

УДК 629.4.027

ПРИМЕНЕНИЕ ТЕОРИИ ПОДОБИЯ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ ДВИЖЕНИЮ РЕЛЬСОВОГО ЭКИПАЖА**Семенов С.А., Михайлов Е.В.****APPLICATION OF THE SIMILARITY THEORY FOR MODELING THE MOTION RESISTANCE OF THE RAIL VEHICLE****Semenov S., Mikhailov E.**

В статье рассматривается использование теории подобия для анализа силы сопротивления при движении тележки рельсового экипажа в модельном эксперименте. На основе анализа исследований по моделированию и применению теории подобия выделены ряд параметров, влияющих на функциональную зависимость сопротивления движению колес транспортных средств. На основании теоремы классическим способом определены критерии подобия с учетом ограничений, определяющих динамику системы, методом анализа размерностей. Результаты исследований дают основания получить достоверные данные при проведении стендовых испытаний.

Ключевые слова: критерии, масштаб, размерность, параметр, сопротивление движению, теория подобия.

Постановка проблемы. Итоги результатов проведенных исследований [1, 2] показали ряд преимуществ использования колеса перспективной конструктивной схемы [3]. Дальнейшая проверка нового конструктивного решения осуществлялась с применением численных методов и методов физико-математического моделирования

В большинстве случаев использование методов физического моделирования при решении задач динамики связано с серьезными трудностями, возникающими при испытаниях узлов и агрегатов различных конструкций [4]. Получение обширной информации об особенностях испытуемого образца с помощью испытаний обычно становится возможным лишь на заключительном этапе разработки объекта, когда внесение изменений в конструкцию уже практически невозможно. В то же время проведение модельных испытаний позволяет оперативно оценивать свойства будущей конструкции непосредственно в процессе проектирования и позволяет вносить необходимые поправки в начальной стадии проектных работ.

Анализ последних исследований и публикаций. Основной теоретической базой для исследова-

ния особенностей движения стендового экипажа являются экспериментально-лабораторные методы, базисом которых служит использование теории физического подобия и моделирования [4, 5-12]. Для решения задач комплексных исследований ходовых частей рельсовых экипажей и оптимизации их параметров на базе методов физического подобия и моделирования [7-9], создаются специальные методики и стенды для их реализации, имитирующие условия, близкие к реальным условиям эксплуатации.

Результаты исследований. На основе тщательного изучения и глубокого анализа литературы по моделированию и применению теории подобия [4, 6-12] можно выделить ряд условий, выполнение которых обеспечит успешность процесса моделирования сопротивления движению при выполнении следующих условий:

- отношение линейных размеров объекта и модели равно геометрическому масштабу подобия,

$$K_L = \frac{l_O}{l_M};$$

- отношение внешних сил, действующих на объект и модель равно масштабу подобия силы, т.е.

$$K_F = \frac{F_O}{F_M} = K_L^2;$$

- условие масштаба подобия массы $K_M = \frac{m_O}{m_M}$.

Поскольку величины массы и силы трения прямо пропорциональны, масштабный фактор массы имеет размерность силы $K_M = K_F = K_L^2$;

- процесс взаимодействия контактирующих поверхностей должен реализовываться в реальном масштабе времени, то есть $K_t = 1$.

Для физического моделирования системы и исследования процессов в контакте «реберко колеса – боковая поверхность рельса» принимаем метод анализа размерностей с ограничениями [13], с помо-

щю которого имеется возможность преобразования сложных неоднородных систем в сложные однородные, а также находить единственное значение масштабных коэффициентов перехода от модели к натуре для каждого из параметров с учётом необходимых соотношений системы в целом.

В процессе решения поставленной задачи физического моделирования сопротивления движения тележки рельсового экипажа необходимо обращать внимание на ряд замечаний, отмеченных в научных трудах по применению теории подобия [5, 10, 11, 16]. Например, при определении количества факторов (входные величины), действующих на модель и влияющих на конечный результат (выходные величины), следует руководствоваться рациональным количеством данных, влияющих на конечное решение, поскольку увеличение количества информации относительно объекта приводит к усложнению модели и становится невозможным получить новую информацию об объекте, т.е. модель обесценивается. Моделирование эффективно лишь вблизи диапазона, где достоверность полученных результатов максимальна. Следовательно, само существование метода моделирования неизбежно связано с упрощением модели по сравнению с объектом. В конечном счете, возникает необходимость концентрации внимания на определенных параметрах, которые содержатся в крайних условиях задачи и имеют решающее воздействие на изучаемые процессы.

Рассмотрим построение физической модели рельсового экипажа для изучения влияния воздействующих факторов на процесс действия силы сопротивления движению на тележку экипажа. Экспериментальные исследования пары колесо-рельс [14, 15] показывают, что сила сопротивления движению является функцией, зависящей от ряда параметров, связанных с режимом работы и средой, в которой работает эта пара. На основе перечня элементов, приведенных в [4] для решения нетепловых задач о динамическом нагружении упругого тела, выделим основные параметры, влияющие на сопротивление движению колес транспортных средств. Основная функциональная зависимость, представленная на основе анализа работ [4, 5, 8, 9, 11], с учетом разработки методики моделирования движения модельного рельсового экипажа, выглядит следующим образом:

$$F_{сопр} = f(P, v, m, F_{тр}, F_{бок}, R_{кр}, t, c, HB) \quad (1)$$

где P – нормальная нагрузка от колеса на рельс, Н;
 v – скорость движения рельсового экипажа, м/с;

m – масса, кг;

$F_{тр}$ – сила трения, Н;

$F_{бок}$ – боковая сила, возникающая при движении рельсового экипажа в кривой, Н;

$R_{кр}$ – радиус кривой, м;

t – время движения, с;

c – жесткость линейных связей, Н/м;

HB – твердость материала, из которого сделан исследуемый объект, Па.

Размерности параметров, действующих в рассматриваемой системе, представлены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень параметров, входящих в зависимость (1) по системе [М], [L], [Т] (М – размерности массы, L – размерности длины, Т – размерности времени)

№п/п	Параметр	Размерность в системе			
		СИ	М	L	Т
1	P , нормальная нагрузка от колеса на рельс	Н	1	1	-2
2	v , скорость движения рельсового экипажа	м/с	0	1	-1
3	m , масса	кг	1	0	0
4	$F_{тр}$, сила трения	Н	1	1	-2
5	$F_{бок}$, боковая сила, возникающая при движении рельсового экипажа в кривой	Н	1	1	-2
6	$R_{кр}$ – радиус кривой	м	0	1	0
7	t , время движения	с	0	0	1
8	c , жесткость линейных связей	Н/м	1	-1	-2
9	HB , твердость материала, из которого сделан исследуемый объект	Па	1	-1	-2

Определим критерии подобия классическим способом, основанным на π -теореме [4, 16]. На этапе моделирования подобия механической системы необходимо учесть ограничения, определяющие динамику механической системы. Для этого при использовании метода анализа размерностей жесткость C как основная варьируемая величина вводится в число базисных параметров, а время – в крайние условия [16].

В системе основных единиц [М], [L], [Т] (масса, длина и время) примем в качестве первичных величин базисные параметры v , $F_{бок}$, c . Система уравнений, образованная базисными параметрами, имеет вид

$$\begin{aligned} \ln v &= 0 \cdot \ln M + \ln L - \ln T \\ \ln F_{бок} &= \ln M + \ln L - 2 \cdot \ln T \\ \ln c &= \ln M + 0 \cdot \ln L - 2 \cdot \ln T \end{aligned} \quad (2)$$

Проверим независимость выбранных основных единиц, для чего рассчитаем следующий определитель

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

Поскольку условие (3) отлично от 0, следовательно независимость величин v , $F_{бок}$, c подтверждается.

Выведем критерии подобия небазисных параметров в матричном виде, после чего осуществим проверку результата.

Для параметра P :

$$D_{P1} = \begin{vmatrix} 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & -2 \end{vmatrix} = 0$$

$$\alpha_{P1} = \frac{D_{P1}}{D_0} = \frac{0}{1} = 0$$

$$D_{P2} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 0 & -2 \end{vmatrix} = 1$$

$$\alpha_{P2} = \frac{D_{P2}}{D_0} = \frac{1}{1} = 1$$

$$D_{P3} = \begin{vmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & -2 \\ 1 & 1 & -2 \end{vmatrix} = 0$$

$$\alpha_{P3} = \frac{D_{P3}}{D_0} = \frac{0}{1} = 0$$

Критерий подобия для параметра (P) нормальной нагрузки от колеса на рельс:

$$\pi_P = \frac{P}{v^{ap1} \cdot F_{бок}^{ap2} \cdot c^{ap3}} = idem$$

или

$$\pi_P = \frac{P}{v^0 \cdot F_{бок}^{-1} \cdot c^0} = 1,$$

тогда

$$\pi_P = \frac{P}{F_{бок}} = idem.$$

$$\text{Проверка: } \pi_P = \frac{M^1 L^1 T^{-2}}{M^1 L^1 T^{-2}} = 1.$$

Аналогичным образом связываются с базисными все остальные параметры, характерные для определения силы сопротивления, принятые для моделирования.

Результаты расчета сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Результаты расчета для модели силы сопротивления

№	Параметр	Размерность в системе			
		С И	Критерий подобия	Коэффициент перехода	Формула пересчета с оригинала на модель
1	P , нормальная нагрузка от колеса на рельс	Н	$\pi_P = \frac{P}{F_{бок}}$	$K_P = K_L^2$	$(P)_M = \frac{(P)_O}{K_P}$
2	v , скорость движения рельсового экипажа	м/с	Базисный параметр	$K_V = K_L$	$(v)_M = \frac{(v)_O}{K_V}$
3	m , масса	кг	$\pi_m = \frac{mv^2 c}{F_{бок}^2}$	$K_M = K_L^2$	$(m)_M = \frac{(m)_O}{K_M}$
4	F_{mp} , сила, трения	Н	$\pi_{F_{mp}} = \frac{F_{mp}}{F_{бок}}$	$K_{F_{mp}} = K_L^2$	$(F_{mp})_M = \frac{(F_{mp})_O}{K_{F_{mp}}}$
5	$F_{бок}$, боковая сила, возникающая при движении рельсового экипажа в кривой	Н	Базисный параметр	$K_{F_{бок}} = K_L^2$	$(F_{бок})_M = \frac{(F_{бок})_O}{K_{F_{бок}}}$
6	$R_{кр}$, радиус кривой	м	$\pi_{R_{кр}} = \frac{R_{кр} c}{F_{бок}}$	$K_{R_{кр}} = K_L$	$(R_{кр})_M = \frac{(R_{кр})_O}{K_{R_{кр}}}$
7	t , время движения	с	$\pi_t = \frac{vtc}{F_{бок}}$	$K_t = 1$	$(t)_M = (t)_O$
8	c , жесткость линейных связей	Н/м	Базисный параметр	$K_C = K_L$	$(c)_M = \frac{(c)_O}{K_C}$
9	HB , твердость материала, из которого сделан исследуемый объект	Па	$\pi_{HB} = \frac{HB F_{бок}}{c^2}$	$K_{HB} = 1$	$(HB)_M = (HB)_O$

Уравнение подобия, объединившее полученные критерии, состоит из 6 критериев, так как согласно теореме Бэкингема должно быть равно числу параметров за вычетом трех базисных:

$$F_{сопр} = f\left(\frac{P}{F_{бок}}, \frac{mv^2 c}{F_{бок}^2}, \frac{F_{mp}}{F_{бок}}, \frac{R_{кр} c}{F_{бок}}, \frac{vtc}{F_{бок}}, \frac{HB F_{бок}}{c^2}\right) \quad (4)$$

Полученные критерии подобия, составляющие критериальное уравнение (4), требуют проверки.

Для проверки полученной зависимости воспользуемся критерием Ньютона, примененного для подобного типа явлений с учетом описания безразмерных комплексов.

Данный критерий получим, если критерий силы трения $\pi_{F_{mp}}$ умножим на критерий времени π_t и разделим на критерий массы π_m , то есть

$$\frac{F_{mp}}{F_{бок}} \cdot \frac{v\tau c}{F_{бок}} \cdot \frac{mv^2 c}{F_{бок}^2} = \frac{F_{mp}t}{mv} = idem \quad (5)$$

Выводы. На основе теории подобия рассмотрено влияние воздействующих факторов на процесс действия силы сопротивления движению на тележку экипажа. Выполненные расчеты позволяют определить масштабные коэффициенты перехода от объекта исследования к модельному эксперименту, выполнить стендовые испытания и перенести результаты испытаний на объект исследования. Результаты исследований дают основания получить достоверные данные при проведении стендовых испытаний с дальнейшей обработкой и интерпретацией полученных данных модели в натуре.

Л и т е р а т у р а

1. Evgeniy Mikhailov, Stanislav Semenov, Evgenia Panchenko The possibility of reducing kinematic slip with two-point contacting with rail wheel railway vehicle. // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Vol. 13, No. 1, Poland 2013. – pp. 108 – 112.
2. Михайлов Е.В., Рейдемейстер А.Г., Семенов С.А., Макаров К.В. Математическое моделирование движения колесной пары с подвижными гребнями // Вісник СНУ ім.В.Даля. – 2014. – № 3 (210). – С.181-186.
3. Декларацийний патент України, МПК2013 В60 В17/00. Колесо рейкового транспортного засобу / Михайлов Є.В., Слащов В.А., Горбунов М.І., Мокроусов С.Д., Щербак В.П., Коршко М.М., Семенов С.О., Солодовник М.Д.; Східноукр. нац. у-нт ім. В. Даля. – № u201309109; опубл. 10.02.2014, бюл. №3.
4. Шаповалов Л.А. Моделирование в задачах механики элементов конструкций [Текст] / Л.А. Шаповалов. – М.: Машиностроение, 1990. – 288 с.
5. Александров А.А. Повышение ресурса колесных пар грузовых вагонов и рельсов путем улучшения условий их взаимодействия и динамического мониторинга. Дисс. кандидата технических наук. -, РГУПС, 2011 г, 214 с.
6. 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.
7. Гухман А.А. Введение в теорию подобия. М.: Высшая школа, 1963. – 254 с.
8. Назаров А.Г. О механическом подобии твердых деформируемых тел. Ереван: Изд-во АН Арм. ССР. 1965. 218 с.
9. Седов Л.И. Методы подобия и размерностей в механике. М.: Наука, 1967. 438 с.
10. Bockmenn G., Schulz W. Modellierung des Tropfenschlagverschleises in der instationaren Phase // Schmierungstechnik. 1984. Jg. 15. - № 8. S. 246 - 250.
11. Lorenz A. Modellbetrachtungen zum Schädigungsprozess in Maschinen und Geraten // Schmierungstechnik. 1984. Jg. 15. № 8. S. 250 – 253.
12. Щербак П.Н. Моделирование динамически нагруженных узлов трения строительных машин //Надежность строительных машин и оборудования промышленности строительных материалов: Межвуз. сб. науч. тр. Ростов н/Д: РИСИ. 1986.
13. Браун Э.Д. Модели трения и изнашивания в машинах./ Браун Э.Д., Евдокимов Ю.А., Чичинадзе А.В. / М.: Машиностроение, 1982.
14. Голубенко А.Л. Сцепление колеса с рельсом.— Луганск: ВУГУ, 1999.—476 с.
15. Ткаченко В.П. Кинематическое сопротивление движению рельсовых экипажей.- Луганск: Изд-во ВУГУ, 1996.- 200 с.
16. Кутателадзе С.С. Анализ подобия и физические модели [Текст] / Кутателадзе С.С. – Новосибирск: Наука, 1982. – 304 с.

References

1. Evgeniy Mikhailov, Stanislav Semenov, Evgenia Panchenko The possibility of reducing kinematic slip with two-point contacting with rail wheel railway vehicle. // TEKA Commission of Motorization and Power Industry in Agriculture Vol. 13, No. 1, Poland 2013. – pp. 108 – 112.
2. Mikhajlov E.V., Rejdemejster A.G., Semenov S.A., Makarov K.V. Matematicheskoe modelirovanie dvizheniya kolesnoj pary s podvizhnymi grebnymi // Visnik SNU im.V.Dalya. – 2014. – № 3 (210). – S.181-186.
3. Deklaratsijnij patent Ukraїni, MPK2013 V60 B17/00. Koleso rejkovogo transportnogo zasobu / Mikhajlov Є.V., Slashhov V.A., Gorbunov M.I., Mokrousov S.D., SHHerbakov V.P., Korshko M.M., Seme-nov S.O., Solodovnik M.D.; Skhidnoukr. nats. u-nt im. V. Dalya. – № u201309109; opubl. 10.02.2014, byul. №3.
4. Shapovalov L.A. Modelirovanie v zadachakh mekha-niki ehlementov konstruksij [Tekst] / L.A. SHapo-valov. – М.: Mashinostroenie, 1990. – 288 s.
5. Aleksandrov A.A. Povyshenie resursa kolesnykh par gruzovykh vagonov i rel'sov putem uluchsheniya uslovij ih vzaimodejstviya i dinamicheskogo monitoringa. Diss. kandidata tekhnicheskikh nauk. -, RGUPS, 2011 g, 214 s.
6. Berdinskikh V.A. Statcheskoe modelirovanie protsessov friksionno-kontaktного vzaimodejstviya pri vneshnem trenii / Berdinskikh V.A., Zaporozhets V.V. / Nadezhnost' i dolgovechnost' mashin i sooruzhenij. 1984. № 5. S. 80 - 84.
7. Gukhman A.A. Vvedenie v teoriyu podobiya. M.: Vysshaya shkola, 1963. – 254 s.
8. Nazarov A.G. O mekhanicheskom podobii tverdykh deformiruemykh tel. Erevan: Izd-vo AN Arm. SSR. 1965. 218 s.
9. Sedov L.I. Metody podobiya i razmernostej v mehanike. M.: Nauka, 1967. 438 s.
10. Bockmenn G., Schulz W. Modellierung des Tropfenschlagverschleises in der instationaren Phase // Schmierungstechnik. 1984. Jg. 15. - № 8. S. 246 - 250.
11. Lorenz A. Modellbetrachtungen zum Schädigungsprozess in Maschinen und Geraten // Schmierungstechnik. 1984. Jg. 15. № 8. S. 250 – 253.
12. Sherbak P.N. Modelirovanie dinamicheski nagruzhennykh uzlov treniya stroitel'nykh mashin //Nadezhnost' stroitel'nykh mashin i oborudovaniya promyshlennosti stroitel'nykh materialov: Mezhu-z. sb. nauch. tr. Rostov n/D: RISI. 1986.

13. Braun E.D. Modeli treniya i iznashivaniya v mashinakh./ Braun E.D., Evdokimov YU.A., Chichinadze A.V. / M.: Mashinostroenie, 1982.
14. Golubenko A.L. Stseplenie koleasa s rel'som.—Lugansk: VUGU, 1999.—476 s.
15. Tkachenko V.P. Kinematicheskoe soprotivlenie dvizheniyu rel'sovykh ehkipazhej.- Lugansk: Izd-vo VUGU, 1996.- 200 s.
16. Kutateladze S.S. Analiz podobiya i fizicheskie modeli [Tekst] / Kutateladze C.C. – Novosibirsk: Nauka, 1982. – 304 s.

Семенов С.О., Михайлов Є.В., Застосування теорії подібності для моделювання опору руху рейкового екіпажа.

У статті розглядається використання теорії подібності для аналізу сили опору при русі візка рейкового екіпажа. На основі ретельного аналізу з моделювання і застосування теорії подібності виділено низку параметрів, задіяних у системі і впливають на функціональну залежність опору руху коліс транспортних засобів. На підставі π -теорему класичним способом визначено критерії подібності з урахуванням обмежень, що визначають динаміку системи, методом аналізу розмірностей.

Перевірена незалежність вибраних основних одиниць (базисних параметрів системи). Виведені критерії подібності небазисних параметрів у матричному вигляді, після чого здійснена перевірка результату. Отримані критерії подібності, як складові функціональної залежності опору були експериментально перевірені. Для чого використовувався критерій Ньютона, що застосовується для такого типу явищ з урахуванням опису безрозмірних комплексів. Результати досліджень дають підстави отримати достовірні дані при проведенні стендових випробувань.

Ключові слова: критерії, масштаб, розмірність, параметр, опір руху, теорія подібності.

Semenov S., Mikhailov E., Application of the similarity theory for modeling the motion resistance of the rail vehicle.

The article discusses the use of similarity theory for the analysis of resistance during movement of the trolley rail vehicle. On the basis of careful analysis, modeling and application the theory of similarity to the selected number parameters involved in the system and affect the functional dependence of the resistance movement of the wheels of the vehicles. Showing their dimensions. Based on the π -theorem is a classical method defined similarity criteria and constraints that determine the dynamics of the system by the method of dimensional analysis.

Verified the independence of the selected basic units (basic system). Derived similarity criteria debasing parameters in matrix form, and then performed the audit result. The obtained similarity criteria, as components of the functional dependence the resistance were experimentally verified. For which we used the criterion of Newton applicable for this type of phenomena, taking into account the description of dimensionless complexes. The research results give grounds to obtain reliable data for bench testing.

Keywords: criterion, scale, dimension, resistance to movement, the theory of similarity.

Михайлов Є.В. – к.т.н., доцент кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля, м. Сєверодонецьк.
e-mail: evgmi@yandex.ru.

Семенов С.О. – старший викладач кафедри «Логістичне управління та безпека руху на транспорті» СНУ ім. В. Даля, м. Сєверодонецьк.
e-mail: semen_opugt@mail.ru.

Рецензент: д.т.н., проф. Чернецкая-Белецкая Н.Б.

Стаття подана 10.03.2015