

DOI: <https://doi.org/10.26896/1028-6861-2020-86-4-61-65>

МАШИНА ДЛЯ ОЦЕНКИ ТРИБОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ В РЕЖИМЕ РЕАЛЬНОГО ВРЕМЕНИ

© Михаил Владимирович Абрамчук*, Роман Владимирович Печенко, Кирилл Андреевич Нуждин, Виктор Михайлович Мусалимов

Национальный исследовательский университет ИТМО, Россия, 197101, Санкт-Петербург, Кронверкский проспект, д. 49;

*e-mail: abramchukmv@itmo.ru

Статья поступила 18 апреля 2019 г. Поступила после доработки 18 июля 2019 г.

Принята к публикации 4 декабря 2019 г.

Описана машина трения возвратно-поступательного действия — «Трибал-Т» — для автоматизированного контроля качества трущихся поверхностей трибопар. Особенность ее состоит в осуществлении принудительного фрикционного взаимодействия трущихся поверхностей, закрепленных на приводной и сопряженной платформах. В условиях непрерывной регистрации взаимных перемещений нагруженных трибопар осуществляют непрерывную обработку сигналов датчиков перемещений с использованием классических подходов теории автоматического управления в целях идентификации трибологических характеристик. Машина обеспечивает последовательный визуальный контроль этих параметров в режиме реального времени. Активно использованы возможности компьютерных технологий на базе MATLAB. Приведен расчет трибологических характеристик материалов: динамического коэффициента трения, коэффициента демпфирования и меры шероховатости поверхности. Проведенные испытания позволили заключить, что машина трения возвратно-поступательного действия «Трибал-Т» эффективна для исследования в режиме реального времени трибологических характеристик материалов: динамического коэффициента трения, коэффициента демпфирования и меры шероховатости поверхности. Отмечена возможность ее использования для мониторинга состояния трибоузлов машин и механизмов.

Ключевые слова: машина трения; «Трибал»; стандарты; трибология; трибологические свойства; трибопара; коэффициент демпфирования.

A MACHINE FOR REAL-TIME ESTIMATION OF THE TRIBOLOGICAL CHARACTERISTICS OF MATERIALS

© Michail V. Abramchuk*, Roman V. Pechenko, Kirill A. Nuzhdin, Viktor M. Musalimov

ITMO University, 49 Kronverksky Pr., St. Petersburg, 197101, Russia; *e-mail: abramchukmv@itmo.ru

Received April 18, 2019. Revised July 18, 2019. Accepted December 4, 2019.

A reciprocating friction machine Tribal-T intended for automated quality control of the rubbing surfaces of tribopairs is described. The distinctive feature of the machine consists in implementation of the forced relative motion due to the frictional interaction of the rubbing surfaces fixed on the drive and conjugate platforms. Continuous processing of the signals from displacement sensors is carried out under conditions of continuous recording of mutual displacements of loaded tribopairs using classical approaches of the theory of automatic control to identify the tribological characteristics. The machine provides consistent visual real time monitoring of the parameters. The MATLAB based computer technologies are actively used in data processing. The calculated tribological characteristics of materials, i.e., the dynamic friction coefficient, damping coefficient and measure of the surface roughness, are presented. The tests revealed that a Tribal-T reciprocating friction machine is effective for real-time study of the aforementioned tribological characteristics of materials and can be used for monitoring of the condition of tribo-nodes of machines and mechanisms.

Keywords: friction machine; Tribal; standards; tribology; tribological properties; tribopair; damping coefficient.

Введение

Задача автоматизированного контроля качества трущихся поверхностей остается актуаль-

ной [1 – 6]. В данной работе представлена машина трения возвратно-поступательного действия «Трибал-Т», позволяющая регистрировать вза-

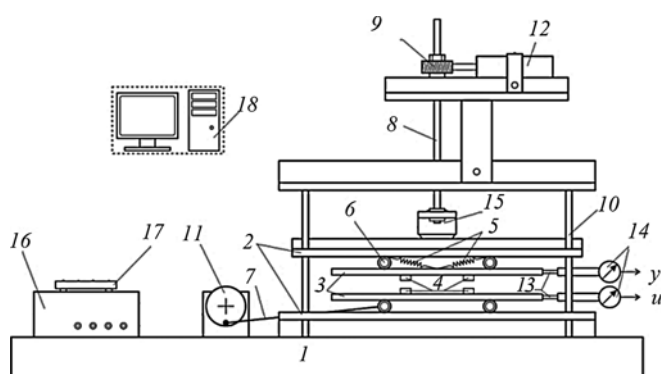


Рис. 1. Схема машины трения «Трибал»: 1 — основание; 2 — направляющие; 3 — держатели образцов; 4 — образцы; 5 — упругий подвес; 6 — катки; 7 — кривошипно-ползунный механизм; 8 — винтовой домкрат; 9 — червячная передача; 10 — стойка; 11 — электропривод; 12 — электродвигатель; 13 — щупы; 14 — датчики перемещения; 15 — динамометр; 16 — блок управления; 17 — модуль АЦП/ЦАП; 18 — компьютер

Fig. 1. Tribal schematic: 1 — base; 2 — guides; 3 — sample holders; 4 — samples; 5 — flexure suspension; 6 — rollers; 7 — crank-slider mechanism; 8 — screw Jack; 9 — worm gear; 10 — rack; 11 — electric drive; 12 — electric motor; 13 — probes; 14 — displacement sensors; 15 — dynamometer; 16 — control unit; 17 — ADC/DAC module; 18 — computer

имные перемещения нагруженных трибопар. Показана возможность непрерывной обработки сигналов датчиков перемещений с использованием классических подходов теории автоматического управления в целях идентификации трибологических характеристик — коэффициента демпфирования и меры шероховатости. Машина обеспечивает мониторинг этих параметров в режиме реального времени. Активно использованы возможности компьютерных технологий на базе MATLAB.

Машины трения возвратно-поступательного движения

Нормативная документация [7] регламентирует исследования на машинах трения. В 2015 г. в России разработан стандарт ГОСТ 33252-2015, аналогичный американскому ASTM D6425-17, устанавливающий метод определения коэффициента трения и способность смазочного материала предотвращать износ под воздействием высокочастотных линейных колебаний. Метод, описываемый в отечественном стандарте, идентичен методике, приведенной в немецком DIN 51834.

Согласно стандарту, коэффициент трения определяют следующим образом. Проводят испытания на машине SRV (Schwingung, Reibung, Verschleiss — вибрация, трение, износ) согласно ASTM D5706-16. Испытательная машина SRV состоит из привода колебательного движения, ис-

пытательной камеры и нагрузочного устройства с серводвигателем и тензодатчиком. Машиной управляют с помощью блока управления для привода колебательного движения (таймера, контроля нагрузки, частоты, амплитуды хода, усилителя данных для определения коэффициента трения, выключателя и контроллера для нагрева). Коэффициенты трения регистрируют в зависимости от времени с помощью самописца или компьютерной программы сбора данных.

Аналогичная машина трения — «Трибал» — сконструирована студентами и аспирантами кафедры Мехатроники Университета ИТМО (Санкт-Петербург). Ее работа основана на применении компьютерных и мехатронных технологий [8]. Машина позволяет исследовать трибологические характеристики различных материалов в режиме реального времени. Она состоит из механизмов привода платформы возвратно-поступательного перемещения образцов, узла нагружения, держателей образцов и измерительной системы. Схема машины трения представлена на рис. 1.

Основными особенностями машины являются: возможность получения динамических характеристик трибологических пар; оценка качества поверхностей исследуемых материалов; мониторинг класса шероховатости. Позднее она была модернизирована — заменены датчики и приводы нагружения, использованы прецизионные направляющие с подшипниковой дорожкой из перекрестных роликов, что позволило повысить точность позиционирования, а также уменьшить влияние вибраций.

Общий вид модернизированной установки «Трибал-Т» представлен на рис. 2. К верхней и нижней платформам 1 крепятся три пары образцов в виде трех цилиндров, трущихся торцами. Плоский контакт обеспечивается за счет того, что верхняя платформа имеет люфт за счет роликовых направляющих 10. Это позволяет осуществлять самоустановку образцов и реализовывать плоский трехточечный контакт. Обе платформы при работе установки осуществляют возвратно-поступательное движение. С помощью привода нагружения 9 верхняя платформа прижимается к нижней до образования контакта между образцами. Затем привод 8 реализует циклическое возвратно-поступательное движение нижней платформы. За счет сил трения верхняя платформа принудительно циклически перемещается. Такое принудительное движение верхней платформы является важным отличием установки «Трибал-Т» от имеющихся аналогичных машин трения. Эти движения регистрируются датчиками линейных перемещений 2, а данные, поступающие на компьютер, являются входом и выходом идентификационной модели [9].

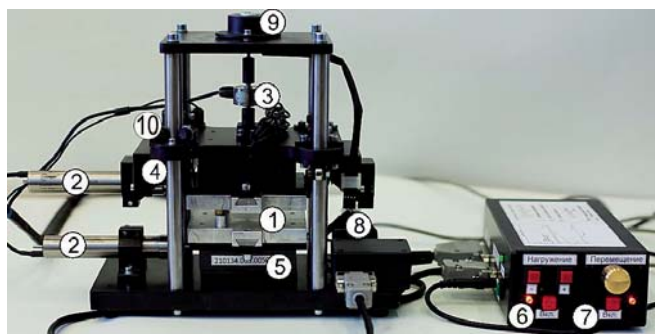


Рис. 2. Экспериментальный трибологический комплекс «Трибал-Т»: 1 — верхняя и нижняя платформы; 2 — датчики линейных перемещений; 3, 4 — датчики нормальной и тангенциальной нагрузки соответственно; 5 — направляющие линейных перемещений; 6 — блок управления приводом нагружения; 7 — контроль привода возвратно-поступательного движения; 8 — привод циклического возвратно-поступательного движения; 9 — привод нагружения; 10 — роликовые направляющие

Fig. 2. Experimental tribological complex Tribal-T: 1 — upper and lower platforms; 2 — linear displacement sensors; 3, 4 — sensors of normal and tangential load, respectively; 5 — linear motion guides; 6 — control unit for the load drive; 7 — control drive reciprocating motion; 8 — drive cyclic reciprocating motion; 9 — loading drive; 10 — roller guide

Технические характеристики установки «Трибал-Т»:

- амплитуда движения нижней платформы — 1 – 5 мм;
- частота движения нижней платформы — 1 – 5 Гц;
- сила нагружения — 3 – 30 Н.

Расчет трибологических характеристик материалов

Сигналы с датчиков перемещений нижней и верхней платформ — это вход и выход «черного ящика» трибосистемы. Примеры сигналов приведены на рис. 3, где in — входной, out — выходной сигналы. Сигналы импортируются в среду MATLAB, где формируется дискретная модель в пространстве состояний, которое отображает поведение динамической системы. Все вычисления проводятся с использованием теории автоматического управления [10].

Матрица системы в пространстве состояния дает возможность непосредственно определять коэффициент демпфирования и частоту собственных колебаний:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_0^2 & -2n \end{bmatrix},$$

где ω_0 — частота собственных колебаний; n — коэффициент демпфирования, определяющий меру шероховатости [9].

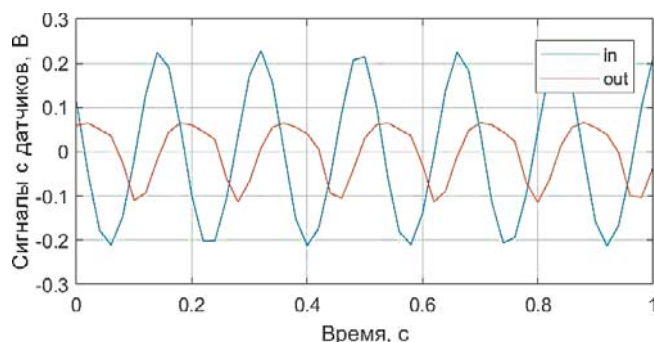


Рис. 3. Данные, полученные с помощью установки «Трибал-Т»

Fig. 3. Data obtained on a Tribal-T friction machine

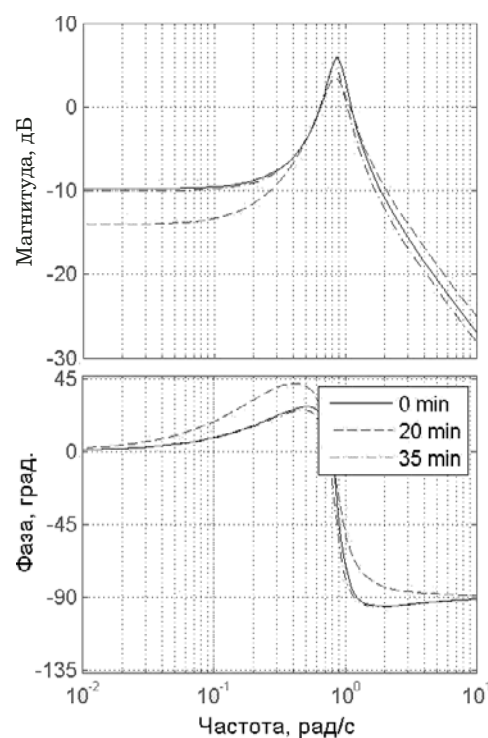


Рис. 4. Диаграмма Боде

Fig. 4. The Bode diagram

На следующем этапе исследования строили диаграмму Боде (логарифмическую амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики (рис. 4).

Динамический коэффициент трения вычисляли по формуле

$$k_d = A_{\text{выход}}/A_{\text{вход}} = 10^{A/20},$$

где $A = 20 \lg(A_{\text{выход}}/A_{\text{вход}})$ — установившееся значение магнитуды АЧХ.

Далее оценивали меру шероховатости фрикционных поверхностей с использованием явной зависимости $R = R(\omega_0)$.

Таблица 1. Расчетные характеристики моделей в пространстве состояний**Table 1.** Calculated characteristics of the state-space models

Характеристики	Трибопара		
	Алюминий – алюминий	Сталь – оптическое стекло	Алюминий – сталь
Матрица системы в пространстве состояний	$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,57 & -1,44 \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,19 & -0,47 \end{bmatrix}$	$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,51 & -1,37 \end{bmatrix}$
Вектор коэффициентов управления	$B = [-0,42; -0,26]$	$B = [0,32; 0,06]$	$B = [-0,43; -0,24]$
Вектор коэффициентов смещения		$C = [1; 0]$	
Вектор коэффициентов обратной связи		$D = [0]$	
Модель в пространстве состояний		$\dot{x} = Ax + Bu; y = Cx + Du$	

Примечание. x — входная величина; y — выходная величина.

Таблица 2. Характеристики трибологического взаимодействия, полученные с помощью установки «Трибал-Т»**Table 2.** Characteristics of the tribological interaction obtained on a Tribal-T friction machine

Интервал измерений, мин	Частота собственных колебаний ω_0 , 1/с	Коэффициент демпфирования n	Динамический коэффициент трения k_d
0	0,87	0,57	0,32
0 – 20	0,82	0,56	0,2
20 – 35	0,88	0,58	0,32

В табл. 1 представлены расчетные характеристики моделей в пространстве состояний. В последней ее строке — используемая модель. В рассматриваемом случае мы ограничились двумя уравнениями Коши. Поэтому в матрице (2×2) исследуемой динамической системы вторая строка — это физические параметры: n — коэффициент демпфирования и ω_0 — частота собственных колебаний модели. Частота ω_0 однозначно связана с мерой шероховатости [9]

$$R = \sqrt{\frac{\left(\frac{\pi}{2}\right)^2 \left[\sqrt{\left(\frac{P}{EJ}\right)^2 + \frac{4\omega_0^2 a^2 \rho^2}{EJ}} - \frac{P}{EJ} \right]}{2\omega_0^2 a^2 \frac{\rho^2}{EJ}}},$$

где P — нагрузка; a — ширина поперечного сечения (при условии, что сечение стержня представляет собой квадрат); ρ — плотность материала образца; P/EJ — приведенное давление (E — модуль упругости, J — момент инерции).

В табл. 2 приведены характеристики трибологических пар, рассчитанные в процессе проведения экспериментов с помощью установки «Трибал-Т».

Выводы

Разработан прибор возвратно-поступательно-го действия, способный в режиме реального времени оценивать качество взаимодействующих поверхностей различных материалов. Машина трения «Трибал-Т» позволяет в режиме реального времени исследовать трибологические характеристики материалов: динамический коэффициент трения, коэффициент демпфирования и меру шероховатости поверхности. Устройство показало эффективность при мониторинге состояния трибоузлов машин и механизмов. Возможности работы машины могут быть использованы для дальнейших исследований в других областях: микромеханике [11], динамике фрикционного взаимодействия в пленочных покрытиях и биотканях [12 – 16].

ЛИТЕРАТУРА

1. Крюни Н. К., Мингажев А. Д., Новиков А. В., Бекишев Р. Р. Эксплуатационные свойства щеточного торцевого уплотнения лопатки турбины газотурбинных установок / Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 5. С. 36 – 37.
2. Korolev A. V., Korolev A. A. Friction Machine for Accelerated Wear Tests of Frictional Rolling Elements / Journal of Friction and Wear. 2017. Vol. 38. N 1. P. 77 – 81. DOI: 10.3103/S1068366617010068.
3. Makhkamov K. H. Energy Analysis of Wear of Sliding Friction Units / Journal of Friction and Wear. 2017. Vol. 38. N 2. P. 168 – 172. DOI: 10.3103/S1068366617020143.
4. Kozochkin M. P. Study of Frictional Contact during Grinding and Development of Phenomenological / Journal of Friction and Wear. 2017. Vol. 38. N 4. P. 333 – 337. DOI: 10.3103/S1068366617040067.
5. Markova L. V. Diagnostics of the Wear of Tribological Assemblies Using an Inductive Wear Debris Counter / Journal of Friction and Wear. 2018. Vol. 39. N 4. P. 265 – 273. DOI: 10.3103/S1068366618040104.
6. Доценко А. И., Буяновский И. А. Основы триботехники: Учебник. — М.: НИЦ ИНФРА-М, 2014. — 336 с.
7. Новиков А. В., Крюни Н. К., Мингажев А. Д., Бекишев Р. Р. Щеточное уплотнение для газодинамических установок / Сетевое издание «Нефтегазовое дело». 2014. № 4. С. 324 – 340.

8. Пат. 2600080C1 РФ, МПК G01N 3/56 (2006. 01). Устройство для исследования триботехнических характеристик материалов / Исмаилов Г. М., Тюрин А. Е., Власов Ю. А.; патентообладатель Томский государственный архитектурно-строительный университет (ТГАСУ). — № 2015138515/28; заявл. 09.09.2015; опубл. 20.10.2016.
9. **Nuzhdin K., Musalimov V. M.** The experimental determination of the bifurcation components of friction / *Procedia Engineering IET*. 2017. Vol. 199. P. 1478 – 1483. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.410.
10. **Печенко Р. В., Нuzhdin К. А., Абрамчук М. В., Мусалимов В. М.** Точностные характеристики машин трения возвратно-поступательного действия / *Известия вузов. Приборостроение*. 2019. Т. 62. № 5. С. 442 – 448. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-442-448.
11. **Korayem M. H., Hoshier A. K., Badrlou, Yoon S. J.** Modeling and simulation of critical force and time in 3D manipulations using rectangular, V-shaped and dagger-shaped cantilevers / *European Journal of Mechanics. A/Solids*. 2016. Vol. 59. P. 333 – 343. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2016.04.008.
12. **Cabboi A., Putelat T., Woodhouse J.** The frequency response of dynamic friction: enhanced rate-and-state models / *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016. Vol. 92. P. 210 – 236. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.03.025.
13. **Woodhouse J., McKay A., Putelat T.** Are there reliable constitutive laws for dynamic friction? / *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2015. Vol. 373. N 2051. P. 20140401 – 20140402. DOI: 10.1098/rsta.2014.0401.
14. **Weibing Teng, Xiangming Zhang, Valerie Merkle, Xiaoyi Wu.** Deformation-induced mechanical anisotropy of gelatin films / *Extreme Mechanics Letters*. 2016. Vol. 7. P. 18 – 26. DOI: 10.1016/j.eml.2016.02.010.
15. **Putelat T., Dawes J. H. P.** Steady and transient sliding under rate-and-state friction / *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2015. Vol. 78. P. 70 – 93. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.01.016.
16. **Sacks M. S., Sun W.** Multiaxial Mechanical Behavior of Biological Materials / *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2003. Vol. 5. P. 251 – 284. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.5.011303.120714.
4. **Kozochkin M. P.** Study of Frictional Contact during Grinding and Development of Phenomenological / *Journal of Friction and Wear*. 2017. Vol. 38. N 4. P. 333 – 337. DOI: 10.3103/S1068366617040067.
5. **Markova L. V.** Diagnostics of the Wear of Tribological Assemblies Using an Inductive Wear Debris Counter / *Journal of Friction and Wear*. 2018. Vol. 39. N 4. P. 265 – 273. DOI: 10.3103/S1068366618040104.
6. **Dotsenko A. I., Buyanovskiy I. A.** Fundamentals of tribotechnics. Textbook. — Moscow: Nits Infra-M, 2014. — 336 p. [in Russian].
7. **Novikov A. V., Krioni N. K., Mingazhev A. D., Bekishev R. R.** Rush seals for gas-dynamic installations / *Set. Izd. "Neftegaz. Delo"*. 2014. N 4. P. 324 – 340 [in Russian]
8. RF Pat. RU2600080C1. MPK G01N 3/56 (2006.01). Device for investigating tribotechnical characteristics of materials / Ismailov G. M., Turin A. E., Vlasov Yu. A. Patent holder: Tomsk State University of Architecture and Building (TSUAB). — N 2015138515/28. appl. 09.09.2015; publ. 10.20.2016 [in Russian].
9. **Nuzhdin K., Musalimov V. M.** The experimental determination of the bifurcation components of friction / *Procedia Engineering IET*. 2017. Vol. 199. P. 1478 – 1483. DOI: 10.1016/j.proeng.2017.09.410.
10. **Pechenko R. V., Nuzhdin K. A., Abramchuk M. V., Musalimov V. M.** Accuracy characteristics of friction machines of reciprocal action / *Izvestiya vuzov. Priborostroenie*. 2019. Vol. 62. N 5. P. 442 – 448. DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-5-442-448 [in Russian].
11. **Korayem M. H., Hoshier A. K., Badrlou, Yoon S. J.** Modeling and simulation of critical force and time in 3D manipulations using rectangular, V-shaped and dagger-shaped cantilevers / *European Journal of Mechanics. A/Solids*. 2016. Vol. 59. P. 333 – 343. DOI: 10.1016/j.euromechsol.2016.04.008.
12. **Cabboi A., Putelat T., Woodhouse J.** The frequency response of dynamic friction: enhanced rate-and-state models / *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2016. Vol. 92. P. 210 – 236. DOI: 10.1016/j.jmps.2016.03.025.
13. **Woodhouse J., McKay A., Putelat T.** Are there reliable constitutive laws for dynamic friction? / *Philosophical Transactions: Mathematical, Physical and Engineering Sciences (Series A)*. 2015. Vol. 373. N 2051. P. 20140401 – 20140402. DOI: 10.1098/rsta.2014.0401.
14. **Weibing Teng, Xiangming Zhang, Valerie Merkle, Xiaoyi Wu.** Deformation-induced mechanical anisotropy of gelatin films / *Extreme Mechanics Letters*. 2016. Vol. 7. P. 18 – 26. DOI: 10.1016/j.eml.2016.02.010.
15. **Putelat T., Dawes J. H. P.** Steady and transient sliding under rate-and-state friction / *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 2015. Vol. 78. P. 70 – 93. DOI: 10.1016/j.jmps.2015.01.016.
16. **Sacks M. S., Sun W.** Multiaxial Mechanical Behavior of Biological Materials / *Annual Review of Biomedical Engineering*. 2003. Vol. 5. P. 251 – 284. DOI: 10.1146/annurev.bioeng.5.011303.120714.

REFERENCES