

Машиностроение и машиноведение

УДК 531.8: 519

doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-3-9

Динамика испытательного стенда типа «беличье колесо»

А.С. Гусев¹, К.Б. Даниленко¹, С.А. Стародубцева², В.Я. Тетерятников¹ МГТУ им. Н.Э. Баумана² Московский энергетический институт

Dynamics of a “Hamster Wheel” Test Bench

A.S. Gusev¹, K.B. Danilenko¹, S.A. Starodubtseva², V.Ya. Teteryatnikov³¹ Bauman Moscow State Technical University² National Research University Moscow Power Engineering Institute

Полигонные ресурсные и функциональные испытания автомобилей и тракторов являются дорогостоящими и длительными. Их предложено заменить относительно недорогими и не требующими больших затрат времени испытаниями на стенде типа «беличье колесо». Транспортное средство остается неподвижным относительно земли, находясь внутри вращающегося кольца и перемещаясь относительно его внутренней поверхности. Эту поверхность можно оборудовать искусственными препятствиями, имитирующими реальные неровности дороги. Составлены дифференциальные уравнения движения системы и выявлен характер относительного движения внешнего кольца и объекта испытаний с учетом резонансных явлений и возможных автоколебаний. В качестве расчетной схемы выбран диск, имитирующий колесо транспортного средства. Изучена возможность появления в системе автоколебаний и определена их амплитуда. Выполнена качественная оценка возможных динамических эффектов. Предложена система расстановки искусственных препятствий на внутренней поверхности колеса, имитирующих в статистическом аспекте неровности дорог.

Ключевые слова: испытательный стенд, уравнения Лагранжа, случайные процессы, искусственная неровность

Ground tests of vehicles such as cars and tractors, including life tests and functional tests, are expensive and time-consuming. We propose to replace them with relatively inexpensive time-saving tests using a "hamster wheel" test bench. The vehicle inside a rotating ring remains at rest relative to the ground but in motion relative to the inner surface of the ring. This surface can be equipped with artificial obstacles to simulate actual road irregularities. We constructed differential equations of motion for the system and established the nature of the relative motion involving the outer ring and the test object, taking into account resonance phenomena and possible self-oscillations. We selected a disk simulating a vehicle wheel as our computational scheme. We studied the probability that self-oscillations appear in the system and determined their amplitude. We performed a qualitative assessment of possible dynamic effects. The paper proposes a system for arranging

artificial obstacles on the inner surface of the wheel to simulate road bumps in terms of statistics.

Keywords: test bench, Lagrange equations, random processes, artificial road bump

Рассмотрим качение сплошного круглого диска массой m и радиусом r по внутренней поверхности тонкостенного кольца массой M и радиусом R , шарнирно закрепленного по центру в точке O . Расчетная схема системы «беличье колесо» (далее СБК) приведена на рис. 1.

Цель работы — расчет предлагаемого испытательного стенда СБК на динамические колебания с учетом резонансных явлений путем вывода дифференциальных уравнений, а также качественная оценка возможных динамических эффектов и изучение возможности появления в СБК автоколебаний.

Пример использования СБК для ускоренных испытаний мобильной техники, заменяющей ее полигонные испытания, показан на фото ее макета (рис. 2). Подобное техническое решение предложено в патенте [1].

Внутреннюю поверхность кольца можно оборудовать искусственными неровностями, имитирующими таковые для пути, по которым в реальности движется транспортное средство.

За обобщенные координаты СБК примем углы поворота кольца $\theta(t)$ и диска $\varphi(t)$ в функции времени (см. рис. 1). Угловая скорость вращения диска относительно его центра вычисляется как

$$\Omega_2 = \frac{(R-r)\dot{\varphi} - R\dot{\theta}}{r}. \quad (1)$$

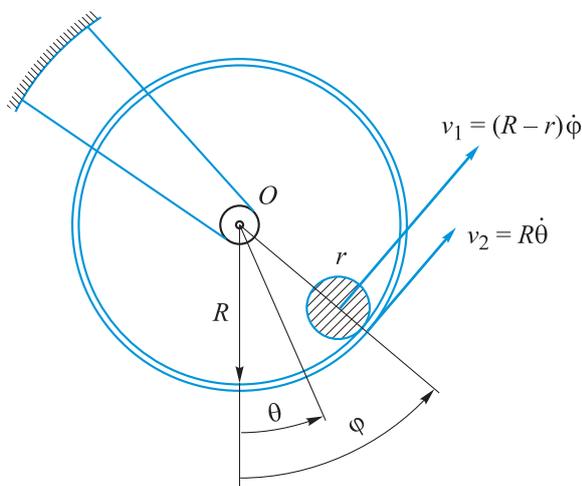


Рис. 1. Расчетная схема СБК

Моменты инерции кольца J_1 и диска J_2 определяются выражениями

$$\begin{aligned} J_1 &= mR^2; \\ J_2 &= \frac{1}{2}mr^2. \end{aligned} \quad (2)$$

Свободные колебания диска и кольца без учета трения в шарнире описываются следующей системой дифференциальных уравнений Лагранжа второго рода [2]:

$$\begin{cases} \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} + \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} = 0; \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} + \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} = 0, \end{cases} \quad (3)$$

где T и Π — кинетическая и потенциальная энергия СБК,

$$\begin{aligned} T &= MR^2 \frac{\dot{\theta}^2}{2} + m \frac{(R-r)^2 \dot{\varphi}^2}{2} + \\ &+ \frac{mr^2}{2} \frac{[(R-r)\dot{\varphi} - R\dot{\theta}]^2}{2r^2}; \end{aligned}$$

$$\Pi = mg(R-r)(1 - \cos \varphi).$$

В соответствии с выражениями (1) и (2) производные кинетической и потенциальной

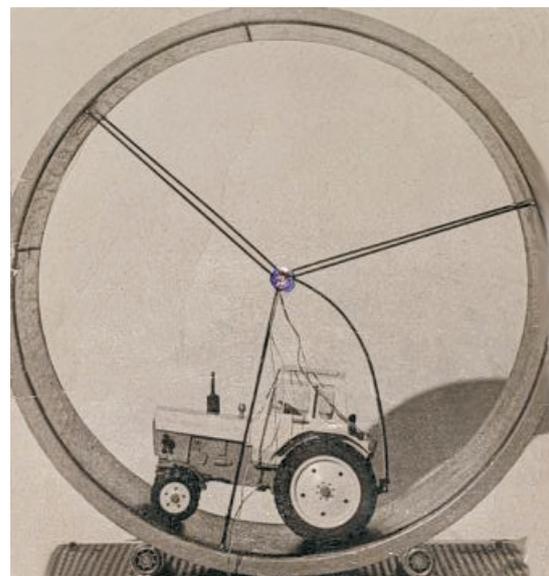


Рис. 2. Фото макета СБК

энергий СБК по параметрам $\dot{\varphi}$, $\dot{\theta}$, φ и θ определяются по формулам

$$\begin{aligned} \frac{\partial T}{\partial \dot{\varphi}} &= mR^2(R-r)^2\dot{\varphi} + \frac{m}{2}[(R-r)\dot{\varphi} - R\dot{\theta}](R-r); \\ \frac{\partial T}{\partial \dot{\theta}} &= mR^2\dot{\theta} + \frac{m}{2}R[(R-r)\dot{\varphi} - R\dot{\theta}]; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \varphi} &= mg(R-r)\sin\varphi; \\ \frac{\partial \Pi}{\partial \theta} &= 0, \end{aligned} \tag{4}$$

где g — ускорение свободного падения.

Подставив соотношения (4) в уравнения (3), получим следующую систему дифференциальных уравнений, описывающих свободные колебания СБК без учета трения кольца и диска:

$$\begin{aligned} MR^2\ddot{\theta} - \frac{m}{2}R[(R-r)\ddot{\varphi} - R\ddot{\theta}] &= 0; \\ m(R-r)^2\ddot{\varphi} + \frac{m}{2}[(R-r)R\ddot{\varphi} - R\ddot{\theta}] + \\ + mg(R-r)\sin\varphi &= 0. \end{aligned}$$

При малых значениях угла поворота диска φ имеем

$$\begin{aligned} \left(M + \frac{m}{2}\right)R^2\ddot{\theta} - \frac{m}{2}(R-r)R\ddot{\varphi} &= 0; \\ \frac{R}{2}\ddot{\theta} - \frac{3}{2}(R-r)\ddot{\varphi} + g\varphi &= 0. \end{aligned} \tag{5}$$

В матричной форме уравнения (5) принимают вид

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{q}} + \mathbf{C}\mathbf{q} = 0, \tag{6}$$

где \mathbf{M} — матрица масс; \mathbf{q} — вектор обобщенных координат; \mathbf{C} — матрица жесткостей.

Матрица масс

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(M + \frac{m}{2}\right)R^2 & -\frac{m}{2}(R-r)R \\ \frac{1}{2}R & -\frac{3}{2}(R-r) \end{bmatrix}, \tag{7}$$

где m_{ij} — элементы матрицы, $i = 1, 2, j = 1, 2$.

Вектор обобщенных координат

$$\mathbf{q} = [q_1, q_2]^T = [\theta, \varphi]^T.$$

Матрица жесткостей

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_{11} & c_{12} \\ c_{21} & c_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & g \end{bmatrix}, \tag{8}$$

где c_{ij} — элементы матрицы, $i = 1, 2, j = 1, 2$.

Из системы уравнений (5) следует, что первая ω_1 и вторая ω_2 парциальные частоты колебаний СБК (частоты колебаний кольца и диска) при закрепленном диске определяются соотношениями

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0; \\ \omega_2^2 &= \frac{2g}{3(R-r)}. \end{aligned} \tag{9}$$

Из соотношений (6)–(8) следует, что точные значения частот колебаний ω можно определить из уравнения [3, 4]

$$\begin{aligned} |\mathbf{C} - \omega^2\mathbf{M}| &= \begin{vmatrix} \omega^2 m_{11} & \omega^2 m_{12} \\ -\omega^2 m_{21} & g - \omega^2 m_{22} \end{vmatrix} = \\ &= \omega^2 m_{11} (g - \omega^2 m_{22}) + \omega^4 m_{12} m_{21}. \end{aligned}$$

Тогда

$$\begin{aligned} \omega_1 &= 0; \\ \omega_2^2 &= \frac{g}{m_{22} - m_{12}m_{21}/m_{11}}. \end{aligned} \tag{10}$$

При $m_{11} \rightarrow \infty$ (при закрепленном кольце) возвращаемся к формуле (9).

Из выражений (6) и (7) вытекают соотношения

$$\ddot{\theta} = -\frac{m_{12}}{m_{11}}\ddot{\varphi}; \quad \left(m_{22} - \frac{m_{12}m_{21}}{m_{11}}\right)\ddot{\varphi} + g\varphi = 0. \tag{11}$$

Отсюда следует, что частота колебаний диска будет также определяться по формуле (10).

Найдем ω_1 при заданной линейной скорости движения диска v .

При отсутствии внешних сил кинетический момент движения K — момент ее количества движения относительно точки O (см. рис. 1) — равен нулю. Отсюда

$$K = MR^2\omega_1 + (mv)R + mr^2\omega_1 = 0. \tag{12}$$

Из выражения (12) получаем

$$\omega_1 = -\frac{MR}{MR^2 + mr^2}v,$$

где знак минус означает, что движение кольца будет происходить в обратном направлении от движения диска.

Линейная скорость движения точек кольца определяется выражением

$$v_1 = \omega_1 R = -\frac{MR^2}{MR^2 + mr^2}v.$$

Отсюда $|v_1| \leq v$.

Тогда

при $m = 0$ или $v = 0$

$$v_1 = 0;$$

при $M = \infty$

$$v_1 = 0.$$

Скорость движения диска относительно кольца

$$v_2 = v - v_1 = v \left(1 + \frac{MR^2}{MR^2 + mr^2} \right).$$

Тогда

при $m = 0$ или $M = \infty$

$$v_2 = v;$$

при $M = 0$

$$v_2 = v \left(1 + \frac{R^2}{r^2} \right).$$

Рассмотрим возможность возникновения автоколебаний в СБК (см. рис. 1). Они могут быть обусловлены нелинейностью характеристики трения в шарнире O , которую можно описать соотношением [5]

$$M_{\text{тр}} = M_{\text{тр}}^0 \text{sign } \omega_1 = a\omega_1 + b\omega_1^3,$$

где $M_{\text{тр}}^0$ — момент трения в начале движения; a и b — параметры, характеризующие интенсивность подвода энергии к СБК («отрицательное трение») и интенсивность ее рассеивания во внешнюю среду, определяемые по результатам специальных испытаний [6, 7].

При малых значениях ω_1 и $a\omega_1 > b\omega_1^3$ колебания с любыми начальными условиями будут затухающими. С увеличением ω_1 вклад в колебательный процесс нелинейной составляющей момента сил трения $b\omega_1^3$ возрастает. При $\omega_1^2 = a/b$ колебания стабилизируются с некоторой амплитудой колебаний A , подлежащей определению.

Из выражения (11) следует, что автоколебания будут происходить относительно положения динамического равновесия, определяемого углом φ_0 из уравнения

$$mgR\varphi_0 = M_{\text{тр}}^0 - a\omega_1 + b\omega_1^3.$$

Уравнение движения СБК относительно этого положения равновесия имеет вид [8]

$$\tilde{J}\ddot{\varphi} + \tilde{c}(\varphi + \varphi_0) = M_{\text{тр}}^0 - a(\omega_1 - \dot{\varphi}) + b(\omega_1 - \dot{\varphi})^3$$

или

$$\ddot{\varphi} - \alpha\dot{\varphi} - \lambda\dot{\varphi}^2 + \beta\dot{\varphi}^3 + \omega_2^2\varphi = 0, \quad (13)$$

где

$$\begin{aligned} \tilde{J} &= mR \left(m_{22} - \frac{m_{12}m_{21}}{m_{11}} \right); \\ \tilde{c} &= mgR; \quad \alpha = \frac{1}{\tilde{J}}(a - 3b\omega_1^2); \\ \beta &= \frac{b}{\tilde{J}}; \quad \lambda = \frac{3b}{\tilde{J}}\omega_1^2; \quad \omega_2^2 = \frac{\tilde{c}}{\tilde{J}}. \end{aligned}$$

При $\lambda = 0$ из выражения (13) получаем уравнение Рэля или Ван Дер Поля [9]

$$\ddot{\varphi} - \alpha\dot{\varphi} - \lambda\dot{\varphi}^2 + \beta\dot{\varphi}^3 + \omega_2^2\varphi = 0.$$

Из решения этого уравнения находим амплитуду установившихся автоколебаний [10]

$$A = \frac{2}{\omega_2} \sqrt{\frac{\alpha}{3\beta}}.$$

При $\alpha = 0$ амплитуда колебаний $A = 0$, при $\beta = 0$ получаем $A = \infty$.

Исследуем, как надо расположить искусственные неровности на внутренней поверхности кольца, чтобы наилучшим образом имитировать неровности пути, по которым в реальности движется транспортное средство.

При этом исходная информация о высотах неровностей (профиле пути) $h(x)$ как о случайном процессе задана автокорреляционными функциями [11, 12]

$$K_h(x) = s_h^2 e^{-\alpha|x|} \left(\cos \beta x + \frac{\alpha}{\beta} \sin \beta |x| \right), \quad (14)$$

где s_h^2 — дисперсия высот неровностей.

Параметры s_h^2 , α и β зависят от типа покрытия дороги и его состояния. Обычно принимают [13]: $s_h \leq 30$ см; $\alpha = 0,01 \dots 0,10$ м⁻¹; $\beta = 0,025 \dots 0,140$ м⁻¹.

Ожидаемая частота кинематического воздействия $h(t)$ на транспортное средство в точке его контакта с дорогой при скорости движения v определяется выражением [5, 6]

$$\langle \omega \rangle = v \sqrt{\alpha^2 + \beta^2}. \quad (15)$$

При этом траектория кинематического воздействия, описываемого функцией (14) как траектория неэргодического случайного процесса, имеет вид [14]

$$h(t) = \lambda_1 \cos \omega t, \quad (16)$$

где λ_1 — случайная амплитуда с рэлеевской плотностью распределения вероятностей [15],

$$f_{\lambda}(\lambda_1) = \frac{1}{S_h^2} \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{s_h^2}\right);$$

ω — статистически независимая от λ_1 случайная величина с законом распределения вероятностей, определяемая как нормированная на единицу спектральной плотности $S_h(\omega)$ процесса $h(t)$, т. е.

$$f_{\omega}(\omega) = \frac{2}{s_h^2} S_h(\omega).$$

При ориентировочных расчетах величины λ_1 и ω в соотношении (16) могут быть заменены их наиболее вероятными значениями $\langle \omega \rangle$ по формуле (15) и средним значением

$$\langle \lambda_1 \rangle = \sqrt{\frac{\pi}{2}} S_h.$$

Таким образом, использование СБК может решить проблему замены дорогостоящих и длительных полигонных ресурсных и функциональных испытаний автомобилей и тракторов относительно недорогими и не требующими больших затрат времени стендовыми испытаниями.

Однако появляется новая проблема — необходимость учета в работающих стендах сложных динамических явлений: неустойчивости движений некоторых элементов конструкции, резонансных колебаний разного типа, ударов, автоколебаний и т. п.

Учесть их на начальном этапе создания подобных стендов вряд ли возможно. Поэтому данная работа ограничена качественным описанием возможных динамических эффектов. При этом целью анализа по И.А. Биргеру было «не число, а понимание».

Выводы

1. Составлены дифференциальные уравнения свободных колебаний СБК и определены их частота и форма.
2. Выявлен характер относительного движения внешнего кольца и внутреннего диска.
3. Проанализировано возможное появление в СБК автоколебаний и определена их амплитуда.
4. Предложена система расстановки искусственных препятствий на внутренней поверхности кольца, имитирующая неровности дорог.

Литература

- [1] Тетерятников В.Я., Кривенцов В.В., Козырев С.П. и др. *Стенд для испытаний транспортных средств*. А.с. 1062551 СССР. Заявл. 10.08.1982, опубл. 23.12.1983.
- [2] Болотин В.В. *Колебания линейных систем*. Москва, Наука, 1979. 336 с.
- [3] Тарг С.М. *Краткий курс теоретической механики*. Москва, Высшая школа. 1986. 416 с.
- [4] Гусев А.С. *Введение в динамику машин*. Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2017. 27 с.
- [5] Гусев А.С. *Вероятностные методы в механике машин и конструкций*. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 224 с.
- [6] Гусев А.С. *Курс лекций по вероятностным методам в механике*. Москва. Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. 99 с.
- [7] Гусев А.С., Карунин А.Л., Крамской Н.А. и др. *Теория колебаний в автомобиле- и тракторостроении*. Москва. Изд-во МАМИ. 2007. 336 с.
- [8] Болотин В.В. *Ресурс машин и конструкций*. Москва, Машиностроение, 1990. 448 с.
- [9] Когаев В.П., Махутов Н.А., Гусенков А.П. *Расчеты деталей машин и конструкций на прочность и долговечность*. Москва, Машиностроение, 1985. 224 с.
- [10] Elishakoff I. *Probabilistic methods in the theory of structures*. Wiley, 2010. 489 p.
- [11] Абызов А.А., Березин И.Я. Расчет ресурса деталей при случайном независимом многопараметрическом нагружении. *Вестник ЮУрГУ. Сер. Машиностроение*, 2006, т. 8, № 11, с. 30–36.
- [12] Махутов Н.А. Критериальная база прочности, ресурса, надежности, живучести машин и человеко-машинных комплексов. *Проблемы машиностроения и надежности машин*, 2013, № 5, с. 25–36.
- [13] Чирков В.П., Окопный Ю.А., Радин В.П. *Колебания линейных систем*. Москва, Спектр. 2014. 432 с.
- [14] Gusev A.S., Starodubtseva S.A. Fatigue life of complex structures under random loads. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 179–183, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16030084>
- [15] Whitney C.A. *Random processes in physical systems*. Wiley, 2010. 489 p.

References

- [1] Teteryatnikov V.Ya., Kriventsov V.V., Kozyrev S.P. et al. *Stend dlya ispytaniy transportnykh sredstv* [Tests bench for vehicles]. Certificate of authorship no. 1062551 USSR. Appl. 10.08.1982, publ. 23.12.1983. (In Russ.).
- [2] Bolotin V.V. *Kolebaniya lineynykh system* [Oscillations of a linear system]. Moscow, Nauka Publ., 1979. 336 p. (In Russ.).
- [3] Targ S.M. *Kratkiy kurs teoreticheskoy mekhaniki* [Short course of theoretical mechanics]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1986. 416 p. (In Russ.).
- [4] Gusev A.S. *Vvedenie v dinamiku mashin* [Introduction into machine dynamics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2017. 27 p. (In Russ.).
- [5] Gusev A.S. *Veroyatnostnye metody v mekhanike mashin i konstruktsiy* [Probability methods in machine mechanics and constructions]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 224 p. (In Russ.).
- [6] Gusev A.S. *Kurs leksiy po veroyatnostnym metodam v mekhanike* [Lecture course on probability methods in mechanics]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2020. 99 p. (In Russ.).
- [7] Gusev A.S., Karunin A.L., Kramskoy N.A. et al. *Teoriya kolebaniy v avtomobile- i traktorostroenii* [Oscillation theory in vehicle and tractor building]. Moscow, Izd-vo MAMI Publ., 2007. 336 p. (In Russ.).
- [8] Bolotin V.V. *Resurs mashin i konstruktsiy* [Resource of machines and constructions]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 448 p. (In Russ.).
- [9] Kogaev V.P., Makhutov N.A., Gusenkov A.P. *Raschety detaley mashin i konstruktsiy na prochnost' i dolgovechnost'* [Calculation of machine parts and constructions on strength and durability]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 224 p. (In Russ.).
- [10] Elishakoff I. Probabilistic methods in the theory of structures. Wiley, 2010. 489 p.
- [11] Abyzov A.A., Berezin I.Ya. Calculation of parts life at random stand-alone multiparameter load. *Vestnik YuUrGU. Ser. Mashinostroenie*, 2006, vol. 8, no. 11, pp. 30–36. (In Russ.).
- [12] Makhutov N.A. A criterion base for assessment of strength, lifetime, reliability, survivability, and security of machines and man-machine systems. *Problemy mashinostroeniya i nadezhnosti mashin*, 2013, no. 5, pp. 25–36. (In Russ.). (Eng. version: *J. Mach. Manuf. Reliab.*, 2013, vol. 42, no. 5, pp. 364–373, doi: <https://doi.org/10.3103/S1052618813050075>)
- [13] Chirkov V.P., Okopnyy Yu.A., Radin V.P. *Kolebaniya lineynykh system* [Oscillations of linear systems]. Moscow, Spektr Publ., 2014. 432 p. (In Russ.).
- [14] Gusev A.S., Starodubtseva S.A. Fatigue life of complex structures under random loads. *Russ. Engin. Res.*, 2016, vol. 36, no. 3, pp. 179–183, doi: <https://doi.org/10.3103/S1068798X16030084>
- [15] Whitney C.A. *Random processes in physical systems*. Wiley, 2010. 489 p.

Статья поступила в редакцию 27.12.2021

Информация об авторах

ГУСЕВ Александр Сергеевич — доктор технических наук, профессор кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: g-a-s@bmstu.ru).

ДАНИЛЕНКО Константин Борисович — старший преподаватель кафедры «Прикладная механика». МГТУ им. Н.Э. Баумана (105005, Москва, Российская Федерация, 2-я Бауманская ул., д. 5, к. 1, e-mail: dcb@bmstu.ru).

Information about the authors

GUSEV Alexandr Sergeevich — Doctor of Science (Eng.), Professor, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: g-a-s@bmstu.ru).

DANILENKO Konstantin Borisovich — Senior Lecturer, Department of Applied Mechanics. Bauman Moscow State Technical University (105005, Moscow, Russian Federation, 2nd Baumanskaya St., Bldg. 5, Block 1, e-mail: dcb@bmstu.ru).

СТАРОДУБЦЕВА Светлана Александровна — кандидат технических наук, доцент ИЭВТ. ФГБОУ ВО «НИУ МЭИ» (111250, Москва, Российская Федерация, Красноказарменная ул., д. 17, e-mail: СТАНОК@gmail.com).

STARODUBTSEVA Svetlana Aleksandrovna — Candidate of Science (Eng.), Associate Professor, Institute of Energy Efficiency and Hydrogen Technologies. National Research University Moscow Power Engineering Institute (111250, Moscow, Russian Federation, Krasnokazarmennaya St., Bldg. 17, e-mail: СТАНОК@gmail.com).

ТЕТЕРЯТНИКОВ Владимир Яковлевич — старший научный сотрудник. (107392, Москва, Российская Федерация, ул. Просторная, д. 14, e-mail: pes@europe.com).

TETERYATNIKOV Vladimir Yakovlevich — Senior Research Fellow (107392, Moscow, Russian Federation, Prostor-naya St., Bldg. 14, e-mail: pes@europe.com).

Просьба ссылаться на эту статью следующим образом:

Гусев А.С., Даниленко К.Б., Стародубцева С.А., Тетерятников В.Я. Динамика испытательного стенда типа «беличье колесо». *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2022, № 5, с. 3–9, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-3-9

Please cite this article in English as:

Gusev A.S., Danilenko K.B., Starodubtseva S.A., Teteryatnikov V.Ya. Dynamics of a "Hamster Wheel" Test Bench. *BMSTU Journal of Mechanical Engineering*, 2022, no. 5, pp. 3–9, doi: 10.18698/0536-1044-2022-5-3-9



**Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана
предлагает читателям монографию В.Г. Цегельского
«Эволюция далеких от равновесия
термодинамических систем в примерах»**

Проанализированы условия, определяющие процесс эволюции в изолированных и открытых неравновесных термодинамических системах. Особое внимание уделено открытым неравновесным системам, далеким от равновесия. Экспериментально-расчетным путем показано, что неравновесные процессы, протекающие в гидродинамике, теплообмене, аэродинамике, магнетизме, гетерогенных каталитических и гомогенных периодических химических реакциях, в биологических системах и ряде других, подчиняются одним и тем же закономерностям изменения состояний неравновесных термодинамических систем в процессе их эволюции. В основе этих закономерностей лежит общий принцип, сформулированный в виде аксиомы о стремлении к совершенству процессов в природе. Представлены схемы процессов эволюции неравновесных термодинамических систем, имеющих как несколько неперекрываваемых, так и перекрываваемых стационарных состояний. Полученные закономерности эволюции неравновесных систем применены к атмосфере Земли. Показано влияние некоторых природных и антропогенных факторов, увеличивающих производство энтропии в атмосфере и приближающих ледниковый период на Земле.

Для широкого круга научных работников, преподавателей, инженеров и аспирантов, специализирующихся в области термодинамики, физики, химии, биологии, экологии и др.

По вопросам приобретения обращайтесь:

105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.
Тел.: +7 499 263-60-45, факс: +7 499 261-45-97;
press@baumanpress.ru; <https://bmstu.press>