(1 - \frac{h}{B} \right), \quad (2.20)$$

де: q – тиск у плоскій зоні контакту, h – деформація шини; P_u – внутрішній тиск у шині; P_0 – тиск у контакті при $P_u=0$; B – ширина профілю шини; H – висота профілю шини.

Деформація ґрунту (з врахуванням швидкості руху і фільтраційної реакції ґрунту)

$$q_{\Gamma} = q_{CT} \times \frac{1}{1 + \frac{0,5V_a}{\varphi_0 L}}, \quad (2.21)$$

де L – довжина поверхні контакту, V_a – швидкість автомобіля, φ_0 – кут внутрішнього тертя у ґрунті, q_{CT} – статична деформація при $V_a = 0$.

Узагальнені статистичні дані відповідних параметрів опорних поверхонь бездоріжжя і полів, що характерні для України, представлено у табл.2.1 на базі даних [16] і проведеного перерахунку значень E у еквівалентні показнику прохідності конусному індексу СІ (англ. – Cone index).

Таблиця 2.1

Статистичні значення параметрів ґрунтових поверхонь, що за результатами аналізу характеризують деформацію та зчіпні властивості

№ з/п	Параметри, види і стани опорних поверхонь	E , МПа	H_{Γ} , см	φ_0 , град	C_0 , МПа	СІ, МПа
-------	---	-----------	-------------------	--------------------	-------------	---------

Таблиця 2.2

Значення коефіцієнта кратності проїздів k_n [16]

Кількість проїздів осей	1	2	5	10	25	50
Коефіцієнт кількості проїздів осей, k_n	1	1,20	1,53	1,85	2,35	2,80

З механіки ґрунтів очевидно, що при в'їзді здвоєних коліс в колію після передньої осі з одинарними шинами на 0,5 плями контакту здвоєних коліс початково припадає практично повне навантаження на вісь (яке, у свою чергу, як правило вдвічі більше навантаження передньої осі). Це зумовлює дуже швидко деформацію і просідання ґрунту до появи повного контакту обох шин з ОП, ущільненої до рівня проходу передньої осі, тобто з цього моменту уже працюють емпіричні залежності оцінки коефіцієнтів опору руху та зчеплення (2.5 – 2.8), але з умовою врахування здвоєної ширини коліс B . Однак додатково слід враховувати і додатковий опір руху, обумовлений вищезгаданою деформацією первинною ОП зовнішніми половинами здвоєних коліс задньої осі. Це можна у процесі імітаційного моделювання руху ввести шляхом додаткового розрахунку опору руху одного колеса первинною ОП (але з повним навантаженням на задню вісь) на глибину колії, еквівалентну проходу одинарних коліс першої осі з подальшим переходом до розрахунку опору руху уже по попередньо ущільненому ґрунті та врахуванням здвоєної ширини шин B .

Реальне бездоріжжя не є рівною поверхнею, що деформується. Відповідно неминуче коливання підресорених мас під дією вертикальних навантажень реакцій z_1 і z_2 (рис. 2.2). Також очевидні відповідні зміни, як деформацій ґрунту і шини, так і глибини колії внаслідок відповідних коливань підресорених і непідресорених мас автомобіля та профілю поверхні як випадкової функції $g(t)$.

Для двомірної моделі (рис.2.2) прийняті залежності взаємозв'язку переміщень z підресореної маси автомобіля та висоти нерівностей опорної поверхні [16].

$$\frac{z}{q} = \sqrt{\frac{(C_{II} C_{III} - K_a K_{III} V_a^2) + (K_a C_{III} + K_{III} C_{II})^2 V^2}{\Delta}}, \quad (2.22)$$

де

$$\Delta = \left[MmV^2 - (MC_{II} + mC_{II} + MC_u + K_a K_u) V_a^2 + C_n C_u \right]^2 + \left[V(K_a C_u + K_u C_n) - (MK_a + MK_u + mK_a) V_a^3 \right]^2, \quad (2.23)$$

де M , m – відповідно підресорена і непідресорені маси автомобіля, C_{II} , C_{III} – жорсткість підвіски і шини (радіальна) K_a , K_{III} , – коефіцієнти демпфування підвіски, амортизатора та ресор за наявності та шин.

З врахуванням деформації опорної поверхні (грунту, піску) у (2.22), (2.23) враховується приведені жорсткість і демпфуючі характеристики C_{PP} і K_{PP}

$$C_{PP} = \frac{C_{III} \times C_G}{C_{III} + C_G}; \quad K_{PP} = \frac{F_z h_k (1 - \rho) \xi_1 + F_z h_k \frac{\psi_1 P_1 \xi_2}{P + P_1}}{4V_a (h_{III} + \rho h_k)^2}, \quad (2.24)$$

де F_z – вертикальне навантаження на колесо, h_k – висота (глибина) колії; ρ – частка пружної деформації ґрунту; ξ_1 , ξ_2 – емпіричні коефіцієнти врахування кривизни характеристик деформування ґрунту і шин.

Відповідно динамічна складова вертикального навантаження на шину наближено визначається масою навантаження на вісь і прискоренням вертикального переміщення колеса, додатне чи від'ємне залежно від напрямку переміщення/ходу підвіски.

Завданням моделювання руху – оцінки прохідності та мобільності автомобіля за умов бездоріжжя практично є визначення і максимально можливої швидкості руху, що задається відповідно підібраними режимами роботи двигуна та трансмісії (вибору відповідних передач і навантажувального і швидкісного режимів роботи двигуна – з умов обмеженої сили зчеплення шин з опорною поверхнею, а це далеко не завжди робота двигуна з максимальною паливо подачею).

2.3. Моделювання руху автомобіля у програмному середовищі MATLAB Simulink

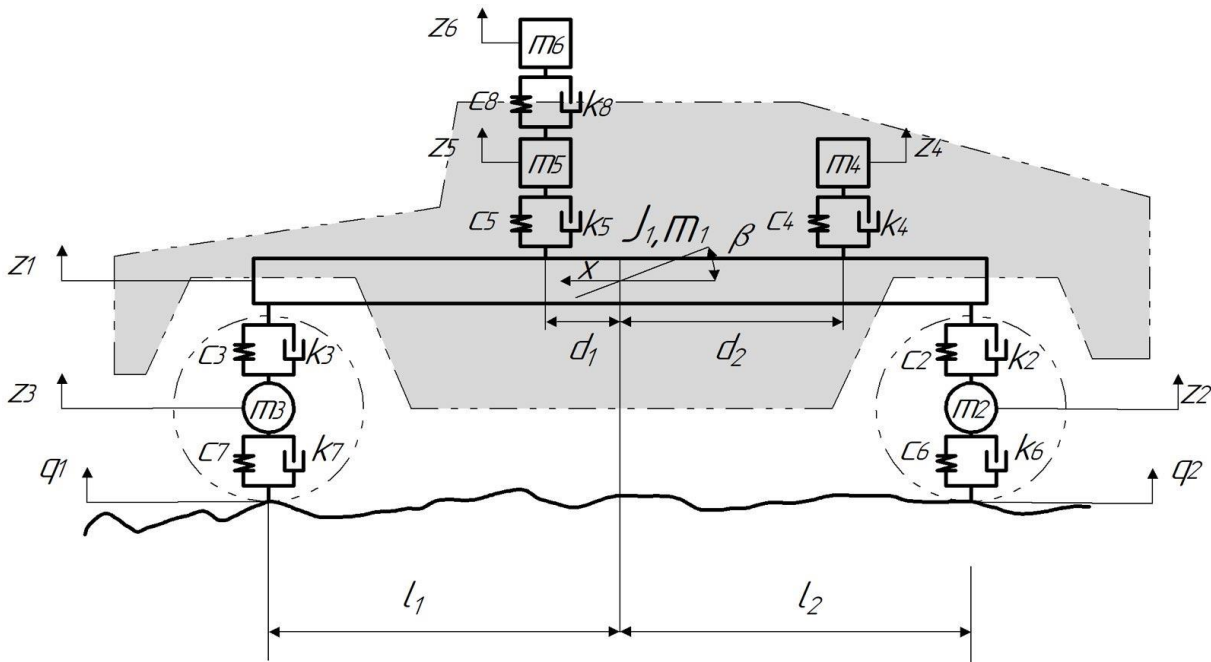


Рис. 2.3. Динамічна еквівалентна схема 2-вісного автомобіля [16]:

$m_{\text{в}}$ – маса водія; – підресорена маса автомобіля; m_1, m_2 – непідресорені маси 1-ї та 2-ї осей відповідно; J_a – момент інерції кузова автомобіля; β – кут повздовжніх коливань; z_1, z_2 – вертикальні переміщення непідресорених мас 1-ї та 2-ї осей; z_a – вертикальні переміщення підресореної маси; z_c – вертикальні переміщення сидіння водія; $z_{\text{в}}$ – вертикальні переміщення водія; k_{q1}, k_{q2} – коефіцієнт демпфування опорної поверхні в місці контакту коліс 1 і 2 осей; $k_{\text{ш}1}, k_{\text{ш}2}$ – коефіцієнт демпфування шин; $k_{\text{п}1}, k_{\text{п}2}$ – коефіцієнт демпфування амортизаторів 1 і 2 осей; k_c – коефіцієнт демпфування сидіння; c_{q1}, c_{q2} – коефіцієнт жорсткості опорної поверхні; $c_{\text{ш}1}, c_{\text{ш}2}$ – пружні характеристики шин; $c_{\text{п}1}, c_{\text{п}2}$ – пружні характеристики підвіски; c_c – пружна характеристика сидіння; WB – колісна база; a – відстань від передньої осі до центру коливань; b – відстань від задньої осі до центру коливань; L_c – відстань від центру коливань до центру мас водія; q – збурення мікропрофілю; x – напрямок руху

Опис динаміки переміщень вищезазначених компонентів КМ у поздовжньому напрямі руху X та вертикальній площині Z на основі принципу д'Аламбера представлено з певним наближенням системою рівнянь:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 m_B \ddot{z}_B + k_c \dot{z}_B + c_c z_B = k_c (z_a + \dot{\beta} \cdot L_c) + c_c (z_a + \beta \cdot L_c) \quad (1) \\
 M_a \ddot{z}_a + (k_{n1} + k_{n2}) \dot{z}_a + (c_{n1} + c_{n2}) z_a + (k_{q1} \cdot a + k_{q2} \cdot b) \dot{\beta} + (c_{n1} \cdot a + c_{n2} \cdot b) \beta + \\
 + (z_a + \dot{\beta} \cdot L_c) k_c + (z_a + \beta \cdot L_c) c_c = k_c \dot{z}_c + c_c z_c + k_{n1} \dot{z}_1 + k_{n2} \dot{z}_2 + c_{n1} z_1 + c_{n2} z_2 \quad (2) \\
 J_a \ddot{\beta} + (k_{n1} \cdot a^2 + k_{n2} \cdot b^2) \dot{\beta} + (c_{n1} \cdot a^2 + c_{n2} \cdot b^2) \beta + (k_{n1} \cdot a + k_{n2} \cdot b) \dot{z}_a + \\
 + (c_{n1} \cdot a + c_{n2} \cdot b) z_a + k_c (z_a + \dot{\beta} \cdot L_c) L_c + c_c (z_a + \beta \cdot L_c) L_c = \\
 = (k_c \dot{z}_c + c_c z_c) L_c + (k_{n1} z_1 \cdot a + k_{n2} z_2 \cdot b) + c_{n1} z_1 \cdot a + c_{n2} z_2 \cdot b \quad (3) \\
 m_1 \dot{z}_1 + (k_{n1} + k_{ш1}) z_1 + (c_{n1} + k_{ш1}) z_1 - k_{n1} (z_a + a \dot{\beta}) - c_{n1} (z_a + a \beta) = \\
 = k_{ш1} \dot{q}_1 + c_{ш1} q_1 \quad (4) \\
 m_1 \dot{z}_1 + (k_{n2} + k_{ш2}) z_2 + (c_{n2} + k_{ш2}) z_2 - k_{n2} (z_a + b \dot{\beta}) - c_{n2} (z_a + b \beta) = \\
 = k_{ш2} \dot{q}_2 + c_{ш2} q_2 \quad (5)
 \end{array} \right.$$

В Україні практично відсутня офіційна законодавча нормативна база щодо оцінки профільної та опорної прохідності колісної автотехніки підвищеної та високої прохідності, у т.ч. і військової. Потреба в ній є очевидною і наростаючою у зв'язку із необхідністю оновлення парку військової автотехніки, здебільшого російських автозаводів ще розробки часів СРСР. Це ж відноситься і до автотранспорту у аграрній та лісогосподарській сферах. Використання для оцінки прохідності (а додатково і мобільності руху) фактично на добровільних засадах застарілого ГОСТ В 25759-83 і РТМ 37.001.099-77 та РД 37.001.109 очевидно є недоцільним. У Росії зазначені документи уже не чинні і замінені на ГОСТ РВ 52048-2003, ГОСТ РВ 52395-2005 і РТМ 37.001.053-2000. Поряд з тим вони докорінно відрізняються від методик і стандартів НАТО у даній сфері при задекларованій політиці приєднання України до НАТО.

За таких умов очевидна безальтернативність використання основних положень „Західної” наукової школи (WES – методика) у військовій сфері також і у аграрних дослідженнях (що зрештою ще з 1960-х р.р. було розпочато у США та Західній Європі [28]).

Враховуючи очевидний обмежений доступ до програмного забезпечення WES та інших методик оцінки прохідності ВАТ [16], структура побудови моделі руху базувалась на аналізі публікацій по заданій тематиці і сформована з наступних етапів:

задання (або експериментальне визначення) чисельного значення CI (МПа) для конкретного типу і стану ОП [14-16];

розрахунок індексу прохідності MN (англ. Mobility number або wheel numeric) для відомого значення конусного індексу CI опорної поверхні та конкретного типу колісної ВАТ згідно вище наведених залежностей (2.1) – (2.);

автоматичний підбір передачі в трансмісії під визначене тягове зусилля і швидкість руху (включно режими максимальної паливоподачі у двигун) – шляхом логічного задання перебору варіантів навантаження режиму роботи двигуна, приведених до ведучих коліс ENGINE;

розрахунок глибини колії z з аналізу досліджень [16] щодо існуючих у різних дослідженнях емпіричних залежностей:

$$z = \left(0,003 + \frac{0,91}{MN_{CI}} \right) \times D \quad (2.27)$$

та паралельно за MN_{CI} альтернативну залежність із більшою збіжністю з результатами експериментів по заліснених ОП згідно [14-16]:

$$z = \left(-0,001 + \frac{0,248}{MN_{CI}} \right) \times D \quad (2.28)$$

та відповідно:

$$z = \left(0,003 + \frac{0,287}{MN_{CC}} \right) \times D \quad (2.29)$$

розрахунок коефіцієнтів опору деформації ОП – опору рухові f та коефіцієнту зчеплення шини з ОП μ здійснюється за вищенаведеними емпіричними залежностями (2.5) - (2.8).

З врахуванням вертикального навантаження на колесо автомобіля залежності (2.22) – (2.24) дозволяють визначати зусилля опору рухові на заданій ОП та силу зчеплення шин з поверхнею, а відповідно і необхідне тягове зусилля, наближене до межі пробуксовування колеса. $S=0 - 0,2$. Це забезпечує максимально можливу швидкість руху V_{max} при максимально можливій вищій передачі за необхідної сили тяги на колесах і відповідно кінематично вищої швидкості.

На рис.2.4 представлено, як приклад реалізації даної моделі, зміна швидкісних режимів руху військових автомобілів КамАЗ 4310 та КрАЗ 5233 на різних типах і станах ОП, експериментальне підтвердження адекватності чого для трьох різних ОП надано в [16].

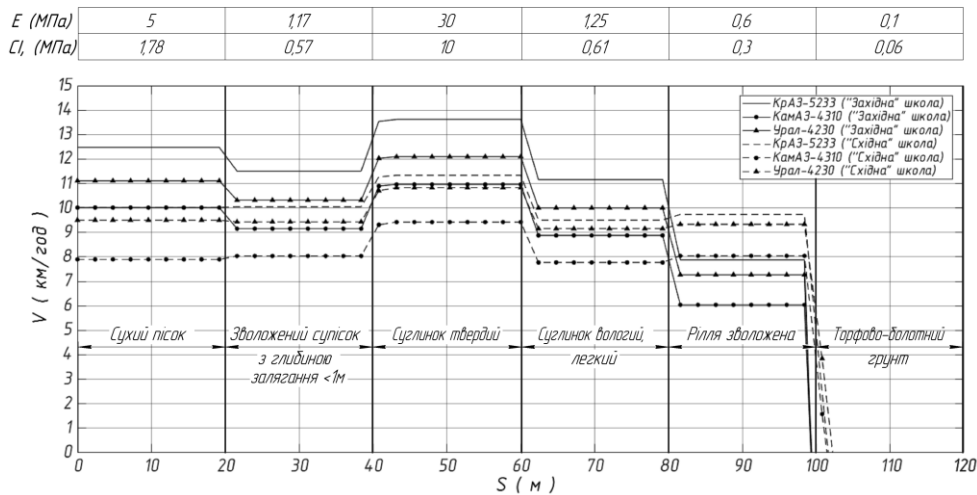


Рис. 2.4. Приклад зміни максимальних швидкостей руху автомобілів залежно від типу і стану бездоріжжя [16].

Окремо визначались показники прохідності автомобілів, що важливо насамперед для весняно-польових робіт з найбільшим вмістом води у ґрунті:

Згідно WES-методики т.зв. конусного індексу мобільності VCI [14-16]:

$$VCI_1 = 11,48 + 0,2MN_{Cl} + \left(\frac{39,2}{MN_{Cl} + 3,74} \right) \quad (2.30)$$

і для 50-го проїзду осі тією ж колією

$$VCI_{50} = 28,23 + 0,43MN_{Cl} - \left(\frac{92,67}{MN_{Cl} + 3,62} \right) \quad (2.31)$$

Де 1-індекс першого проїзду передньої осі для кожної наступної осі автомобіля враховується ефект ущільнення ОП у однорозмірній колії згідно залежностей представлених у [14]; 50 – кількість проходу осей тією ж колією.

За методикою RARDE (англ. Royal Armament Research and development Establishment UK) Великобританії т.зв. максимальний ефективний тиск на ОП MMP [14,16]:

$$MMP = \frac{k \times W_a}{2 \times n \times B^{0,35} \times D^{1,15} \times \left(\frac{h_z}{H_T} \right)^{0,5}} \quad (2.32)$$

Де W_a - вага зразка ВАТ; k - коефіцієнт кількості осей, значення k надані у роботах [14, 16].

Ущільнені ОП у залежності від кратності проїзду осей оцінюється відповідним збільшенням значення C_l у 1,85 раз при проїзді 10 осей і до 2,80 при проїзді 50 осей [14].

Відповідна блок-схема розрахунку динаміки руху бездоріжжям з додатковим до V_{max} обчисленням значень VCI та MMP на базі емпіричних залежностей «Західної» наукової школи наведена на рис.2.5.

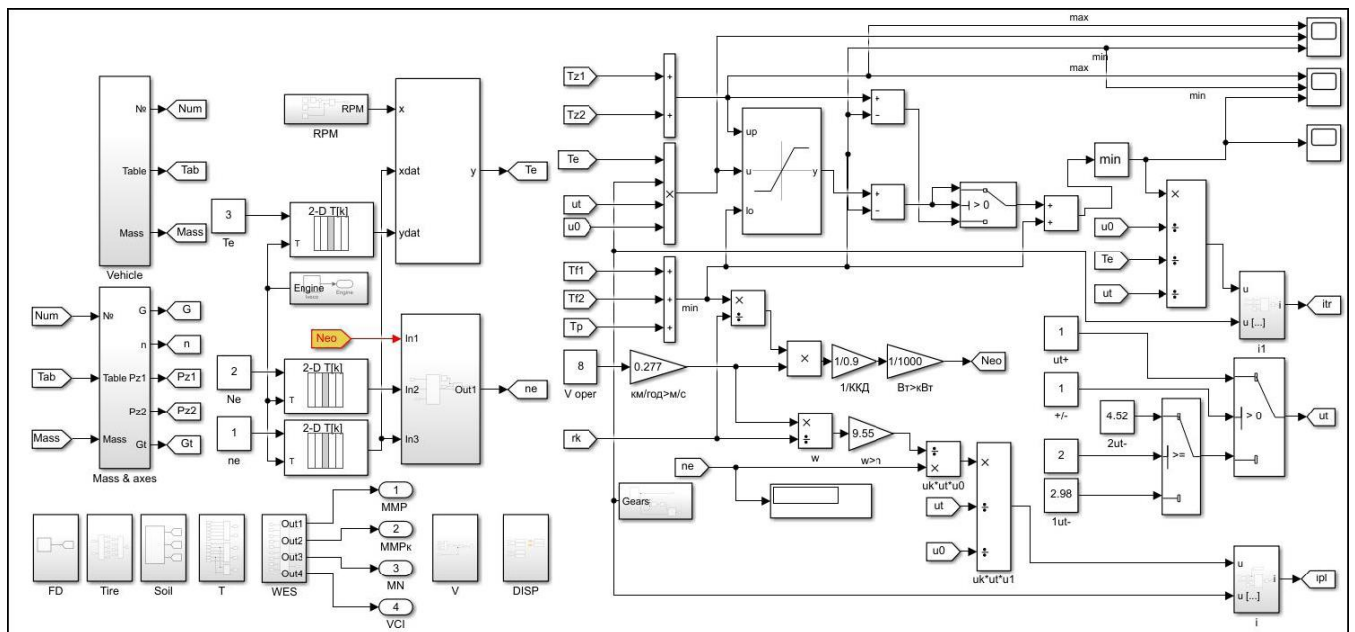


Рис. 2.5. Блок-схема розрахунку швидкостей руху двовісних автомобілів бездоріжжям у програмному середовищі MATLAB Simulink [17].

В табл..2.3 представлено приклади типових фізико-механічних характеристик ґрунтів – поля після збору буряка – сухої глини та зволоженої після тривалих дощів суглинку (як типових для Західної України).

Таблиця 2.3. Фізико-механічні характеристики типових ґрунтів після збору буряка (агрофон Західної України)

№ з/п	Тип і стан ОП	Щільність непорушеної структури ґрунту, г/см ³	Вологість, %	E, МПа	СІ, кПа
1	Суглинок вологий, легкий	1,88	23,5	1,25	610
2	Глина м'яка	2,5	12	10	1510

2.4. Розрахункова частина

За результатами проведеного комп'ютеризованого імітаційного моделювання руху завантажених вищезгаданих вантажівок на 2-х типах ґрунтів (табл. 2.3) слід констатувати відчутну перевагу, як з умов вищих швидкостей руху, так і питомих

затрат дизпалива на 100 т км перевезення вантажу, власне автомобіля КрАЗ 5233, табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Результати розрахунку можливих швидкостей руху та паливної економічності автомобілів на вивезенні з поля цукрових буряків

Модель автомобіля	Суглинок вологий, СІ = 0,61 мПа		Глина м'яка, СІ = 1,51 мПа	
	V, км/год	Q, л/100 км	V, км/год	Q, л/100 км
ГАЗ 53-12	8,2	36,5	11,5	32,7
КАЗ 4540	8,9	32,3	12,4	28,5
КрАЗ 5233	9,7	41,0	13,1	36,1

За результатами моделювання слід констатувати наступне:

- Автомобіль КрАЗ забезпечує найвищу мобільність руху бездоріжжям, тут на обидвох типах поля після збору цукрового буряка, попри практично вдвічі більшу повну масу, але при співставній питомій потужності з КАЗ та вищій на 35-40% щодо ГАЗ;
- Лінійна витрата палива природно є найвищою і у КрАЗ, але при цьому КрАЗ і перевозить у 1,5 – (КАЗ) -2 (ГАЗ) рази більше вантажу – цукрових буряків. Тому затрати на паливо слід співвідносити і щодо обсягу вантажних перевезень у тонно/кілометрах (що є предметом розгляду у економічній частині);
- Вміст вологи в ґрунті (твердість опорної поверхні) мають домінуючий вплив на мобільність та енергозатратність руху вантажівок всіх розглянутих моделей. Двократне зменшення вмісту вологи (табл. 2.3) зумовлює

підвищення мобільності – швидкісних режимів руху на 35-40% з відповідним зниженням лінійних витрат палива у л/100 км для всіх розглянутих моделей автомобілів.

ВИСНОВОК

В розрахунковій частині роботи проведено порівняльну оцінку паливно-швидкісних показників використання автомобілів ГАЗ 53, КАЗ 4540 та КрАЗ 5233 на транспортуванні з поля цукрових буряків. Виконані розрахунки забезпечують достатню адекватність з реальними процесами, що підтверджено достатньою збіжністю результатів експериментальних заїздів КрАЗ 5233 на 3-х типах бездоріжжя з результатами комп'ютеризованого імітаційного моделювання даного алгоритму [16].

За отриманими результатами слід констатувати очевидні переваги і ефективність використання у аграрній сфері для внутрішніх перевезень «поле-комора» повнопривідних дизельних вантажівок. Разом з тим, окрім очевидної переваги з умов питомих енергозатрат – витрат пального на тонокілометр вантажу, автомобілі і автопоїзди категорії N3 слід додатково оцінювати з умов агроекології – недопустимого ущільнення ґрунту з-за надмірного навантаження на вісь/колеса. Для автомобілів типу КрАЗ (категорія N3) навантаження на вісь практично вдвічі більше у порівнянні з середньотонажними ГАЗ і КАЗ (категорія N2) і використання більших, широко профільних шин з більшою прямою контакту не компенсує повністю ефект наростання питомого тиску у контакті і переущільнення.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ АВТОМОБІЛІВ В АГРАРНІЙ СФЕРІ

3.1. Особливості застосування автотехніки в аграрній сфері

Автомобільний транспорт в аграрній сфері використовується в основному для двох видів перевезень:

- Внутрішніх, господарських типу «поле – комора», де однозначно домінує бездоріжжя (поле) і ґрунтові дороги та невелике плече перевезень (у межах 10-15 км);
- Перевезень за межі господарств – перевезення продукції до споживача, що характеризуються уже значною часткою доріг з твердим покриттям та відчутно більшим плечем перевезень.

Відповідно можна констатувати про певну спеціалізацію автотранспортних засобів і вимог до них. З аналізу досвіду в країнах ЄС можна констатувати використання на внутрішніх перевезеннях 3-х типів колісної техніки:

- власне вантажних повнопривідних автомобілів, переважно самоскидів і з можливістю використання причепів або напівпричепів (з умов достатнього запасу потужності щодо руху автопоїзда бездоріжжям). Прикладом цього і був власне КАЗ 4540;
 - колісних тракторів з причепами (різних категорій, залежно від класу тяги і наявного парку). Власне цей варіант і домінує у сучасному аграрному господарстві України, попри менші швидкості руху і більшу питому витрату пального на обсяги транспортної роботи;
- Універсальних тягово-транспортних колісних засобів типу Unimog / Автотрак (рис. 3.1 [29], 3.2 [30]) у парі з причепом або напівпричепом. Останні практично не використовуються в Україні, хоча певний запит на машини типу Автотрак можна констатувати в пострадянських державах, насамперед щодо невеликих фермерських та особистих господарств, де ця машина може поєднувати в собі і функції колісного трактора і мало- чи середньотонажної вантажівки підвищеної прохідності [31-33].

З досвіду повоєнної Європи, насамперед ФРН, власне машини типу Автотрак / Унімог є актуальними і для України.



Рис. 3.1. Універсальний колісний тягово-транспортний засіб Unimog 5000 [29]



Рис. 3.2. Універсальний колісний тягово-транспортний засіб Praga UV 80 [30]

- Застосування для перевезення врожаю (зерно, овочі, фрукти).

- Використання для транспортування сільськогосподарської техніки.
- Перевезення добрив, кормів і тварин.

3.2. . Паливна економічність в умовах бездоріжжя

- Слід констатувати відсутність як нормативної бази, так і загальноприйнятої методики оцінки і нормування витрат палива автомобілями в умовах бездоріжжя при всьому розмаїтті типів і станів останнього.

Особливості застосування автомобілів

Основні напрямки застосування:

Перевезення врожаю

:

Зерна: пшениця, кукурудза, соняшник тощо.

Овочів: картопля, морква, капуста.

Фруктів: яблука, груші, виноград.

Автомобілі обладнуються спеціальними кузовами для перевезення сипучих продуктів або можуть мати борти, що знімаються для спрощення завантаження.

Транспортування сільськогосподарської техніки

Автомобілі використовуються для перевезення невеликих агрегатів та сільськогосподарського обладнання, таких як:

Мотоблоки, плуги, культиватори.

Невеликі трактори чи їхні компоненти.

Особливо корисні в умовах міжгосподарського обслуговування, коли обладнання потрібно доставити на поля, віддалені від основного складу.

Перевезення добрив, кормів і тварин

Добрива: дозволяють зручно транспортувати мінеральні та органічні добрива до місць внесення.

Корм: підходять для доставки кормів безпосередньо до ферм або випасів.

Тварини: встановлюють спеціальні кузови чи клітки для транспортування дрібної рогатої худоби (вівці, кози, поросята).

3.3 Перспективи розвитку транспорту в аграрній сфері

Сучасні технології відкривають нові можливості для вдосконалення конструкції та експлуатаційних характеристик причепів:

1. Використання легких матеріалів:

- Застосування алюмінієвих сплавів і композитних матеріалів дозволяє знизити вагу причепів, збільшити їхню вантажопідйомність та зменшити витрати палива.
- Полегшені конструкції забезпечують довший термін служби за рахунок підвищеної стійкості до корозії та зношення.

2. Автоматизація та цифровізація:

- Впровадження систем GPS-моніторингу для відстеження місцезнаходження причепа і маршруту.
- Інтеграція датчиків навантаження, які дозволяють точно контролювати масу вантажу, запобігаючи перевантаженням.
- Використання автоматичних систем зчеплення та розвантаження для підвищення продуктивності.

3. Поліпшення систем гальмування:

- Встановлення інерційних або електронних гальмівних систем підвищує безпеку транспортування.
- Нові моделі оснащуються ABS (антиблокувальною системою гальм), що знижує ризик аварій на мокрих або слизьких дорогах.
- **Тенденції ринку автомобілів для аграрної сфери**

Аналіз сучасного типу вантажних автомобілів в ЄС засвідчує наявність спеціальних модифікацій базових моделей для аграрної сфери. Як приклад, на рис. 3.3 представлено така модель, відмінними рисами якої є:

- повний привід;
- одинарні широко профільні шини з протектором для бездоріжжя.



Рис. 3.3. Приклад аграрного автопоїзда MAN з повним приводом тягача і одинарними широко профільними шинами [3].

РОЗДІЛ 4. ОХОРОНА ПРАЦІ

4.1 Законодавчі та інші нормативно-правових документах з питань охорони праці на автомобільному транспорті

4.3 Пожежна безпека.

Основними причинами загорянь на автотранспорті є:

- порушення герметизації комунікацій і загоряння пального та електромережі при контактуванні з поверхнями, що мають високі робочі температури (вихлопні колектори, глушники, опалювачі);
- займання палива в результаті потрапляння іскри, що виникла при ударі сталених деталей, при пошкодженні кузова автомобіля в момент аварії;
- займання палива від потрапляння іскри розряду статичної електрики;
- займання горючих конструктивних матеріалів і палива через несправності електрообладнання (коротке замикання, порушені контакти тощо);
- несправності в системах живлення чи запалювання автомобілів.

Електрообладнання автомобілів потрібно утримувати в технічно справному стані. Іскріння контактів, яке може призвести до загоряння, треба негайно усувати. Особливу увагу слід приділяти стану ізоляції електропроводів, справності приладів запалювання, освітлення й сигналізації.

За пожежну безпеку автомобіля відповідає водій автомобіля або працівник, який ним керує.

Автомобіль укомплектований вогнегасником.

Щоб запобігти пожежі, заборонено:

- курити в автомобілі;
- ремонтувати паливну систему, коли працює двигун, увімкнене запалювання;
- залишати у салоні автомобіля або на двигуні забруднені оливою чи паливом використані обтиральні матеріали;
- підігрівати двигун та інші агрегати відкритим вогнем, а також користуватися ним у безпосередній близькості від приладів системи живлення двигуна;
- курити і користуватися відкритим вогнем під час визначення наявності

палива у баку, а також під час заправлення автомобіля із додаткових ємностей;

- допускати, щоб на двигуні або його картері скупчувалися бруд, пальне, масло;
- користуватися відкритим вогнем під час перевірки рівня електроліту в акумуляторній батареї та усунення несправностей механізмів;
- зберігати і перевозити бензин та інші легкозаймісті рідини;

«прикурювати» свій або сторонній автомобіль;

- залишати відкритими горловини паливних баків;
- заряджати акумуляторну батарею у непристосованих для цього місцях;
- мити або протирати бензином деталі чи агрегати, а також руки й одяг;

зберігати в автомобілі паливо (бензин, дизельне паливо), за винятком палива в баку автомобіля.

Заправляти автомобіль паливом необхідно тоді, коли не працює двигун.

Заправляти автомобіль етилованим бензином потрібно з бензоколонки зі шлангом, забезпеченим роздавальним пістолетом. Заборонено заправляти автомобіль за допомогою відер, лійок тощо, а також відпускати бензин у пластикову тару (каністри). Заправник і працівник під час заправлення мають перебувати з навітряного боку автомобіля.

Якщо паливо потрапило на частини автомобіля, його необхідно витерти сухим ганчір'ям до пуску двигуна автомобіля.

У разі проливання палива на землю його необхідно засипати піском до пуску двигуна автомобіля.

Якщо сталося займання палива біля транспортного засобу, гасити його потрібно порошковим вогнегасником. Гасіння проводиться з плями проливу, послідовно переходьте знизу вгору на джерело виливання пального. Можна застосовувати, окрім порошкового, інші вогнегасники — наприклад, вуглекислотні, аерозольні.

4.4 Вимоги до комплектації автомобіля засобами пожежогасіння та складу аптечки для невідкладної медичної допомоги.

Постановою Кабінету Міністрів України від 10 жовтня 2001 р. № 1306 затверджено

вимоги оснащення вогнегасниками та медичними аптечками колісних транспортних засобів.

Вантажний автомобіль загального, спеціалізованого та спеціального призначення з повною масою:

не більше 3,5 т

один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом- витискувачем балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг

від 3,5 т, але не більше 12 т (ГАЗ 53, КАЗ 4540)

один порошковий (закачного типу ВП-5(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-5) із зарядом вогнегасної речовини не менше 5 кг

понад 12 т

один порошковий (закачного типу ВП-9(з)) або з газом-витискувачем у балоні ВП-9) із зарядом вогнегасної речовини не менше 9 кг

Причіп, напівпричіп з повною масою:

один порошковий (закачного типу ВП-3(з) або з газом-витискувачем у балоні ВП-3) із зарядом вогнегасної речовини не менше 3 кг

Також в салоні автомобілів згідно наказу МОЗ України від 07.07.1998р. № 187 повинна аптечка з двома обов'язковими наборами:

(так званий аварійний) – для зупинки кровотечі, – експлуатаційний – для застосування при травмах.

Аварійний комплект призначений для надання першої медичної допомоги потерпілим внаслідок ДТП виключно в разі значних травм та ушкоджень.

Аварійний комплект забороняється відкривати, якщо першу медичну допомогу можливо надати тільки засобами експлуатаційного комплекту.

Склад аварійного комплекту:

- 1 джгут для зупинки кровотечі;
- 1 еластичний бинт (5 м x 10 см);
- 2 бинта марлевих стерильних (5 м x 10 см);
- 1 бинт марлевий стерильний бинт (7 м x 14 см);
- 1 бинт марлевий нестерильний (5 м x 5 см);
- 1 бинт марлевий нестерильний (7 м x 14 см);

- серветки з хлоргексидином (знеболювальні для відкритих ран або їхні замітники, 6 см x 10 см), 2 смужки на гелієвій основі (з антимікробною дією полігексаметилен гуанідін гідрохлориду або замітники, 10 см x 50 см);
- 2 серветки з фурагіном (кровозупиняючі або його замітники, 6 см x 10 см);
- 6 серветок стерильних (6 см x 10 см);

1 пакет перев'язувальний стерильний.

- ножиці парамедичні (для розрізання бинтів, одягу, 19 см) – 1 шт.;
- блокнот із кульовою ручкою.

Експлуатаційний комплект призначений для надання першої медичної допомоги потерпілим внаслідок ДТП і в поточному режимі експлуатації транспортних засобів. Може комплектуватися водієм та є довільним (за винятком обов'язкових засобів). Він повинен зберігатися у відкритому поліетиленовому пакеті у футлярі аптечки поруч з аварійним комплектом.

Склад експлуатаційного комплекту:

- 1 косинка медична перев'язувальна з будь-якої тканини (50 см x 50 см);
- 1 гелієва пов'язка на випадок опіків.

Додаткові засоби

- 1 плівка (клапан) для проведення штучного вентилявання легень;
- рукавички медичні № 8 з поліетилену, комплект – 1 шт.;
- 1 термopростирадло (160 см x 210 см);
- 1 пінцет анатомічний;
- булавки англійські – 2 шт.

У склад експлуатаційного комплекту входять рукавички медичні та плівка-клапан для проведення штучного вентилявання легенів.

Також повині входити препарати, а саме:

- Розчин йоду 5%
- Антисептик
- мирамістин;
- хлоргексидин;
- препарати срібла;
- повідон-йод;

- етанол (70%);
- декаметоксин;
- перекис водню.
- Антибактеріальна мазь.
- Протиопікові засоби
- Засоби для пероральної регідратації
- Ентеросорбенти
- Нестероїдні протизапальні та жарознижувальні препарати.
- Антигістамінні препарати
- Судинозвужуючі препарати для носа
- Гліцеринові свічки.
- Препарати для серцево-судинної системи.
- Йод таблетований.
- Гормональні препарати.
- Протидіарейні препарати
- Седативні препарати

Загальними законами України, що визначають основні положення з охорони праці, є Конституція України, Кодекс законів про працю України та Закон України “ Про охорону праці”. Конституція України постає як основний, головний закон держави, який регулює найважливіші з погляду держави суспільні відносини. До яких належать засади суспільного ладу й політики, правового становища особи, державного устрою, організації та діяльності органів держави.

Керівництво підприємств розробляють і затверджують власні положення, інструкції або інші нормативні акти про охорону праці, що діють в межах підприємства.

Відповідно до Рекомендацій Держнаглядохоронпраці до основних нормативних актів підприємства належать:

Положення про систему управління охороною праці на підприємстві.

Положення про службу охорони праці підприємства.

Положення про комісію з питань охорони праці підприємства.

Положення про роботу уповноважених трудового колективу з питань охорони праці.

Положення про навчання, інструктаж і перевірку знань працівників з питань охорони праці.

Положення про організацію і проведення первинного та повторного інструктажів, а також пожежно-технічного мінімуму.

Наказ про порядок атестації робочих місць щодо їх відповідності нормативних актів про охорону праці.

Положення про організацію попереднього і періодичного медичних оглядів працівників.

Інструкції з охорони праці для працюючих за професіями і видами робіт.

Загальнооб'єктові та цехові інструкції про заходи пожежної безпеки.

Перелік робіт з підвищеною небезпекою.

Перелік посад посадових осіб підприємства, які зобов'язані проходити попередню і періодичну перевірку знань з охорони праці.

Наказ про порядок забезпечення працівників підприємства спецодягом, спецвзуттям та іншими засобами індивідуального захисту. Виходячи із специфіки виробництва та вимог чинного законодавства власник затверджує нормативні акти із вищезазначеного списку та інші, що регламентують питання охорони праці.

РОЗДІЛ 5. ЕКОНОМІЧНА ЧАСТИНА

В основу порівняльної економічної оцінки ефективності вищерозглянутих моделей автомобілів покладемо насамперед аналіз паливної економічності в умовах бездоріжжя як щодо лінійних витрат у л/100 км, так і щодо витрат пального на певний обсяг транспортної роботи у л/100 ткм, що дозволяє врахувати різну вантажність автомобілів.

Для легко зволоженого суглинку з показником твердості опорної поверхні $CI = 610$ КПа за результатами вищенаведеного комп'ютерного імітаційного моделювання:

ГАЗ 53-12 - 36,5 л/100 км/ лінійна норма - 25 л/100км (бензин А92 – орієнт. ціна 54 грн/л) (5.1)

КАЗ 4540 - 32,3 л/100 км/ лінійна норма - 25 л/100км[(дизпаливо – орієнт. ціна 51 грн/л) (5.2)

КрАЗ 5233 - 41 л/100 км / лінійна норма - 35 л/100км (дизпаливо) (5.3)

(Лінійні норми витрати наведені згідно даних заводів – виробників [6-8] і фактично є контрольними нормами витрати, що відповідають усталеному руху на асфальтобетоні І категорії в зоні найбільш економічних швидкостей 40-60 км/год). Звичайно, якщо приймати за основу визначені вище експлуатаційні витрати палива, то очевидна перевага КАЗ 4540, що у порівнянні з бензиновим ГАЗ 53 має вигравш у витраті палива на 100 км пройденого шляху 4,2 л пального, а щодо КрАЗ 5233 – ще більше – 8,7 л. Тобто для орієнтовних 300 км (20 рейсів внутрішніх, або, умовно 2 рейсів безпосередньо на цукрозавод, щоправда тут уже домінувати частка доріг з твердим покриттям, де витрати змінюються) це складе:

для ГАЗ 53 – $12,6 \text{ л} \times 54 = 680,4 \text{ грн}$

для КрАЗ 5233 – $26,1 \text{ л} \times 52 = 1357,2 \text{ грн}$

Однак дана оцінка не є коректною з уваги на різні обсяги перевезення вантажу – очевидно, що цей же об'єм у даному випадку цукрових буряків при використанні КрАЗ 5233 і вантажності 7-8 т буде перевезено при практично вдвічі меншій кількості рейсів у порівнянні з ГАЗ 53 з вантажністю 3,5-4 т (і швидше з-за відчутного вигравшу у швидкості руху зволеним чи мокрим полем). Відповідно

слід порівняльний аналіз витрат на паливо проводити з прив'язкою до обсягів виконаної транспортної роботи у тонно-кілометрах. Витрати палива відносно 100 ткм визначаються у цьому діленням вищезазначених шляхових витрат (5.1) – (5.3) на масу вантажу, що перевозиться конкретною моделлю автомобіля:

$$\text{ГАЗ 53} - 36,5/4 = 9,1 \text{ л/100 т км} \quad (5.4)$$

$$\text{КАЗ 5340} - 32,3/6 = 5,4 \text{ л/100 т км} \quad (5.5)$$

$$\text{КрАЗ 5233} - 41/8 = 5,1 \text{ л/100 т км} \quad (5.6)$$

В цьому плані очевидна ефективність дизельних вантажівок, що майже вдвічі зменшують витрати на паливо як за рахунок більш економічних двигунів, так і, насамперед, за рахунок більшої вантажності. Окрім цього автомобілі КАЗ і КрАЗ передбачено комплектувати причепами вантажністю відповідно 4 та 6 т, що при відповідному збільшенні витрати палива в складі автопоїзда на 25-30% питома витрата в л/100 т км ще зменшиться (ГАЗ 53 теоретично теж може використовувати причеп вантажністю 2-3 т, однак тягові характеристики обмежені відсутністю повного приводу та відповідним обмеженням необхідного запасу сили зчеплення коліс з ОП, особливо на зволжених та мокрих ґрунтах, що є характерними для осені).

Практично це дозволяє констатувати, що для потужних господарств з значними обсягами внутрішніх перевезень з умов зменшення експлуатаційних витрат і скорочення часу на перевезення вигідно переходити на спеціалізовану повнопривідну авто техніку великого тоннажу. Це підтверджується і наявними в ЄС спеціалізованими модифікаціями для аграрного сектора (зокрема Daimler [2] і MAN [3]) вагової категорії N3 – типу КрАЗ, що власне і забезпечує найменші питомі затрати, що віднесені до загального обсягу транспортних робіт у т км. Звично, що найбільш ефективним у цьому плані є автопоїзд, а на великих полях – у формі сідлового автопоїзда.

Малі і приватні присадибні господарства виходячи з аналізу ситуації в країнах ЄС орієнтуються на малотоннажні повнопривідні автомобілі категорій N1 – N2, а також універсальні машини типу Unimog / Автотрак з причепами з відповідним максимальним використанням впродовж сезону – і на транспортних роботах і для механообробітку угідь.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Елисеев В.Г. и др. Использование транспорта в сельском хозяйстве / В.Г. Елисеев, В.Д. Лабодаев, Н.А. Черноморец // Минск, Ураджай, 1984. – 151 с.
2. Agrartechник / [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://special.mercedes-benz-trucks.com/de/special-trucks/agrarindustrie.html>
3. MAN – Agrar- und Forst- LKW / [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.man.eu/at/de/lkw/lkw-fuer-branchen/agrar-und-forst-lkw/agrar-forst-lkw.html>
4. Медведєв В.В. Екологізація в конструюванні та експлуатації землеробських машинно-тракторних агрегатів / Вісник аграрної науки, № 10, 2012. – С.39-45
5. Ребров О.Ю. Розподіл допустимого тиску на ґрунт ходових систем колісних тракторів за територією України / Вісник НТУ «ХПІ». Серія «Математичне моделювання в техніці та технологіях», № 27, 2018. Харків – С.110-116
6. ГАЗ – 53/ [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://uk.wikipedia.org/wiki/ГАЗ-53>
7. КАЗ 4540 [Электронный ресурс] Режим доступа: <http://nash-transport.com/truck/kaz-4540/>
8. КрАЗ 5233 [Электронный ресурс] Режим доступа: <https://www.autokraz.com.ua/downloads/catalogue.pdf>
9. Кошарний М.Ф. Основи механіки та енергетики автомобіля / Київ: Вища школа, 1992. – 200 с.
10. Агейкин Я.С. Вездеходные колесные и комбинированные движители/Москва, Машиностроение, 1972. – 184 с.
11. Ларин В.В. Теория движения полноприводных колесных машин/ Москва. Изд. МГТУ им. Баумана, 2010. – 391с.
12. Беккер М.Г. Введение в теорию систем местность-машина. Пер. с англ. /Под. Ред. В.В. Гуськова // Москва. Машиностроение, 1979. – 520 с.
13. Вонг Дж. Теория наземных транспортных средств// Москва. Машиностроение, 1982. – 284с
14. Wong Y.J. Theory of ground vehicle /Mc-GrawHill Booh Comp., London – NewYork, 1993. – 423 p.

15. Gianpiero Mastinu, Manfred Ploechl Road and off-road Vehicles System dynamics Handbook // CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. XIV, 1662 p.
16. Грубель М.Г., Крайник Л.В. Прокідність військових автомобілів. Монографія. Київ, Вид. дім „Професіонал”, 2023. – 184 с.
17. Худавердян, Г., Хома, В., Крайник, Л. (2023). Імітаційне моделювання руху полем повнопривідної колісної техніки у програмному середовищі MATLAB Simulink. Вісник Львівського національного університету природокористування. Серія Агроінженерні дослідження, (26), - С. 164–170.
18. ISO 22476-1:2012 Geotechnical investigation and testing. - Field testing. – Part 1: Electrical cone and piezocone test. – 28pp.
19. Wismer R.D., Lunz H.J. Off-road traction prediction for wheeled vehicles/ Transaction ASAE 17(1), 1973, 8-10, - 14 p.
20. Freitag D.R. A dimensional analysis of the performance of the pneumatic tires on clay/ Journal of terramechanics, 3(3), 1966, - P.51-68.
21. Rowland, D., Peel, J. W. 1975. Soft ground performance prediction and assessment for wheeled and tracked vehicles. Institute of mechanical engineering, 1955, 205, P.81-92
22. Freitag D.R. A proposed strength classification test for fine-grained soils/ Journal of terramechanics, 24(1), 1987, - P. 25-39.
23. Turnage G.W. Using dimensionless prediction terms to describe off-road wheel vehicle performance// ASAE Paper №72-634., 1972, – 21 p.
24. Abebe A., Tanaka T., Yamazaki M. Soil compaction by multiple passes of a rigid wheel relevant for optimization of traffic/ Journal of Terramechanics, 1989, Vol.26, 1992, №2, - P.139-148.
25. Saarlahti M. Soil interaction model/ University of Helsinki: Department of Resource Management. Rep. Nr. QLK5 – 1999 – 0099. – 2002. 86 p.
26. Lutz J. Mobility of ground vehicles. US military view a overview primer and reference source guide/ Quent systems Inc., June 2003. – 101 p]
27. Schmid I.C. Interaction of vehicle and terrain results from 10 years research at IKK/ Journal of Terramechanics, vol.32, №1, 1995, P.3-26.]

28. Reece A.R. Theory and of off the road locomotion/ Procediryng of the institution of agricultural Engineers. – 1964, Vol.20, № 2. - P.16-19.

29. Hochgeländegängiger Unimog - Mercedes-Benz Trucks - Trucks you can trust.

URL: https://www.mercedes-benz-trucks.com/de_DE/models/unimog-off-road.html

30. Praga UV 80 – Wikipedie. URL:https://cs.wikipedia.org/wiki/Praga_UV_80

31. Ипатов А.А., Дзоценидзе Т.Д. Создание новых средств развития транспортной инфраструктуры. Проблемы и решения. – Москва: Металлургиздат, 2008.– 272 с.

32. Дорошенко Л.В. Обґрунтування доцільності спільного використання техніки у фермерських господарствах / Л.В. Дорошенко, С.В. Нікітін, А.М.Яковенко // Аграрний вісник Причорномор'я: Зб. наук, праць. – Одеса, 2002. - №19. С.39-48.

33. Погорілий С.П. Експериментальне дослідження тягових показників МЕЗ-330 „Автотрактор” залежно від їхніх конструктивних параметрів / Вісник ЛНАУ серія „Агроінженерія”, № 17, Львів, 2018.- С. 41-48.

34. ДСТУ 12.1.004-01. ССБТ. Пожежна безпека. Загальні вимоги.

Київ.Видавництво стандартів, 2002.

35. Постанова КМУ від 10 жовтня 2001 р. № 1306

36. Постанова КМУ від 8 жовтня 1997 р. № 1128

37. Наказ МОЗ України від 07.07.1998 р. № 187 «Про затвердження переліків лікарських засобів у медичних аптечках транспортних засобів»

38. Лехман С.Д., Целинський В.П., Козирєв С.М. Довідник з охорони праці в сільському господарстві: Запитання і відповіді. Київ: Урожай, 1998. 400с.

39. Лехман С. Д., Рубльов В. І., Рябцев Б. І. Запобігання аварійності і травматизму у сільському господарстві. Київ: Урожай, 2008. 267с.