

Е. З. Шнеерсон

О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ФРИКЦИОННЫХ СИЛ В КОНТАКТИРУЮЩИХ ПАРАХ И ПРИМЕРАХ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТРЕНИЯ В ДИНАМИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

E. Z. Schneerson

ABOUT THE PHYSICAL NATURE OF FRICTION IN CONTACTING PAIRS AND EXAMPLES OF THE FRICTION MODELLING IN DYNAMIC SYSTEMS

Рассмотрены исследования по физической природе трения между взаимодействующими твердыми телами. Указано, что динамическая модель трения основана на связи между тангенциальными и нормальными микроперемещениями. Показано, что построение стохастической модели трения сопряжено со значительными сложностями. Обоснована целесообразность введения упрощенных эффективных характеристик трения. Рассмотрены динамические системы, в которых фрикционные процессы играют доминирующую роль и приводят к нестандартным эффектам.

Ключевые слова: *силы трения, трибология, контактные задачи, стохастическая модель, детерминированная модель, чувствительность, самотормозящиеся системы, автоколебания.*

The physical nature of external friction is considered. It's argued, that the dynamic model of friction is based on the interaction between tangential and normal micromoves. It's explained, that the stochastic model of friction is too complicated. The preference of the simplified effective friction characteristics is substantiated.

Keywords: *friction, tribology, contacting problems, stochastic model, determinate model, sensitivity, self-locking systems, auto-oscillations.*

Наука о внешнем трении твердых тел своим развитием во многом обязана основополагающим трудам И.В. Крагельского и его учеников [21]. Из зарубежных исследований выделим работу [16]. Поскольку истинная природа трения определяется молекулярными процессами, то важное значение имеют фундаментальные исследования в области так называемого *граничного* трения [4]. В последнее время учение о трении (или трибология) тесно связано с теорией контактных задач. При этом активно используются методы решения неклассических задач теории упругости [10, 20].

Современные подходы к изучению взаимодействия соприкасающихся тел базируются на представлении о дискретности контакта. При этом учитываются как макроотклонения формы, так и микрорельеф поверхности. Несмотря на весьма разнообразную структуру реальных микронеровностей, при аналитическом описании

контактирующих участков приходится задаваться геометрически правильной формой поверхностей. Выбор формы обусловлен возможностью использования решений контактных задач теории упругости и пластичности [2, 14–15].

В силу чрезвычайного многообразия микронеровностей наиболее корректной следовало бы считать модель, учитывающую стохастическую природу их распределения. Однако из-за отсутствия сколь-либо достоверной исходной информации построение глобальной стохастической модели контакта пока не представляется возможным. Поэтому в практике используются частные стохастические модели, разработанные с учетом специфики конкретных задач.

Важное значение при углубленном исследовании процесса трения имеет оценка влияния на этот процесс не только тангенциальных, но и нормальных перемещений. Установлено, что в зоне контакта осуществляется координатная связь между нормальным и касательным контурами, что соответствует представлению о динамической характеристике трения. Этот подход обсуждается в работах [5, 17, 20]. Показано, что механизм формирования контактных неконсервативных сил в нестационарных режимах движения связан с образованием и разрушением фрикционных зон между поверхностями.

Из изложенного следует, что использование уточненных моделей процесса трения при решении конкретных динамических задач сопряжено с принципиальными аналитическими и вычислительными трудностями. Поэтому в значительном большинстве работ по теоретической и прикладной механике принимаются представления об абсолютно твердых контактирующих телах и упрощенная модель трения, основанная на введении некоторой эффективной характеристики — коэффициента трения [7, 9, 12–13].

В этой связи необходимо отметить, что мера упрощения при выборе модели должна соответствовать главному предназначению — четкому выявлению *глобальных* (определяющих) свойств исследуемой системы. Применительно, например, к так называемым *самотормозящимся системам*, получившим широкое применение в машиностроении, системах управления, радиоастрономических установках и т.п., такими свойствами являются эффекты статического, динамического и ударного самоторможения или заклинивания [5, 7–8, 18]. Опыт аналитических исследований показывает, что излишнее усложнение и детализация модели трения приводят в указанном случае только к «размыванию» рельефных качественных характеристик движения и эффектов, не доставляя новой полезной информации. Это в полной мере относится к упомянутым ранее стохастическим моделям, применение которых обосновывается попытками учесть экспериментальный разброс характеристик трения. В качестве контрпримера укажем важнейшую для практики задачу о движении и точном позиционировании тяжелых станков и уникальных радиоастрономических установок. В ряде случаев такие станки и радиотелескопы выполняются в единственных экземплярах, что полностью исключает возможность осуществления статической выборки. В силу изложенных соображений движение таких систем, ограниченное неидеальными связями, исследуется на основе *детерминированных* моделей с фиксированными в условиях конкретных задач характеристиками трения [1, 5].

Очевидно, что движения реальных систем не описываются с абсолютной точностью решениями соответствующих дифференциальных уравнений. Одной из причин

указанного является нестабильность параметров динамических систем. Применительно к рассматриваемой тематике большое значение приобретает анализ влияния изменения характеристик трения на динамические свойства системы. Если это влияние достаточно мало, то детерминированная модель трения является вполне достоверной. В противном случае приходится применять более сложные фрикционные модели.

Указанная дилемма может быть разрешена в рамках методов теории чувствительности [11, 19]. При этом используются так называемые функции чувствительности. Фактически они представляют собой производные от фазовых переменных, определяющих состояние динамической системы, по параметрам, характеризующим интенсивность трения. Такими параметрами могут быть, например, угол или коэффициент трения скольжения. Заметим, что предпочтительней пользоваться не абсолютными, а относительными функциями чувствительности, которые являются более информативными.

В работе [6] построен алгоритм отыскания чувствительности параметров периодического движения одной существенно нелинейной динамической системы к малым изменениям характеристик трения. На основе численных расчетов показано, что эта система в рамках периодических режимов является малочувствительной, то есть «грубой по Андронову» [3]. Следовательно, влияние нестабильности фрикционных свойств на движение в данном случае несущественно и детерминированная модель трения вполне корректна.

В ряде систем, содержащих фрикционные контакты, возникает необходимость в учете зависимости силы трения от скорости относительного перемещения соприкасающихся поверхностей. Наличие участков с падающей характеристикой трения может явиться причиной возникновения так называемых фрикционных автоколебаний (как релаксационных, так и квазигармонических). Из сравнительно недавних исследований выделим обнаруженный автором эффект виброударных автоколебаний, вызванных так называемым стесненным взаимодействием контактирующих элементов при наличии *ударного трения* [5, 18].

Литература

1. *Аверченков В.И., Федоров В.П., Хейфец М.Л.* Основы математического моделирования технических систем. — М.: Флинта, 2011. — 271 с.
2. *Александров А.В., Потапов В.Д.* Основы теории упругости и пластичности. — М.: Высшая школа, 1990. — 398 с.
3. *Андронов А.А., Витт А.Л., Хайкин С.Э.* Теория колебаний. — М.: Физматгиз, 1959. — 915 с.
4. *Ахматов А.С.* Молекулярная физика граничного трения. — М.: Физматгиз, 1963. — 472 с.
5. *Вейц В.Л., Васильков Д.В., Гидаспов И.А., Шнеерсон Е.З.* Динамика приводов технологических машин с самотормозящимися механизмами. — СПб.: Изд-во СПб ИМАШ, 2003. — 162 с.
6. *Вейц В.Л., Шнеерсон Е.З.* Исследование чувствительности периодического режима движения машинного агрегата с самотормозящимся механизмом // Тр. СЗПИ: Машиностроение. — Л.: Изд-во СЗПИ, 1974. №24. — С. 52–58.
7. *Веретенников В.Г., Сеницын В.А.* Теоретическая механика (дополнения к общим разделам). — М.: Физматлит, 2006. — 416 с.
8. *Гончаров А.А., Гончаров Ан.А.* Самоторможение клиновых механизмов свободного хода // Вест. машиностр. 2016. № 2. — С. 6–11.

9. *Гончаров А.А.* Самотормозящиеся клиновые механизмы свободного хода. — Волгоград: Изд-во ВолгГТУ, 2015. — 199 с.
10. *Джонсон К.* Механика контактного взаимодействия. — М: Мир, 1986. — 510 с.
11. *Измайлов Л.Ф.* Чувствительность в оптимизации. — М.: Физматлит, 2006. — 472 с.
12. *Маркеев А.П.* Теоретическая механика. — М.: ЧеРо, 1999. — 572 с.
13. *Мышкин Н.К., Петроковец М.И.* Трение, смазка, износ: физические основы и технические приложения трибологии. — М.: Физматлит, 2007. — 368 с.
14. *Подбедра Б.Е.* Численные методы в теории упругости и пластичности. — М.: Изд-во МГУ, 1995. — 336 с.
15. *Подбедра Б.Е., Георгиевский Д.В.* Основы механики сплошной среды. — М.: Физматлит, 2006. — 272 с.
16. *Польцер Г., Майснер Ф.* Основы трения и изнашивания. — М.: Машиностроение, 1984. — 264 с.
17. *Чичинадзе А.В., Берлинер Э.М., Браун Э.Д., Буше Н.А.* Трение, износ и смазка (трибология и триботехника). — М.: Машиностроение, 2003. — 575 с.
18. *Шнеерсон Е.З.* О стесненных ударных взаимодействиях в существенно нелинейных динамических системах // Тр. XVIII Межд. симпоз. «Динамика виброударных (сильно нелинейных систем)». — М.: ИМАШ РАН, 2015. — С. 311–315.
19. *Улахович Д.А.* Основы теории линейных электрических цепей. — СПб.: БХВ-Петербург, 2009. — 816 с.
20. *Holmberg K., Matthews A.* Coating Tribology: properties, Mechanisms, Techniques and Applications in Surface Engineering. — Amsterdam: Elsevier, 2009. — 576 p.
21. *Kragelskii I.V., Dobychin M.N., Kopalov V.S.* Friction and Wear Calculation Methods. — Oxford: Pergamon Press, 1982. — 464 p.