

УДК 629.4.027

С. О. Семенов

(старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті», Східноукраїнський національний університет імені Володимира Даля, м. Сєвєродонецьк)

**ПРО МОЖЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ ТЕОРІЇ ПОДІБНОСТІ
ПРИ МОДЕЛЮВАННІ ОПОРУ РУХУ РЕЙКОВОГО
ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ**

У статті розглядається можливість застосування теорії подібності при проведенні експериментальних досліджень опору руху модельного рейкового транспортного засобу. Для фізичного моделювання системи і дослідження процесів в контакті «гребінь колеса – бічна поверхня рейки» використовувався метод аналізу розмірностей з певними обмеженнями. Визначено критерії подібності класичним способом, заснованим на π -теоремі. На етапі моделювання подібності механічної системи враховані обмеження, що визначають динаміку механічної системи.

Результати досліджень дають можливість одержати достовірні дані під час проведення стендових випробувань з подальшою обробкою та інтерпретацією отриманих даних моделі в натуру.

Ключові слова: визначник, коефіцієнт переходу, критерії розмірності, опір руху, теорія подібностей.

В статье рассматривается возможности применения теории подобия при проведении экспериментальных исследований сопротивления движению модельного рельсового транспортного средства. Для физического моделирования системы и исследования процессов в контакте «гребень колеса – боковая поверхность рельса» использовался метод анализа размерностей с определенными ограничениями.

Вычислены критерии подобия классическим способом, основанным на π -теореме. На этапе моделирования подобия механической системы учтены ограничения, определяющие динамику механической системы. Результаты исследований дают возможности получить достоверные данные при проведении стендовых испытаний с последующей обработкой и интерпретацией полученных данных модели в натуру.

Ключевые слова: определитель, коэффициент перехода, критерии размерности, сопротивление движению, теория подобия.

Постановка проблеми. Низка проведених досліджень [1-6] довели переваги використання колеса перспективної конструктивної схеми [3, 7, 8], тому подальша перевірка цього конструктивного рішення здійснювалась із застосуванням чисельних методів і засобів фізико-математичного моделювання.

Відомо, що в більшості випадків використання методів фізичного моделювання при рішенні задач динаміки пов'язане з серйозними труднощами, що виникають під час випробувань вузлів і агрегатів різних конструкцій [5-8].

© Семенов С. О., 2016

Отримання більшої інформації про особливості випробуваного зразка з допомогою випробувань зазвичай стає можливим лише на заключному етапі розробки об'єкта, коли внесення змін у конструкцію вже практично неможливе. Перевагою модельних випробувань є можливість оперативно оцінювати властивості майбутньої конструкції безпосередньо в процесі проектування і дозволяє вносити необхідні поправки в початковій стадії проектних робіт.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Дослідження особливостей руху стенового екіпажа відбувалося за допомогою експериментально-лабораторних методів, основою яких є використання теорії фізичної подібності та моделювання [2-7, 9-15]. Для вирішення завдань комплексних досліджень ходових частин рейкових екіпажів і оптимізації їх параметрів на базі методів фізичної подібності та моделювання [8, 11-13], створюються спеціальні методики і стенди для їх реалізації, що імітують умови, близькі до реальних умов експлуатації.

Мета статті – дослідити можливості використання теорії подібності для моделювання опору руху рейкового транспортного засобу.

Виклад основного матеріалу дослідження. Подальше вивчення ефективності застосування перспективної конструктивної схеми колеса здійснювалося із застосуванням чисельних методів і методів фізичного і математичного моделювання. У роботах [2-7, 9-15] було відмічено, що основною теоретичною базою для дослідження особливостей руху модельного екіпажа є експериментально-лабораторні методи, базисом яких служить використання теорії фізичної подібності та моделювання, для чого створюються спеціальні методики і стенди для їх реалізації, що імітують умови, близькі до реальних умов експлуатації [9-15].

У більшості випадків використання методів фізичного моделювання під час вирішення завдань динаміки визначене серйозними труднощами, що виникають при організації натурних випробувань вузлів і агрегатів різних конструкцій [7]. Отримання великої інформації про особливості випробуваного зразка за допомогою випробувань зазвичай стає можливим лише на завершальному етапі розробки об'єкта, коли внесення змін до конструкції вже практично неможливе. Для ефективного використання цих методів, як свідчить аналіз літератури по теорії подібності [4, 6-11], треба визначити низку умов, виконання яких забезпечить успішність процесу моделювання, насамперед – визначити масштабні коефіцієнти переходів від моделі до натури.

У нашому випадку заздалегідь приймаємо такі положення:

– відношення лінійних розмірів об'єкта і моделі дорівнює геометричному масштабу подібності $K_L = \frac{l_o}{l_m} = 5$;

– відношення сил (зокрема осьового навантаження), що діють на об'єкт і модель дорівнює масштабу подібності сили, тобто $K_{P_o} = \frac{P_{o-o}}{P_{o-m}} = 25$;

– процес взаємодії контактуючих поверхонь повинен реалізовуватися в реальному масштабі часу, тобто $K_t = 1$.

Для фізичного моделювання системи і дослідження процесів в контакті «гребінь колеса – бічна поверхня рейки» використовуємо метод аналізу розмірностей з обмеженнями [6, 16], за допомогою якого можна знаходити єдині значення масштабних коефіцієнтів переходу від моделі до натури для кожного з параметрів.

У процесі рішення поставленої задачі також треба врахувати низку зауважень, сформульованих в наукових працях з застосування теорії подібності [9, 14, 15, 18]. Наприклад, те, що при визначенні кількості чинників (вхідні величини), що діють на модель і впливають на кінцевий результат (вихідні величини), слід керуватися раціональною

кількістю даних, що впливають на кінцеве рішення, оскільки збільшення кількості інформації щодо об'єкта приводить до ускладнення моделі і стає скрутним отримати нову інформацію про об'єкт, тобто модель знецінюється. Моделювання ефективне лише поблизу діапазону, де достовірність отриманих результатів максимальна. Отже, само істота методу моделювання неминуче пов'язана із спрощенням моделі в порівнянні з об'єктом.

Побудова фізичної моделі рейкового екіпажа здійснювалася для вивчення впливаючих чинників на процес дії сили опору руху екіпажа. Результати експериментальних досліджень поведінки контактуючої пари колесо-рейка [18, 19] доводять, що сила опору руху є функцією, залежною від певних параметрів, пов'язаних з режимом роботи і середовищем, в якому працює ця пара. На основі переліку елементів, приведених в [7, 20] для вирішення нетеплових завдань про динамічне навантаження пружного тіла, треба виділити основні параметри, що впливають на опір руху коліс транспортних засобів. З урахуванням результатів робіт [7, 9, 11, 12, 15], була виведена функціональна залежність, яка виглядає таким чином:

$$F_{\text{сопр}} = f(P_o, v, m, F_{\text{тр}}, F_{\text{поп}}, l, t, c) \quad (1)$$

де P_o – осьове навантаження, Н;

v – швидкість руху рейкового екіпажа, м/с;

m – маса, кг;

$F_{\text{тр}}$ – сила тертя, Н;

$F_{\text{поп}}$ – поперечна сила, Н;

l – переміщення, м;

t – час руху, с;

c – лінійна жорсткість зв'язків, Н/м.

Розмірності параметрів, задіяних в даній системі, подані в табл. 1.

Визначимо критерії подібності класичним способом, заснованим на π -теоремі [9, 17]. На етапі моделювання подібності механічної системи треба врахувати обмеження, що визначають динаміку механічної системи.

У системі основних одиниць [М], [L], [Т] (маса, довжина і час) приймемо як первинні величини базисні параметри l , P_o , t .

Таблиця 1. Перелік параметрів, що входять в залежність (1) по системі [М] [L] [Т] (М – розмірності маси, L розмірності довжини, Т – розмірності часу)

№ з/п	Параметр	Розмірність в системі			
		СІ	М	L	T
1	P_o , осьове навантаження	Н	1	1	-2
2	v , швидкість руху рейкового екіпажа	м/с	0	1	-1
3	m , маса	кг	1	0	0
4	$F_{\text{тр}}$, сила тертя	Н	1	1	-2
5	$F_{\text{поп}}$, поперечна сила	Н	1	1	-2
6	l , переміщення	м	0	1	0
7	t , час руху	с	0	0	1
8	c , жорсткість лінійних зв'язків	Н/м	1	-1	-2

$$\begin{aligned}\ln l &= 0 \cdot \ln M + \ln L + 0 \cdot \ln T \\ \ln P_O &= \ln M + \ln L - 2 \cdot \ln T \\ \ln t &= 0 \cdot \ln M + 0 \cdot \ln L + \ln T\end{aligned}\quad (2)$$

Перевіримо незалежність вибраних основних одиниць, для чого розрахуємо такий основний визначник

$$D_0 = \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \neq 0 \quad (3)$$

Оскільки умова (3) відмінна від 0, отже незалежність величин l , P_O , t підтверджується.

Виведемо критерії подібності небазисних параметрів в матричному вигляді, після чого здійснимо перевірку результату.

Для параметра v :

$$\begin{aligned}D_{v1} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = -1 \\ \alpha_{v1} &= \frac{D_{v1}}{D_0} = \frac{-1}{-1} = 1\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{v2} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 \end{vmatrix} = 0 \\ \alpha_{v2} &= \frac{D_{v2}}{D_0} = \frac{0}{-1} = 0\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}D_{v3} &= \begin{vmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -1 \end{vmatrix} = 1 \\ \alpha_{v3} &= \frac{D_{v3}}{D_0} = \frac{1}{-1} = -1\end{aligned}$$

де α_{v1} α_{v2} – відношення визначника для параметра швидкості і основного визначника в системах одиниць маси, довжини і часу.

Критерій подібності для параметра швидкості (v):

$$\pi_v = \frac{v}{l^{\alpha_{v1}} \cdot P_O^{\alpha_{v2}} \cdot t^{\alpha_{v3}}} = idem$$

або

$$\pi_v = \frac{v}{l^1 \cdot P_O^0 \cdot t^{-1}} = 1,$$

тоді

$$\pi_v = \frac{v \cdot t}{l} = idem.$$

$$\text{Перевірка: } \pi_v = \frac{L^1 T^1}{L^1 T^1} = 1.$$

Аналогічним чином зв'язується з базисними решта всіх параметрів, прийнятих для моделювання при визначенні сили опору руху.

Результати розрахунку зведені в табл. 2.

Рівняння подібності, що об'єднало отримані критерії, складається з 5 критеріїв, оскільки, згідно з теоремою Бекінгема, має дорівнювати числу параметрів за вираженням трьох базисних.

Після перетворень залежність (1) прийме вигляд

$$F_{сопp} = f \left(\frac{vt}{l}, \frac{m}{l P_o t^2}, \frac{F_{mp}}{P_o}, \frac{F_{non}}{P_o}, \frac{cl}{P_o} \right) \quad (4)$$

Отримані критерії подібності, які складають критеріальне рівняння (4), вимагають перевірки.

Таблиця 2. Результати розрахунку для моделі сили опору

№ з/п	Параметр	СІ	Критерій подібності	Формула перерахунку з оригіналу на модель
1	P_o , осьове навантаження від колеса на рейку	Н	Базисний параметр	$P_M = \frac{P_o}{K_p}$
2	V , швидкість руху рейкового екіпажа	м/с	$\pi_v = \frac{vt}{l}$	$v_M = \frac{v_o}{K_v}$
3	m , маса	кг	$\pi_m = \frac{ml}{P_o t^2}$	$m_M = \frac{m_o}{K_m}$
4	F_{mp} , сила, тертя	Н	$\pi_{F_{mp}} = \frac{F_{mp}}{P_o}$	$F_{mp_M} = \frac{F_{mp_o}}{K_{F_{mp}}}$
5	F_{non} , поперечна сила	Н	$\pi_{F_{non}} = \frac{F_{non}}{P_o}$	$F_{non_M} = \frac{F_{non_o}}{K_{F_{non}}}$
6	L , переміщення	м	Базисний параметр	$L_M = \frac{L_o}{K_L}$
7	t , час руху	з	Базисний параметр	$t_M = t_o$
8	c , жорсткість лінійних зв'язків	Н/м	$\pi_c = \frac{cl}{P_o}$	$C_M = \frac{C_o}{K_c}$

Приведемо незалежні критерії подібності (див. табл. 2) до індикаторів подібності (K_i), рівним одиниці для подібних систем. Наприклад, для параметра швидкості:

$$\pi_v = \frac{vt}{l} = 1 \equiv \frac{K_v \cdot K_t}{K_l} = 1 \Rightarrow K_v \cdot K_t = K_l \quad (5)$$

Аналогічно виразу (5) обчислимо в загальному вигляді решту параметрів:

$$K_m = K_p \cdot K_v^2 \cdot K_L; \quad K_{F_{TP}} = K_p; \quad K_{F_{нон}} = K_p; \quad K_L \cdot K_c = K_p \quad (6)$$

З отриманої рівності визначені масштаби моделювання, остаточно:

$$K_1 = K_p = 25; \quad K_2 = K_v = 5; \quad K_3 = K_m = 125; \quad K_4 = K_{F_{TP}} = 25; \quad (7)$$

$$K_5 = K_{F_{нон}} = 25; \quad K_6 = K_L = 5; \quad K_7 = K_t = 1; \quad K_8 = K_c = 5.$$

Таким чином, на підставі залежностей (7) можна здійснити перехід за всіма показниками і параметрами від величин, отриманих при моделюванні, до величин оригіналу.

Висновки. За допомогою використання методів теорії подібності розглянуто вплив факторів, що впливають на процес дії сили опору руху на візок екіпажа. Виконані розрахунки дозволяють визначити масштабні коефіцієнти переходу від об'єкта дослідження до модельного експерименту, виконати стендові випробування та перенести результати випробувань на об'єкт дослідження. Результати досліджень дають можливість отримати достовірні дані при проведенні стендових випробувань з подальшою обробкою та інтерпретацією отриманих даних моделі в натуру.

ЛІТЕРАТУРА

1. *Mikhailov E.* The possibility of reducing kinematic slip with two-point contacting with rail wheel railway vehicle./ Mikhailov E., Semenov S., Panchenko E.// TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Vol. 13, No. 1, Poland 2013. – pp. 108 – 112.
2. *Fomin, A. V.* The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building [Text]/ A. V. Fomin// East European journal of advanced technologies. – Kharkiv. – № 3/7(57), 2012. – 32-35 p. – access Mode: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf).
3. *Михайлов Е.В.* Математическое моделирование движения колесной пары с подвижными гребнями / Е.В. Михайлов, А.Г. Рейдемейстер, С.А. Семенов, К.В. Макаров // Вісник СХУ ім. В. Даля. – 2014. – № 3 (210). – С.181-186.
4. Пат. 87418 Україна, МПК2013 В60 В17/00. Колесо рейкового транспортного засобу / Михайлов С.В., Слащов В.А., Горбунов М.І., Мокроусов С.Д., Щербаков В.П., Коршко М.М., Семенов С.О., Солодовнік М.Д.; заявник та патентовласник Східноукр. нац. у-нт ім. В. Даля. – № u201309109; заявл. 19.07.2013; опубл. 10.02.2014, бюл. №3. – 7 с.
5. *Фомін О.В.* Теоретичні основи програмного комплексу визначення та використання математичних моделей складових вантажних вагонів / О.В. Фомін // Науковий журнал «Вісник Кременчуцького національного університету імені Михайла Остроградського». – Кременчук: КДПУ, 2013. – Вип. 6(83). – С. 87-91.
6. *Фомін О.В.* Концепція ідеальних кузовів напіввагонів / О.В. Фомін // Вісник Східноукраїнського національного університету імені Володимира Даля: Науковий журнал. – Луганськ: СХУ ім. В. Даля, 2013. – № 4(193). – С. 267–271.
7. *Шаповалов Л.А.* Моделирование в задачах механики элементов конструкций [Текст] / Л.А. Шаповалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
8. *Фомін О.В.* Підвищення ступеня ідеальності вантажних вагонів та прогнозування стадій їх еволюції / О.В. Фомін // Науковий вісник Національного гірничого університету. – Дніпропетровськ: НГУ, 2015. – №3. – С.68-76
9. *Александров А.А.* Повышение ресурса колесных пар грузовых вагонов и рельсов путем улучшения условий их взаимодействия и динамического мониторинга: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Александров Александр Александрович; РГУПС. – Ростов-на-Дону, 2011. – 214 с.

10. Бердинских В.А. Статическое моделирование процессов фрикционно-контактного взаимодействия при внешнем трении / Бердинских В.А., Запорожец В.В. / Надежность и долговечность машин и сооружений. – 1984. – № 5. – С. 80 – 84.
11. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. – М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.
12. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. – Ереван: Изд-во АН Арм. ССР, 1965. – 218 с.
13. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. – М.: Наука, 1967. – 438 с.
14. Bockmann G., Schulz W. Modellierung des Tropfenschlagverschleises in der instationären Phase // Schmierungstechnik, 1984. Jg. 15. – № 8. – S. 246 – 250.
15. Lorenz A. Modellbetrachtungen zum Schadensprozess in Maschinen und Geraten // Schmierungstechnik, 1984. Jg. 15. – № 8. – S. 250 – 253.
16. Браун Э.Д. Модели трения и изнашивания в машинах/ Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. – М.: Машиностроение, 1982.
17. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели [Текст] / Кутателадзе С.С. – Новосибирск: Наука, 1982. – 304 с.
18. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом.—Луганск: ВУГУ, 1999.—476 с.
19. Ткаченко В.П. Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей.— Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996.— 200 с.
20. Горбунов Н.И. Повышение тяговых качеств тепловозов за счет совершенствования упругих связей тележек: дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / Горбунов Николай Иванович; ЛМИ. – Ворошиловград: – 1987. – 269 с.

Stanislav Semenov

(Senior Lecturer of Chair «Logistics management and traffic safety in transport», East-Ukrainian national University named after Volodymyr Dahl)

ON THE POSSIBLE USE OF SIMILARITY THEORY IN MODELING RESISTANCE TO MOVEMENT OF RAIL VEHICLES

The article discusses application possibilities of similarity theory in the conduct of experimental studies of resistance the model a rail vehicle. For physical modeling of systems and processes in the contact «wheel flange – side surface of the rail» was used the method of dimensional analysis with certain restrictions. By using this method found a single scale factor values for the transition from model to nature for each of parameters.

Criterion similarity is defined in the classical way, based on the π – theorem. At the stage of modeling the similarity of mechanical system must take account the constraints that determine the dynamics of the mechanical system. Thus, on the basis dependencies of the transition for all indicators and parameters from the values obtained in the simulation, the values of original.

The calculations allow us to determine scales factors of transition from object studies to model the experiment, perform bench tests and transfer the test results to objects of study. The results of studies allow to obtain reliable data when conducting bench tests with the subsequent processing and interpretation of the obtained data model in nature.

Keywords: determinant, the transition rate, criteria of dimension, resistance to movement, the theory of similarity.

REFERENCES

1. Mikhailov E. The possibility of reducing kinematic slip with two-point contacting with rail wheel railway vehicle/ Mikhailov E., Semenov S., Panchenko E.// TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Vol. 13, No. 1, Poland 2013. – pp. 108 – 112.

2. Fomin, A. V. The determination of the perspective directions of designing of bearing systems in cargo wagon building [Text] / A. V. Fomin // East European journal of advanced technologies. – Kharkiv. – № 3/7(57), 2012. – 32-35 p. – access Mode: [http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3\(7\)_9.pdf](http://nbuv.gov.ua/j-pdf/Vejpte_2012_3(7)_9.pdf)
3. Mikhajlov E.V., Rejdemejster A.G., Semenov S.A., Makarov K.V. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya kolesnoj pary s podvizhnymi grebnymi [Mathematical modeling of the movement of the pair of wheels with movable combs] // *Visnik SNU im.V.Dalya* [Bulletin of SNU named after V. Dahl]. – 2014. – № 3 (210). – pp.181-186.
4. Mikhajlov E.V., Slashhov V.A., Gorbunov M.I., Mokrousov S.D., Sherbakov V.P., Korshko M.M., Semenov S.O., Solodovnik M.D. *Koleso rejkovogo transportnogo zasobu* [The wheel of the rail vehicle] Patent UA, no. u201309109, 2013.
5. Fomin O.V. Teoretychni osnovy prohramnoho kompleksu vyznachennya ta vykorystannya matematychnykh modeley skladovykh vantazhnykh vahoniv / O.V. Fomin // Naukovy zhurnal «Visnyk Kremenchutskoho natsionalnoho universytetu imeni Mykhayla Ostrohradskoho». – Kremenchuk: KDPU, 2013. – Vyp. 6(83). – S. 87-91.
6. Fomin O.V. Konceptiya ideal'nykh kuzoviv napivvagoniv [The concept of ideal bodies gondola] [Text] / O.V. Fomin // Journal of East Ukrainian National University named after Vladimir Dal, a scientific journal. – Lugansk: EUNU. Dal, 2013. – № 4 (193). – S. 267-271.
7. Shapovalov L.A. *Modelirovanie v zadachakh mekhaniki ehlementov konstruksij* [Modeling in mechanics of structural elements]. Moscow: Mashinostroenie publ, 1990. – 288 p.
8. Fomin O.V. Pidvishchennja stupenja ideal'nosti vantazhnykh vagoniv ta prognozuvannya stadij ih evolucii [Increased ideal freight cars and forecasting stages of their evolution] [Text] / O.V Fomin // Scientific Bulletin of National Mining University. – Dnepropetrovsk: NSU, 2015. – №3. – P. 68-76 – Access: <http://nvngu.in.ua/index.php/uk/golovna/1049-ukrcat/arkhiv-zhurnalu/2015/zmist-3-2015/geotekhnichna-i-girnichna-mekhanika-mashinobuduvannya/2975-pidvishchennya-stupenya-idealnosti-vantazhnykh-vagoniv-ta-prognozuvannya-stadij-jikh-evolyutsiji>.
9. Aleksandrov A.A. *Povyshenie resursa kolesnykh par gruzovykh vagonov i rel'sov putem uluchsheniya uslovij ih vzaimodejstviya i dinamicheskogo monitoringa*. Kand.Diss. [Increase of a resource wheel pairs freight wagons and rails by improving their interaction and dynamic monitoring]. Rostov-na-Donu, 2011, 214 p.
10. Berdinskikh V.A., Zaporozhets V.V. Staticheskoe modelirovanie protsessov friktsionno-kontaktного vzaimodejstviya pri vneshnem trenii [Static modeling of frictional-contact interaction with an external friction] // *Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzhenij* [The reliability and durability of machines and structures]. – 1984. № 5. pp. 80 – 84.
11. Gukhman A.A. *Vvedenie v teoriyu podobiya* [Introduction to the theory of similarity]. Moscow: Vysshaya shkola publ, 1963. – 254 p.
12. Nazarov A.G. *O mekhanicheskom podobii tverdykh deformiruemyykh tel* [On the mechanical similarity of solid deformable bodies]. Erevan: Publ AN Arm. SSR, 1965. – 218 p.
13. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernostej v mehanike* [Methods of similarity and dimensions in mechanics]. Moscow: Nauka publ, 1967. – 438 p.
14. Bockmenn G., Schulz W. Modellierung des Tropfenschlagverschleises in der instationaren Phase // *Schmierungstechnik*. 1984. Jg. 15. – № 8. – S. 246 – 250.
15. Lorenz A. Modellbetrachtungen zum Schadigungsprozess in Maschinen und Geraten // *Schmierungstechnik*. 1984. Jg. 15. № 8. – S. 250 – 253.
16. Braun E.D., Evdokimov YU.A., Chichinadze A.V. *Modeli treniya i iznashivaniya v mashinakh* [Models of friction and wear in machines]. Moscow: Mashinostroenie Publ, 1982, 231 p.
17. Kutateladze S.S. *Analiz podobiya i fizicheskie modeli* [Analysis of similarity and physical models]. Novosibirsk: Nauka publ, 1982. – 304 p.
18. Golubenko A.L. *Stseplenie kolesa s rel'som* [The adhesion of wheel and rail]. Lugansk: VUGU Publ., 1999. – 476 p.
19. Tkachenko V.P. *Kinematicheskoe soprotivlenie dvizheniyu rel'sovykh ehkipazhej* [Kinematic resistance to movement of rail crews]. Lugansk: VUGU Publ., 1996. – 200 p.
20. Gorbunov N.I. *Povyshenie tjagovykh kachestv teplovozov za schet sovershenstvovaniya uprugih svjazej telezhek* Kand.Diss. [Improving the traction qualities of the locomotive by improving elastic ties trucks]. – Voroshilovgrad, 1987. – 269 p.