

УДК 53.072, 531.43, 539.62

## Анализ упругих волн, генерируемых при контактном взаимодействии. Компьютерное моделирование

А.Ю. Смолин<sup>1,2</sup>, С.А. Добрынин<sup>1</sup>, С.Г. Псахье<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup> Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск, 634021, Россия<sup>2</sup> Томский государственный университет, Томск, 634050, Россия<sup>3</sup> Томский политехнический университет, Томск, 634050, Россия

Упругие волны, генерируемые при контактном взаимодействии, рассматриваются как источник информации о процессе деформации и разрушения в зоне контакта. Развита методика численного анализа упругих волн на основе обработки зависимостей от времени таких величин, как компоненты скорости, давление и интенсивность напряжений, регистрируемых в определенной точке тела. Показано, что вследствие динамической природы процесса трения для анализа регистрируемых сигналов даже в установившемся режиме, помимо преобразования Фурье, необходимо применять средства частотно-временного анализа.

*Ключевые слова:* упругие волны, фурье-анализ, вейвлет-анализ, трение, компьютерный эксперимент, метод частиц

## Analysis of elastic waves generated at contact interaction. Computer simulation

A.Yu. Smolin<sup>1,2</sup>, S.A. Dobrynin<sup>1</sup> and S.G. Psakhie<sup>1,2,3</sup><sup>1</sup> Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk, 634021, Russia<sup>2</sup> Tomsk State University, Tomsk, 634050, Russia<sup>3</sup> Tomsk Polytechnic University, Tomsk, 634050, Russia

Elastic waves generated at contact interaction provide information on deformation and fracture in the contact area. Elastic waves are numerically analyzed by means of the processing of time dependences of velocity components, pressure and stress intensity recorded at a certain site of a solid. On account of the dynamic nature of a friction process the time-frequency analysis apart from the Fourier transform should be used to analyze recorded signals even under steady-state conditions.

*Keywords:* elastic waves, Fourier analysis, wavelet analysis, friction, computer experiment, particle method

### 1. Введение

Трение представляет собой исключительно сложное динамическое явление. Постоянное измерение коэффициента трения скольжения показывает, что эта характеристика пары не всегда является постоянной величиной даже при установившемся режиме процесса, а может изменяться, достигая максимумов и минимумов [1, 2]. Проявлением динамической природы трения является также возникновение акустических колебаний, которые играют важную роль в поведении взаимодействующих тел, в том числе в их изнашивании [3]. Во многих работах авторы пытаются исследовать механизмы неустойчивости коэффициента трения, в том числе рассматривать сложную картину возникновения акустических колебаний при трении. В частности, источниками возникновения упругих волн считаются упругие взаи-

модействия областей локального контакта [4], пластическая деформация и разрушение в областях взаимодействия микрошероховатостей [5, 6], образование и отделение частиц износа [7] и т.д.

Отметим, что подавляющее число публикаций на тему колебаний при трении связано с технологическими проблемами, обусловленными неравномерностью движения в механизмах или экологическими проблемами, вызываемыми специфическим скрипом при трении. При этом эксперимент показывает, что уменьшение амплитуды акустических колебаний в процессе трения определенными демпферами может приводить к изменению коэффициента трения [8, 9] и интенсивности изнашивания. Например, в [10] сообщается, что срок службы деталей узлов трения можно повысить в несколько раз только за счет гашения акустических колеба-

ний демпферами, нанесением поверхностных слоев или за счет подбора геометрии деталей таким образом, чтобы возникающие при трении колебания опасной частоты быстро затухали.

Таким образом, прослеживается взаимосвязь между процессами, протекающими в зоне контакта, и упругими волнами, генерируемыми при контактном взаимодействии и распространяющимися в контактирующих телах. Это позволяет предположить, что на основании изучения спектров акустических колебаний, генерируемых при трении, можно судить об особенностях процессов, происходящих в зоне реального контакта непосредственно в ходе испытаний [11–13]. Отметим, что в большинстве случаев при экспериментальном изучении трения и изнашивания все измерения и наблюдения участков материала непосредственно в зоне взаимодействия производят уже после завершения испытания. Поэтому некоторые результаты таких исследований могут представлять собой следствие не самого процесса, а его прекращения.

Очевидно, что помимо экспериментального изучения зависимостей между параметрами акустической эмиссии при трении и характеристиками, а также стадиями самого процесса взаимодействия в областях реального контакта, необходимо проводить компьютерное моделирование этих явлений, поскольку оно дает возможность изучать эти сложные процессы непосредственно в динамике.

В работах [14, 15] было показано, что для моделирования контактного взаимодействия весьма эффективным является применение комбинированного дискретно-континуального подхода [16], когда узкая зона контакта взаимодействующих тел описывается дискретным методом подвижных клеточных автоматов, а остальной материал, который деформируется упруго, — численными методами континуальной механики. Моделирование в рамках такого подхода процесса трения на уровне пятна контакта, сопровождающегося генерацией и распространением упругих волн, показало, что фурье-анализ регистраций интенсивности напряжений для таких задач позволяет выявить различные режимы формирования слоя трения, определяемые правилами взаимодействия дискретных элементов в зоне контакта [15].

Целью данной работы является развитие методики анализа упругих волн, распространяющихся в моделируемом материале, и получение на основе этого анализа информации об их источниках, а также применение этого подхода для исследования частотно-временных характеристик упругих волн, генерируемых в модельной паре трения.

## 2. Регистрация распространения упругих волн в материале

Для исследования одиночных волн, распространяющихся от точечного источника на свободной границе,

методом подвижных клеточных автоматов моделировался плоский прямоугольный образец ( $0.2 \times 0.1$  м) из стали ( $\rho = 7800$  кг/м<sup>3</sup>,  $v_L = 5.81$  км/с,  $v_S = 3.21$  км/с), представленный на рис. 1. Размер автоматов составлял 0.001 м. В качестве «датчика» использовалась пара автоматов, для которых записывались такие параметры, как  $V_X$  — составляющая скорости вдоль оси  $X$ ;  $V_Y$  — составляющая скорости вдоль оси  $Y$ ;  $I$  — интенсивность тензора напряжений;  $P$  — давление. «Датчик» (показан кружком на рис. 1) располагался на достаточном расстоянии от источника, где успевали сформироваться и разделиться продольная  $L$  и поперечная  $S$  волны.

Нагрузка прикладывалась путем задания для автомата, расположенного на верхней границе (показан на рис. 1 стрелкой), скорости, направленной по нормали к поверхности образца. Временная зависимость скорости источника (начальный сигнал) имела вид синусоиды

$$v_N(t) = \begin{cases} V_0 \sin(2\pi t/T) & \text{при } t \leq T, \\ 0 & \text{при } t > T, \end{cases} \quad (1)$$

где  $V_0 = 50$  м/с — амплитуда источника;  $T = 4.3$  мкс — время нагружения. Графически источник и его спектр Фурье имеют вид, представленный на рис. 2. Учитывая, что шаг интегрирования по времени выбирается из условия:  $v_L \Delta t \leq \Delta x$ , где  $v_L$  — скорость продольного звука, а  $\Delta x$  — размер автомата, то  $\Delta t = 0.02$  мкс и частота Найквиста для данной системы составляет 25 МГц. Частота сигнала (1)  $\approx 0.2324$  МГц. Ее можно легко увидеть как первый максимум на спектре сигнала (рис. 2, б).

В работе [16] в качестве источника упругих волн использовался колоколообразный сигнал. Для него характерна плавность в нарастании скорости и ее гашении. Однако при такой нагрузке сохраняется деформация в точке приложения. При длительном колебании выбранной точки результирующая деформация может быть значительной, поэтому в этом случае лучше использовать знакопеременную функцию скорости от времени, начинающуюся с нулевого значения. Кроме того, стоит отметить, что даже для колоколообразного сигнала распреде-

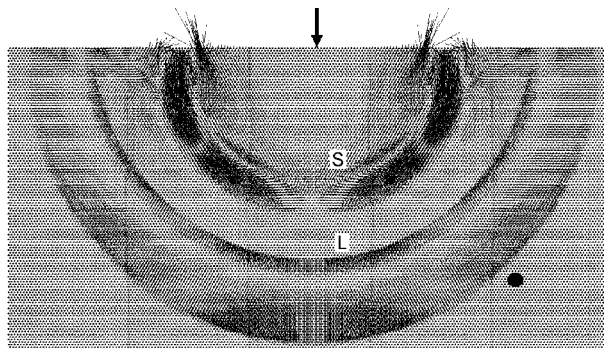


Рис. 1. Образец для моделирования упругих волн от точечного источника. Буквами обозначены основные типы упругих волн, кружком — расположение «датчика»

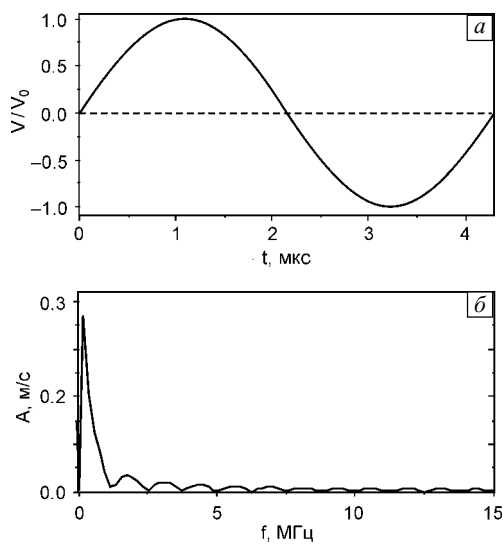


Рис. 2. Начальный сигнал скорости в точечном источнике (а) и его спектр Фурье (б)

ление скорости вдоль распространения упругой волны будет таким же только в случае плоской волны. В случае точечного источника волна будет состоять из области сжатия и следующей за ней области разрежения, то есть распределение скоростей в продольной волне будет знакопеременным [17].

Рассмотрим данные регистрации «датчиком» выбранных величин в результате расчета распростране-

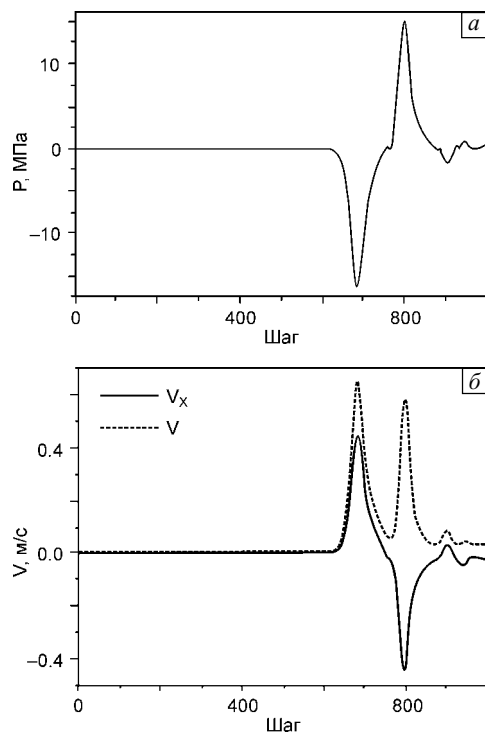


Рис. 3. Зависимости давления (а), а также  $x$ -компоненты скорости  $V_x$  и модуля скорости  $V$  (б) от номера шага интегрирования

ния упругих волн от точечного источника вида (1). На рис. 3 представлены зависимости давления  $P$  и скорости  $V$  в датчике от номера шага интегрирования. Следует отметить, что  $x$ -компонента скорости ведет себя подобно давлению, но зависимости от времени обеих величин далеки по форме от исходного сигнала.

Известно, что после отражения от границы волна в численных расчетах немного искажается [18]. На рис. 4 представлены записи давления в том же датчике при прохождении через него как прямой, так и отраженной продольной волны. Видно, что амплитуда отраженной волны меньше, чем прямой. На фурье-спектре этой зависимости присутствует «шум». Однако если посмотреть спектры сигналов отдельно для прямой и отражен-

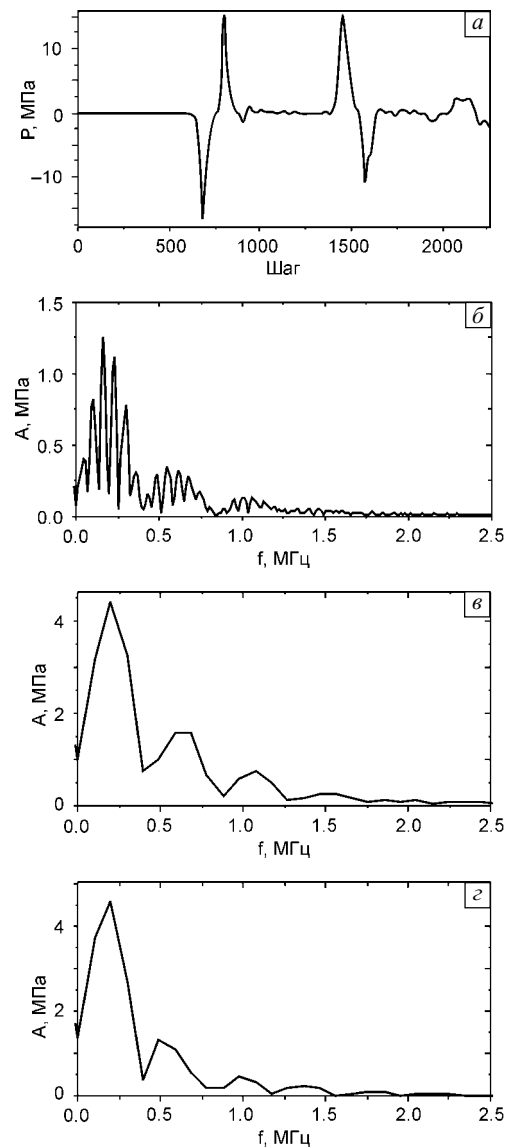


Рис. 4. Изменение давления (а) при прохождении прямой и отраженной продольных волн. Фурье-спектры полной регистрации (б) и отдельно для сигналов в прямой (в) и отраженной (г) волнах

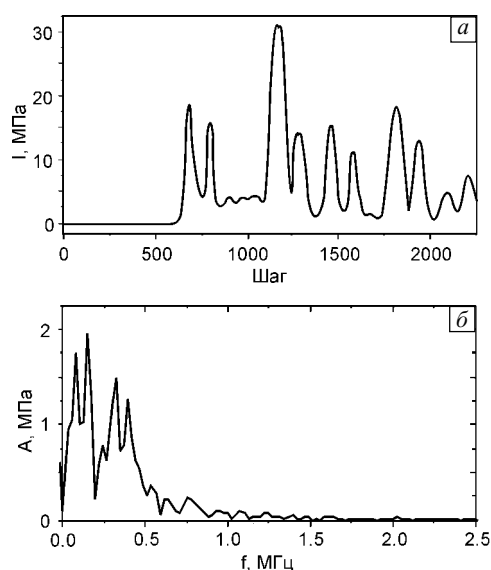


Рис. 5. Интенсивность напряжений (а) при прохождении продольной и поперечных волн и ее фурье-спектр (б)

ной волны (рис. 4, в, г), то можно отметить, что максимумы на их спектрах почти не изменили своего положения.

Интенсивность напряжений (рис. 5, а) показывает прохождение как продольной, так и поперечной волны. Отметим, что подобно интенсивности напряжений ведет себя модуль скорости (рис. 3, б). Поскольку интенсивность напряжений определяется квадратами главных напряжений [19], то она является положительной величиной, а частота ее колебаний при прохождении волны сжатия в два раза больше, чем частота колебаний давле-

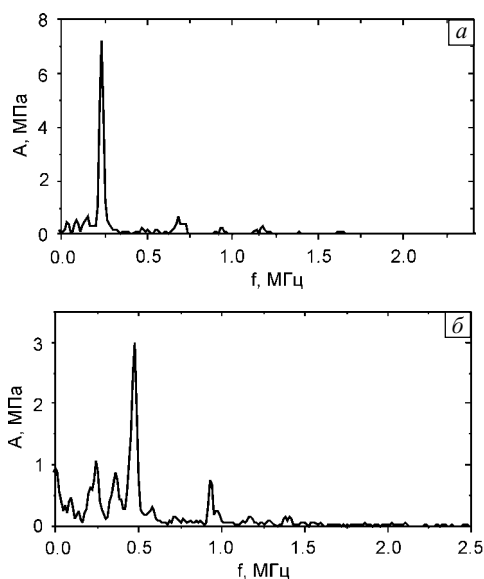


Рис. 6. Фурье-спектры регистраций давления (а) и интенсивности напряжений (б) при непрерывном источнике упругих волн

ния [20]. На фурье-спектре данной зависимости (рис. 5, б) частота, соответствующая продольной волне, четко просматривается в виде второго раздвоенного пика. Первый пик (тоже раздвоенный) соответствует прохождению поперечной волны, он находится на частоте примерно в два раза меньшей, чем частота для зависимости давления при прохождении продольной волны. Это объясняется тем, что скорость поперечной волны в данном материале примерно в два раза меньше, чем продольной, а длины этих волн приблизительно одинаковы.

Теперь рассмотрим случай не кратковременного, а постоянного источника, когда синусоида, изображенная на рис. 2, продлевалась на все время расчета (20 периодов). Отметим, что амплитуда первого пика на спектре Фурье такого сигнала будет больше, а амплитуда боковых лепестков, наоборот, меньше. В этом случае от источника будут постоянно распространяться новые волны, после отражения от границ они накладываются на последующие. Поле векторов скоростей в этом случае является исключительно сложным, и анализировать его без привлечения специальных математических методов невозможно. В случае одиночного импульса длину упругой волны и ее частоту (скорость распространения) достаточно легко определить по полю векторов скоростей (рис. 1).

Фурье-спектры зависимостей давления и интенсивности напряжений от времени показаны на рис. 6. Видно, что пики, соответствующие основным частотам, стали более узкими. Причем для интенсивности напряжений пик, соответствующий прохождению продольных волн, имеет больший максимум по сравнению с поперечными волнами. На этом графике просматривается также вторая гармоника для продольных волн. Полученный результат говорит о возможности того, что в случае контактного взаимодействия, когда имеется множество источников волн и все они действуют непрерывно, анализ спектров Фурье позволит выявить основную частоту, на которой происходит генерация упругих волн в области реального контакта.

### 3. Анализ упругих волн в модельной паре трения

На рис. 7 представлено схематическое изображение зоны контакта при трении двух поверхностей. Известно, что области реального контакта составляют всего несколько процентов от номинальной поверхности взаимодействующих тел [21], эти области выделены на рис. 7 квадратами. Для численного моделирования процессов трения и износа необходимо принять во внимание характерный масштаб, на котором в поверхностных слоях контактирующих тел развиваются механизмы, определяющие эти процессы [14]. В данной работе проводилось моделирование некоторой части реального контакта, находящейся между вертикальными линиями,

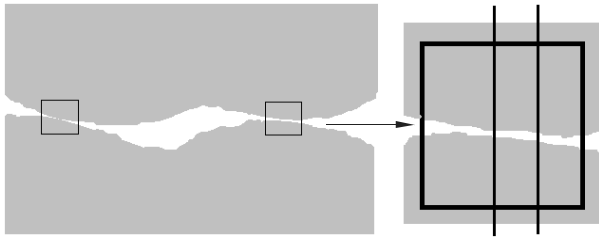


Рис. 7. Схема зоны контакта при трении и область исследования

показанными в правой части рис. 7, и относящейся к наноскопическому масштабному уровню. Выбранная область исследования позволила применить периодические условия вдоль направления движения трущихся тел и несколько упростить задачу моделирования.

Моделирование трения производилось по схеме, предложенной в [14]. Зона трения описывалась в рамках метода подвижных клеточных автоматов, остальная часть взаимодействующих тел (с целью уменьшения требуемых вычислительных ресурсов) описывалась методом механики сплошной среды. Подробная процедура совмещения методов механики сплошных сред с дискретным методом подвижных клеточных автоматов представлена в [16].

Структура расчетной области и используемая схема нагружения представлены на рис. 8. Здесь область I моделировалась методом подвижных клеточных автоматов, а область II — сеточным методом. Для уменьшения вертикальных размеров рисунка показана только часть сетки. Кругом в области I показано положение «датчика» для регистрации упругих волн. На внешних поверхностях блоков (соответственно верхней для верхнего блока и нижней для нижнего) задавалась горизонтальная скорость  $V$ , постепенно наращиваемая от 0 до 10 м/с (рис. 8, б). Одновременно на верхнюю поверхность

действовало давление, наращиваемое до максимальной величины  $P_m = 127.5$  МПа. Нижняя поверхность была закреплена по оси  $Y$ . В горизонтальном направлении задавались периодические граничные условия. Диаметр автомата равен 2.5 нм, шаг сетки — 10 нм.

Первоначально в области контакта задавалась некоторая шероховатость взаимодействующих поверхностей. На рис. 9 представлены три характерных образца исследуемых пар трения. Образцы на рис. 9, а, б имели одинаковую длину 450 нм, но разный исходный профиль взаимодействующих поверхностей. Основное отличие состояло в том, что в одном образце неровности имели два максимума и два минимума, а в другом — таких неровностей было три, при этом их высота была меньше. Третий образец по длине был в два раза больше первых двух и имел профиль поверхности, соответствующий образцу на рис. 9, б.

Регистрация упругих волн проводилась по схеме, изложенной выше. Преобразование Фурье строилось не по всей выборке данных. Первые 50 000 записей, которые соответствовали режиму установления нагружения (плавного нарастания скорости и давления), отбрасывались. В течение этого времени также происходит «притирка» в области контакта, сопровождающаяся значительным шумом в данных «датчика».

Для образцов, представленных на рис. 9, спектры Фурье для регистрируемых величин приведены на рис. 10. Отметим, что спектры, построенные по данным интенсивности напряжений и давления, качественно соответствуют спектрам экспериментальных регистраций звука, возникающего при трении скольжения стали Гадфильда, выполненного по схеме «вал — втулка» [9]. Для всех модельных образцов основные пики на спектрах совпадают, однако имеется некоторое отличие в деталях. Схожесть спектров обусловлена тем, что для всех образцов после установления процесса взаимодействия об-

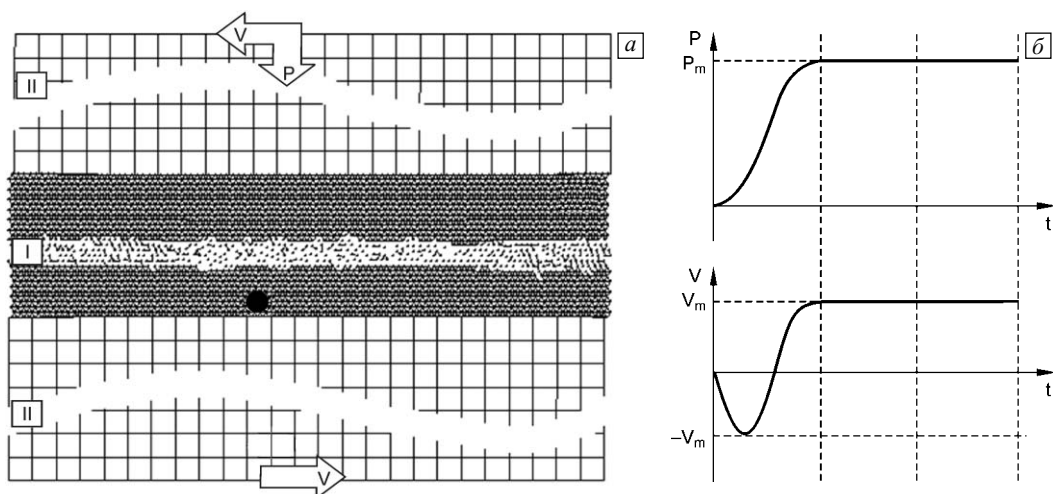


Рис. 8. Структура (а) и схема нагружения моделируемой пары трения (б)

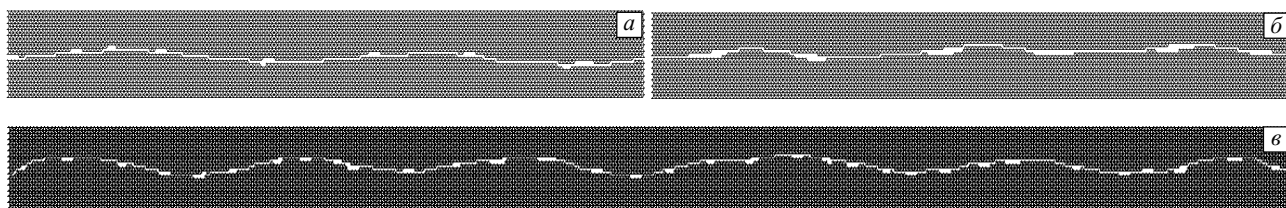


Рис. 9. Исходные образцы пар трения (показана только область подвижных клеточных автоматов)

ласть «квазижидкого» слоя (представляющая собой область автоматов, не связанных ни с одним из блоков на рис. 8, а) имела одинаковые размеры. Для того чтобы понять и объяснить их отличия, нужно идентифицировать все пики, присутствующие на спектрах.

Для начала определим собственные частоты моделируемой системы. В случае плоского образца мы фактически имеем две «полосы», у которых один край движется с постоянной скоростью, а второй свободен. Их частоты можно определить по аналогии с балкой, закрепленной на одном конце [22], т.е. по формуле  $p_k = v(k - 0.5)/2l$ , где  $v$  — скорость волны, а  $l$  — высота «полосы». Скорость поперечной волны звука  $v_s = 3.19$  км/с, высота  $l = 2.578 \cdot 10^{-7}$  м. Следовательно, первая гармоника соответствует 3.09 ГГц, вторая — 9.28 ГГц и третья — 15.47 ГГц. Именно их мы и видим на спектре горизонтальной составляющей скорости.

В образце также распространяются продольные упругие волны. Скорость распространения продольных волн  $v_L = 5.81$  км/с. Следовательно, для таких волн

первая гармоника соответствует 5.63 ГГц, вторая — 16.9 ГГц и третья — 28.17 ГГц.

Поскольку на внешней поверхности верхнего блока задано только давление и для нее нет жесткого закрепления по оси  $Y$ , то собственные частоты для такой «полосы» определяются по аналогии со свободной балкой по формуле  $p_k = vk/2l$  [22]. Следовательно, для поперечных волн первая собственная частота верхнего блока составляет 6.19 ГГц, вторая — 12.37 ГГц, а третья — 18.56 ГГц. Для продольных волн первая собственная частота составляет 11.27 ГГц, вторая — 22.54 ГГц и третья — 33.81 ГГц. Гармоники более высоких порядков имеют маленькую амплитуду и слабо идентифицируются на фоне шума. Отметим, что пики на представленных спектрах не точно совпадают с расчетными значениями, поскольку трущиеся образцы изнашиваются (изменяется толщина «квазижидкого» слоя) и соответственно изменяются их геометрические размеры.

Следует отметить, что на всех спектрах присутствует низкая частота, связанная с шириной образца, значение

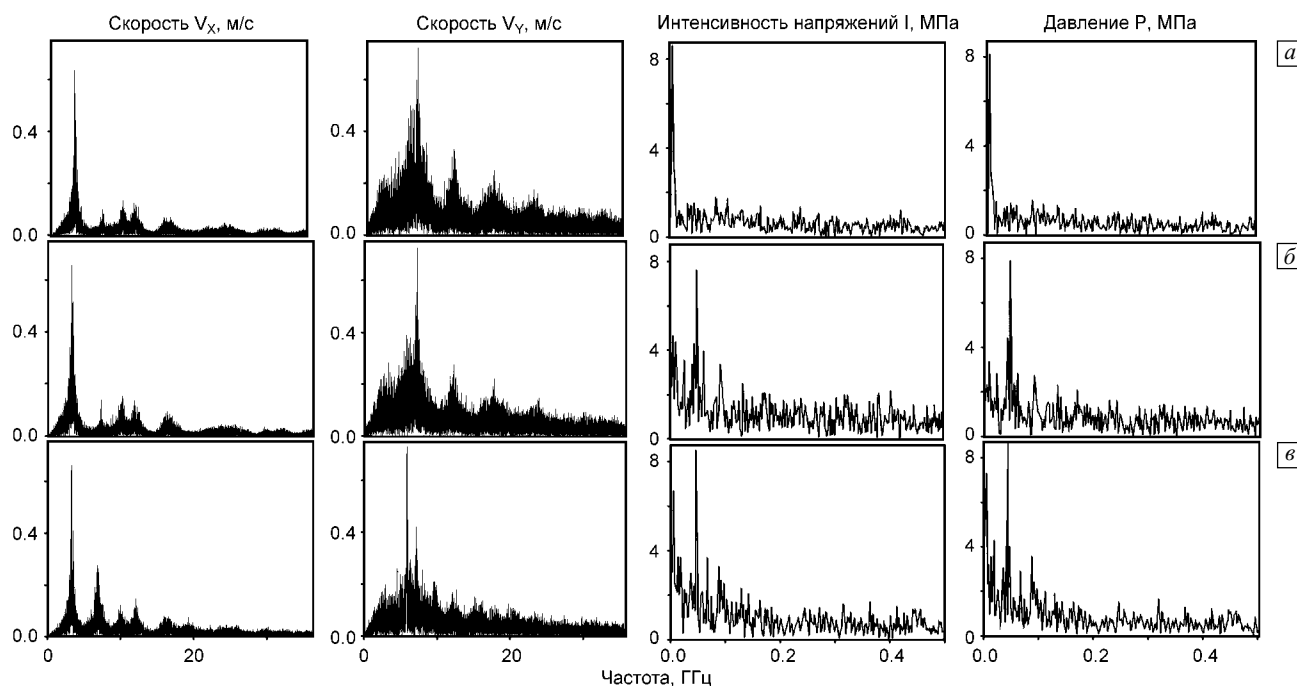


Рис. 10. Спектры Фурье регистрируемых величин. Ряды а–в соответствуют образцам на рис. 9

которой можно рассчитать по формуле  $f = 2V/s$ , где  $V = 10$  м/с — скорость движения каждого блока;  $s$  — ширина образца. Для образцов на рис. 9, а и б эта частота равна 44.44 МГц, а для образца на рис. 9, в — 22.22 МГц. Это частоты, связанные с геометрией расчетной области, а именно с размером вдоль направления, в котором заданы периодические условия. Амплитуда этих частот много меньше всех ранее рассмотренных, имеющих физический смысл. Упомянутые здесь, а также собственные частоты рассматриваемой системы являются очень высокими вследствие малых размеров расчетной области. В реальных трибосистемах соответствующие частоты будут на порядки меньше, однако для исследования общих закономерностей это не принципиально. Более того, в связи с бурным развитием в последнее время микроэлектронных механических систем даже рассматриваемые здесь размеры имеют определенный интерес.

Вообще говоря, приведенные спектры дают некоторые средние характеристики по всей выборке регистрируемых сигналов. Для того чтобы выяснить, являются

ли эти характеристики одинаковыми на всем протяжении процесса трения, рассмотрим спектры, построенные по данным в трех характерных временных интервалах (рис. 11). Видно, что амплитуда и положение некоторых пиков изменяются в зависимости от рассматриваемого временного интервала. Так, на спектрах  $V_X$  видно, что, например, пик, соответствующий собственной частоте 11.27 ГГц, с течением времени уменьшает свою амплитуду. На спектрах  $V_Y$  пик, соответствующий частоте 12.37 ГГц, на первом и третьем интервалах имеет равную амплитуду, а на втором — немного большую.

Для анализа изменения частот во времени часто используются такие методы, как оконный метод Фурье и вейвлет-преобразование [23]. В некотором приближении данные рис. 11 можно рассматривать как результат оконного преобразования Фурье с шириной окна 1.3 мкс и шагом 1.3 мкс.

В данной работе также применялось вейвлет-преобразование изучаемых сигналов. Для этого использовался пакет обработки сигналов Last Wave [24]. В качестве

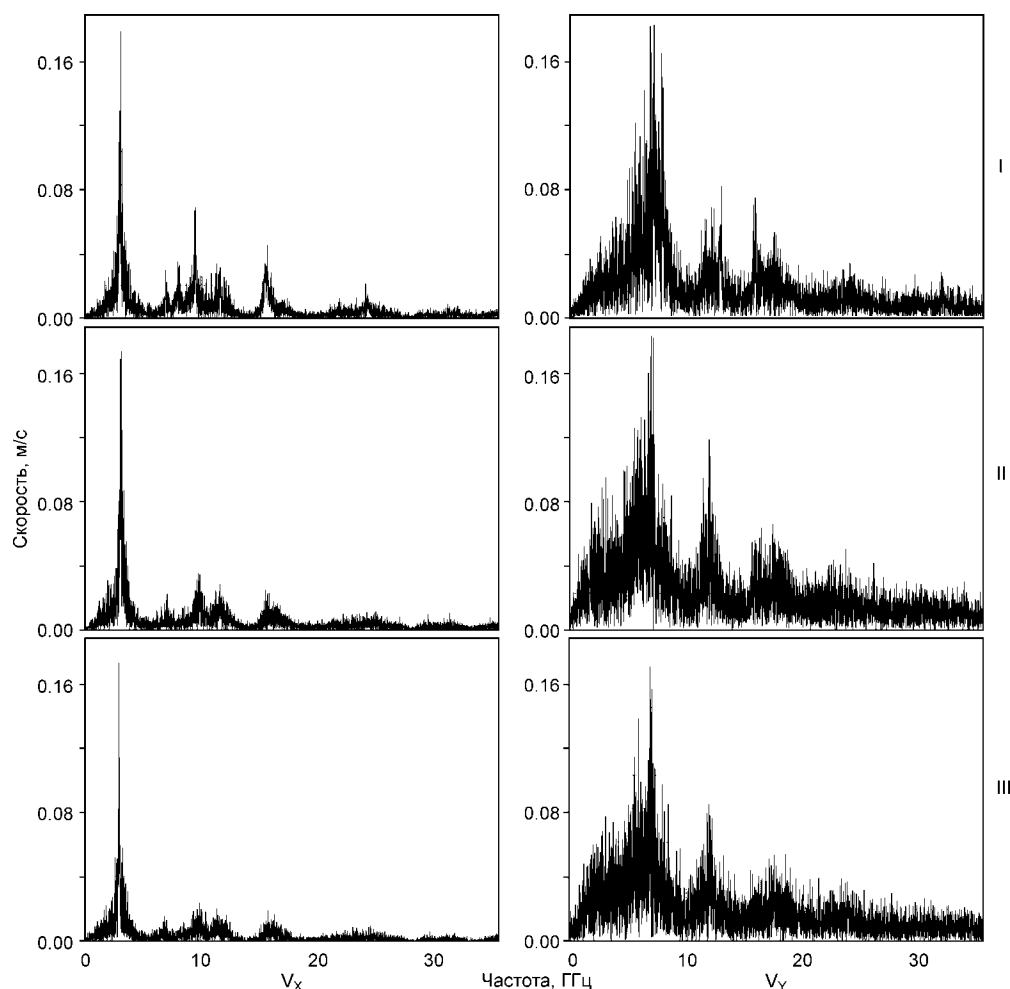


Рис. 11. Спектры Фурье регистрируемых значений, построенные для образца на рис. 9, б, в различные интервалы времени: 0.025–1.33 (I); 1.33–2.64 (II) и 2.64–3.95 мкс (III)

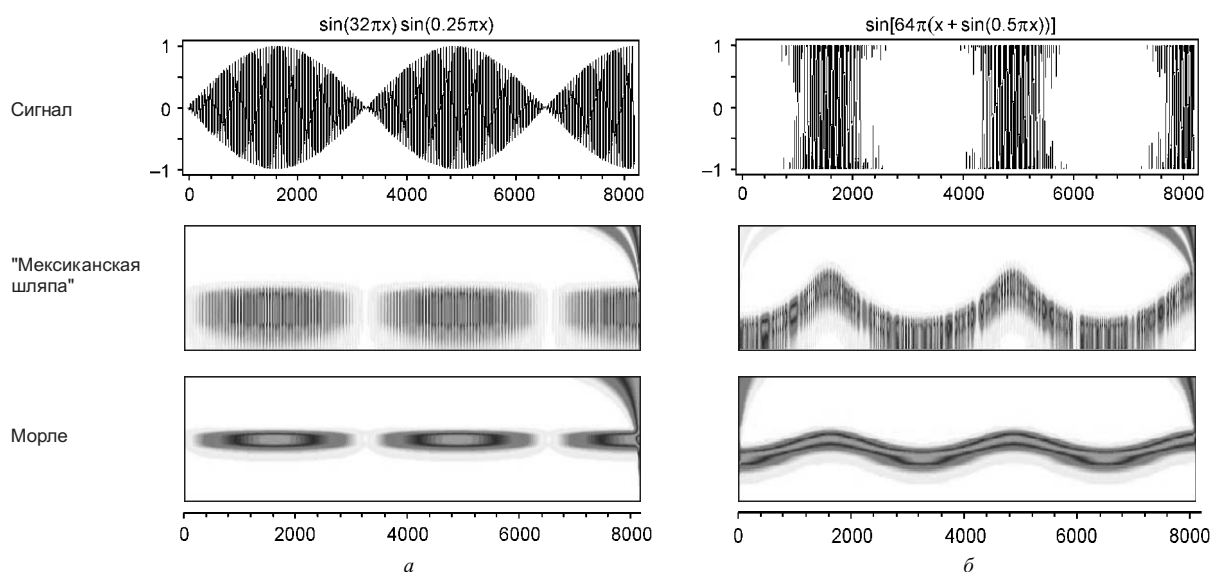


Рис. 12. Анализ простейших сигналов: амплитудная (а) и частотная модуляция (б)

вейвлетов выбирались наиболее распространенные функции — «мексиканская шляпа» и Морле. Для того чтобы лучше понять полученные результаты, проанализируем с помощью выбранных вейвлетов два простых сигнала, а именно, амплитудно- и частотно-моделированные синусоидальные сигналы (рис. 12).

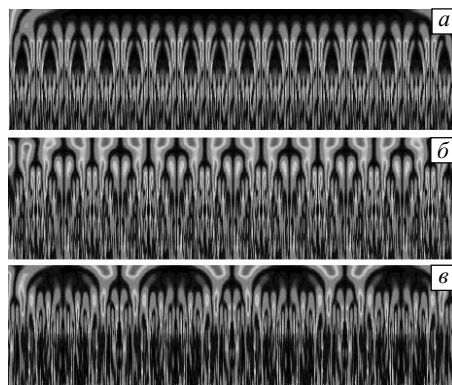
Ось ординат на вейвлет-изображениях представлена в безразмерных величинах, называемых масштабом  $a$ , обратно пропорциональных частоте  $f$ . Поэтому на приведенных изображениях область низких частот находится вверху, а высоких — внизу. Ось абсцисс соответствует времени (номеру записи дискретного сигнала). Отметим, что вейвлет-изображения явно показывают сущность изменения сигналов во времени (по частоте — для частотной модуляции и по амплитуде — для амплитудной). Преобразование Фурье не позволяет выявить такую особенность рассматриваемых сигналов. В верхних углах изображений, соответствующих началу и концу сигнала, иногда можно видеть полосы (рис. 12). Это артефакты, вызванные конечностью сигнала, подобно «лепесткам» на спектре Фурье для синусоидального сигнала конечной длины. Теоретически, сигнал должен отображаться на вейвлет-изображении тонкой линией, но реально мы видим полосу, ширина которой определяется выбранным вейвлетом. При этом функция Морле дает более тонкую полосу для гармонического сигнала, чем «мексиканская шляпа».

Математически частотно-модулированный сигнал записывается как  $\sin[\omega x + d(x)]$ , где  $\omega$  — несущая частота;  $d$  — функция, модулирующая сигнал;  $x$  — время. В данной работе  $\omega = 64\pi$ ,  $d(x) = 8\sin(\omega x)$ , где  $u$  — модулирующая частота. На рис. 13 представлены вейвлет-преобразования функцией «мексиканская шляпа» частотно-модулированных сигналов с различными модулирующими

частотами  $u = 4k\pi$ . Видно, что с увеличением модулирующей частоты значительно изменяется внешний вид получаемых вейвлет-изображений, в то время как преобразование функцией Морле сохраняет зигзагообразный вид.

Теперь рассмотрим результаты вейвлет-преобразования регистраций данных, полученных при моделировании трения (рис. 14). Сравнивая их с данными, приведенными на рис. 12 и 13, можно сделать вывод, что упругие волны, генерируемые при трении, можно характеризовать как частотно- и амплитудно-модулированные.

Действительно, как было показано ранее, собственные частоты зависят от высоты блоков, а эта высота во время трения (даже при установившемся режиме) стохастически изменяется в силу износа трущихся поверхностей и налипания на них частиц (микросварка). На данных моделирования это видно достаточно четко вследствие малых размеров блоков, так что небольшие

Рис. 13. Вейвлет-преобразование сигналов с различными модулирующими частотами:  $k = 4$  (а), 2 (б), 1 (в)



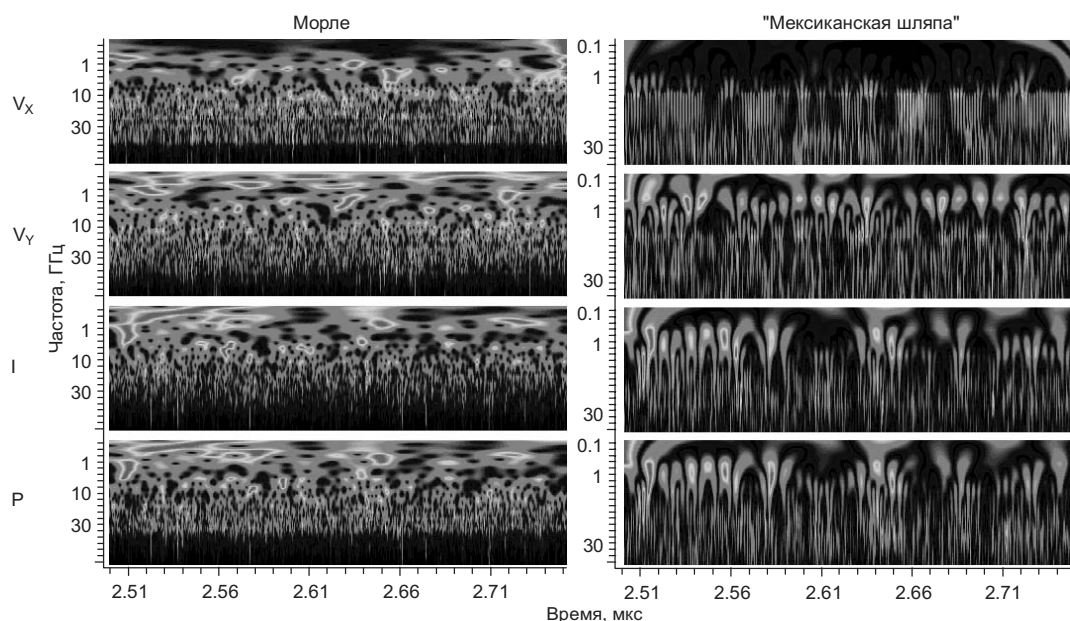


Рис. 14. Вейвлет-преобразования регистраций данных для образца на рис. 9, б

изменения в толщине «квазижидкого» слоя ощутимо сказываются на собственных частотах. В случае больших размеров образца этот эффект будет незаметен.

Амплитуда возникающих упругих волн, очевидно, определяется силой взаимодействия верхнего и нижнего блоков. Как отмечалось выше, коэффициент трения, который является отношением силы сопротивления движению трущихся тел к силе, прижимающей эти тела, постоянно изменяется даже при установившемся режиме трения. Это наблюдается как на практике [1, 2, 9], так и в наших расчетах. Таким образом, периодически изменяющийся коэффициент трения и обуславливает амплитудную модуляцию регистрируемых сигналов.

#### 4. Заключение

Методом компьютерного моделирования изучено влияние деформации и разрушения в наноразмерном диапазоне пятна контакта взаимодействующих твердых тел на спектр генерируемых упругих волн. Развита методика анализа акустических колебаний на основе обработки зависимостей от времени компонент скорости, давления и интенсивности напряжений, регистрируемых в определенной точке тела. Показано, что в случае когда имеется множество непрерывно действующих источников волн, анализ спектров Фурье позволяет выявить основную частоту, на которой происходит их генерация.

Анализ акустических сигналов, возникающих при моделировании пятна контакта в паре трения, показал, что на спектрах этих сигналов, кроме собственных частот, присутствуют пики, которые зависят от геометри-

ческих размеров зоны контакта и скорости движения блоков относительно друг друга. При этом амплитуда и положение определенных пиков изменяются в зависимости от рассматриваемого временного интервала. Отмечается, что спектры, построенные по данным интенсивности напряжений и давления, качественно соответствуют экспериментально полученным спектрам акустической эмиссии при трении скольжения стали Гадфильда, выполненного по схеме «вал – втулка».

Особенностью генерации упругих волн при трении является наличие множества источников (пятна контакта микрощероховатостей, приповерхностные трещины, отделение частиц износа и т.д.), изменяющихся во времени. Это обстоятельство значительно усложняет анализ акустических сигналов. Проведенные исследования показали, что упругие волны, генерируемые при трении, можно рассматривать как источник информации о процессах деформации, разрушения и адгезионного схватывания в зоне контактного взаимодействия. Это открывает дополнительные возможности экспериментальных исследований триботехнических процессов в динамике на основе частотно-временного анализа акустических сигналов. Так, показано, что причиной частотной модуляции упругих волн в модельной паре трения является изменение характерной высоты (а соответственно и собственной частоты) образца вследствие флуктуации «квазижидкого» слоя трения. Амплитудная модуляция этих волн вызвана флуктуацией мгновенного значения коэффициента трения.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты №№ 07-08-00192-а и 08-08-12055-офи), интеграционного проекта со сторонними организация-

ми СО РАН № 127, а также проекта 13.3 Программы фундаментальных исследований Отделения энергетики, машиностроения и процессов управления РАН № 13.

## Литература

1. Маишков Ю.К., Овчар З.Н., Байбарицкая М.Ю., Мамаев О.А. Полимерные композиционные материалы в триботехнике. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 2004. – 262 с.
2. Gardos M.N., Gabelich S.A. Atmospheric effects of friction, friction noise and wear with silicon and diamond. Part I. Test methodology // Tribology Letters. – 1999. – V. 6. – No. 2. – P. 79–86.
3. Попов В.Л., Старчевич Я. Трибоспектроскопическое исследование пары сталь–сталь // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 7. – С. 85–90.
4. Бородин Ф.М., Крюкова И.В. Фрикционные колебания, обусловленные деформированием шероховатостей контактирующих поверхностей // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – Вып. 6. – С. 67–73.
5. Рубцов В.Е., Колубаев А.В. Пластическая деформация и квазипериодические колебания в трибологической системе // ЖТФ. – 2004. – Т. 74. – Вып. 11. – С. 63–69.
6. Chen G.X., Zhou Z.R., Kapsa Ph., Vincent L. Effect of surface topography on formation of squeal under reciprocating sliding // Wear. – 2002. – V. 253. – No. 3–4. – P. 411–423.
7. Jibiki T., Shima M., Akita H., Tamura M. A basic study of friction noise caused by fretting // Wear. – 2001. – V. 251. – No. 1–12. – P. 1492–1503.
8. Колубаев А.В., Колубаев Е.А., Вагин И.Н., Сизова О.В. Генерация звука при трении скольжения // Письма в ЖТФ. – 2005. – Т. 31. – Вып. 19. – С. 6–13.
9. Колубаев Е.А. Деформирование поверхностных слоев при трении и факторы, влияющие на трибологические свойства металлов / Дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Томск: ИФПМ СО РАН, 2005. – 139 с.
10. Гриценко Б.П. Роль акустических колебаний, генерируемых при трении, в разрушении материалов трибосистем // Трение и износ. – 2005. – Т. 26. – № 5. – С. 481–488.
11. Свириденко А.И., Мышкин Н.К., Калмыкова Т.Ф., Холодиков О.В. Акустические и электрические методы в триботехнике. – Минск: Наука и техника, 1987. – 280 с.
12. Фадин Ю.А., Лексовский А.М., Гинзбург Б.М., Булатов В.П. Периодичность акустической эмиссии при сухом трении пары сталь–латунь // Письма в ЖТФ. – 1993. – Т. 19. – Вып. 5. – С. 10–13.
13. Фадин Ю.А. Динамика разрушения поверхности при сухом трении // Письма в ЖТФ. – 1997. – Т. 23. – Вып. 15. – С. 75–78.
14. Дмитриев А.И., Смолин А.Ю., Попов В.Л., Псахье С.Г. Многоуровневое моделирование процессов трения и износа на основе численных методов дискретной механики и феноменологической теории // Физ. мезомех. – 2008. – Т. 11. – № 4. – С. 15–24.
15. Смолин А.Ю., Коноваленко Иг.С. О генерации и распространении упругих волн при трении. Компьютерное моделирование // Физ. мезомех. – 2006. – Т. 9. – Спец. вып. – С. 45–48.
16. Псахье С.Г., Смолин А.Ю., Стефанов Ю.П., Макаров П.В., Шилько Е.В., Чертов М.А., Евтушенко Е.П. Моделирование поведения сложных сред на основе комбинированного дискретно-континуального подхода // Физ. мезомех. – 2003. – Т. 6. – № 6. – С. 11–21.
17. Зельдович Я.Б., Райзер Ю.П. Физика ударных волн и высокотемпературных гидродинамических явлений. – М.: Наука, 1966. – 686 с.
18. Немирович-Данченко М.М. Численное моделирование трехмерных динамических задач сейсмологии // Физ. мезомех. – 2002. – Т. 5. – № 5. – С. 99–106.
19. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. – М.: Наука, 1988. – 712 с.
20. Уайт Дж.Э. Возбуждение и распространение сейсмических волн. – М.: Недра, 1986. – 261 с.
21. Persson B.N.J. Sliding Friction. Physical Principles and Applications. – Berlin: Springer, 2000. – 515 p.
22. Бидерман В.Л. Теория механических колебаний. – М.: Высшая школа, 1980. – 408 с.
23. Мала С. Вэйвлеты в обработке сигналов. – М.: Мир, 2005. – 671 с.
24. Пакет обработки сигналов Last Wave [Электронный ресурс]. URL: <http://www.cmap.polytechnique.fr/~lastwave>.

Поступила в редакцию 27.10.2008 г.,  
после переработки 08.05.2009 г.

## Сведения об авторах

Смолин Алексей Юрьевич, к.ф.-м.н., доцент, снс ИФПМ СО РАН, доцент ТГУ, [asmolin@ispms.tsc.ru](mailto:asmolin@ispms.tsc.ru)

Добрынин Сергей Александрович, аспирант ИФПМ СО РАН, [laesod@usgroups.com](mailto:laesod@usgroups.com)

Псахье Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., проф., директор ИФПМ СО РАН, проф. ТГУ, зав. каф. ТПУ, [sp@ispms.tsc.ru](mailto:sp@ispms.tsc.ru)