

2 Особенности генерации упругих волн при трении скольжения

Трение представляет собой сложное, существенно динамическое явление. Так, непрерывное измерение коэффициента трения скольжения показывает, что эта характеристика пары трения не является постоянной величиной даже при установившемся режиме процесса, а периодически изменяется, достигая максимумов и минимумов [112, 113]. Проявлением динамической сущности трения является также возникновение акустических колебаний, которые играют важную роль в поведении взаимодействующих тел, в том числе в их изнашивании [4].

При экспериментальном изучении трения и изнашивания измерения и наблюдения участков материала непосредственно в зоне взаимодействия производят либо после прерывания процесса, либо вообще по завершении испытания. Поэтому некоторые из результатов таких исследований могут представлять собой следствие не самого процесса, а его прекращения. Использование средств компьютерного моделирования дает возможность изучать происходящие процессы непосредственно в динамике.

В работах [13, 114] было показано, что для моделирования трения весьма эффективным является применение комбинированного дискретно-континуального подхода [106], когда узкая зона контакта взаимодействующих тел описывается дискретным методом подвижных клеточных автоматов, а остальной материал, который деформируется упруго, — численными методами континуальной механики.

2.1 Особенности анализа упругих волн при численном моделировании

Для исследования одиночных волн, распространяющихся от точечного

источника на свободной границе, методом подвижных клеточных автоматов моделировался плоский прямоугольный образец ($0,1 \times 0,2$ м) из стали ($\rho=7800$ кг/м³, $v_p=5,81$ км/с, $v_s=3,21$ км/с), представленный на рис. 2.1. Размер автоматов составлял 0,001 м. В качестве «датчика» использовалась пара автоматов, для которых записывались следующие параметры V_x , V_y — составляющие скорости, соответственно, по осям X и Y , I — интенсивность тензора напряжений и P — давление. «Датчик» располагался на достаточном расстоянии от источника, где успевали сформироваться и разделиться продольная L и поперечная S волны (его положение показано кружком на рис. 2.1) [115–117].

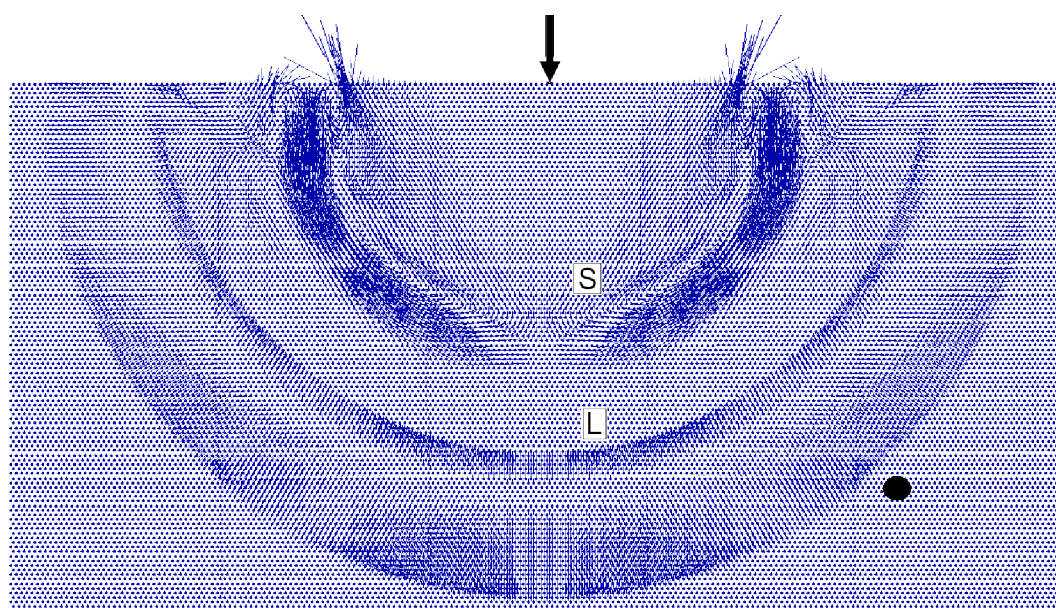


Рисунок 2.1 – Образец для моделирования упругих волн от точечного источника. Буквами обозначены основные типы упругих волн, а черным кружком — расположение «датчика»

Нагрузка прикладывалась путем задания для автомата, расположенного на верхней границе (показан на рис. 2.1 стрелкой), скорости, направленной по нормали к поверхности образца. Временная зависимость этой скорости (начальный сигнал источника колебаний) имела вид синусоиды

$$v_N(t) = \begin{cases} V_0 \sin(2\pi t/T) & \text{если } t \leq T \\ 0 & \text{если } t > T \end{cases}, \quad (2.1)$$

где $V_0=50$ м/с — амплитуда источника, $T=4,30$ мкс — время нагружения.

Графически сигнал источника и его спектр Фурье имеют вид, представленный на рис 2.2. Учитывая, что шаг интегрирования по времени в методе МСА выбирается из условия $v_p \cdot \Delta t \leq \Delta x$, где v_p — скорость продольного звука, а Δx — размер автомата, то $\Delta t = 0,02$ мкс и частота Найквиста для данной системы составляет 25 МГц. Частота сигнала (2.1) $\approx 0,2324$ МГц. Ее можно легко увидеть как первый максимум на спектре сигнала (рис. 2.2,б).

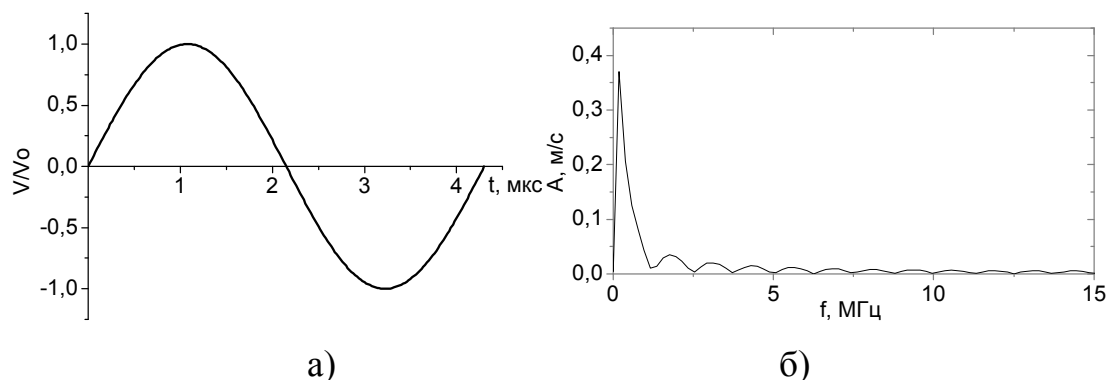


Рисунок 2.2 – Начальный сигнал скорости в точечном источнике
и его спектр Фурье

Для тестирования дискретно-континуального подхода в работе [106] в качестве источника упругих волн использовался колоколообразный синусоидальный сигнал. Для него характерна плавность в нарастании скорости и ее гашении. Однако такая нагрузка оставляет деформацию 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, отметим, что даже для колоколообразного сигнала распределение 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 [118].

Рассмотрим данные регистрации «датчиком» выбранных величин в результате расчета задачи по распространению упругих волн от точечного

источника вида (2.1). На рис. 2.3 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.

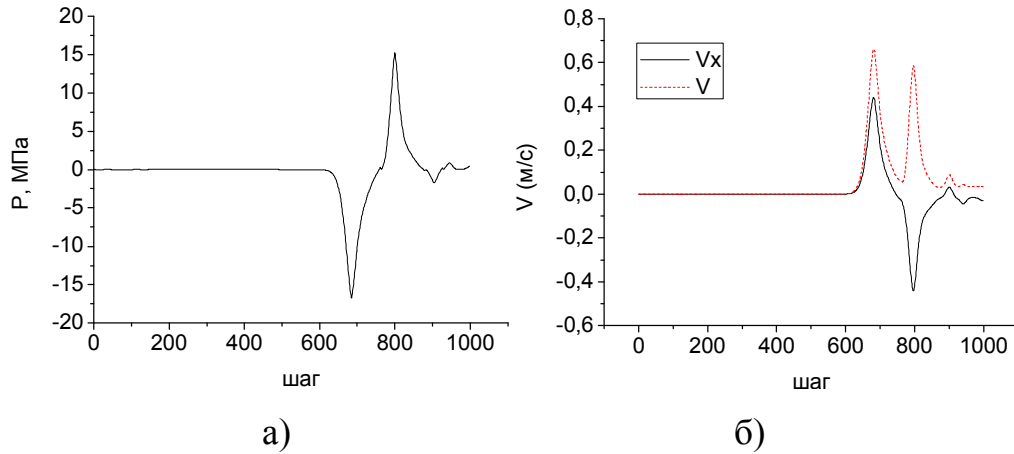


Рисунок 2.3 – Зависимости давления (а), а также компоненты V_x скорости и модуля скорости V (б) от номера шага интегрирования

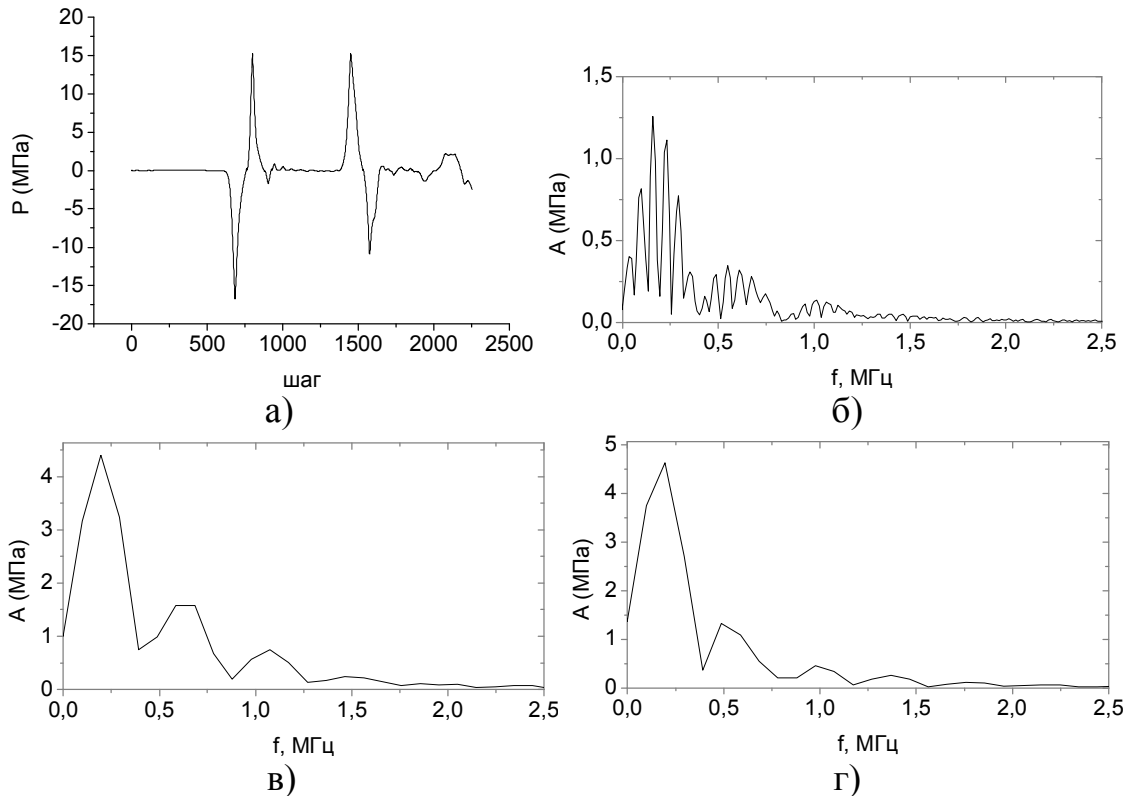


Рисунок 2.4 – Регистрация давления (а) при прохождении прямой и отраженной продольных волн. Фурье-спектры полной регистрации (б) и отдельно для сигналов в прямой (в) и отраженной (г) волнах

Известно, что после отражения от границы волна в численных расчетах вообще говоря искажается [119]. На рис. 2.4 представлены регистрации 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 отдельно для отраженной волны (рис. 2.4, в, г), то можно отметить, что максимумы на их спектрах почти не изменили своего положения.

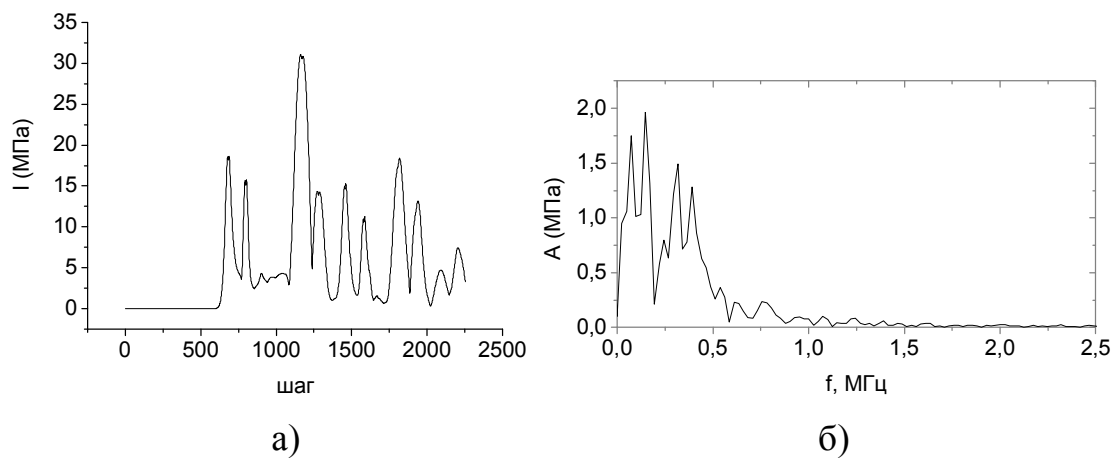


Рисунок 2.5 – Регистрация интенсивности напряжений (а)
и ее Фурье-спектр (б)

Интенсивность напряжений (рис. 2.5, а) показывает прохождение как продольной волны, так и поперечной. Отметим, что подобно интенсивности напряжений ведет себя модуль скорости (рис. 2.3, б). Поскольку интенсивность напряжений определяется квадратами главных напряжений [98], то она является положительной величиной, а частота ее колебаний при прохождении волны сжатия в два раза больше, чем частота колебаний давления [120]. На Фурье-спектре данной зависимости (рис. 2.5, 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. 2.2, продлевалась на все время расчета (20 периодов). Отметим, что амплитуда первого пика на спектре Фурье такого сигнала будет больше, а амплитуда боковых лепестков возле этого пика, наоборот, меньше. В этом случае от источника постоянно распространяются новые волны, после отражения от границ они накладываются на последующие. Поле векторов скоростей в этом случае является достаточно сложным (рис. 2.6), и анализировать его без привлечения специальных математических методов невозможно. В случае одиночного импульса, и длину упругой волны, и ее частоту (скорость распространения) достаточно легко определить по полю векторов скоростей (рис. 2.1).

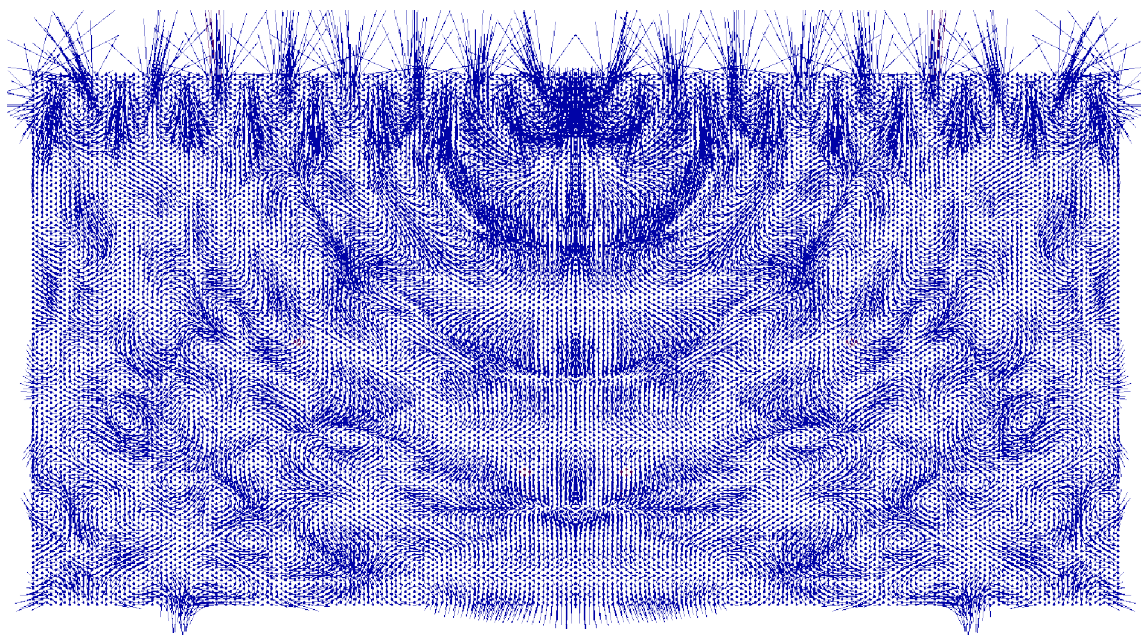


Рисунок 2.6 – Поле скоростей в образце в случае действия постоянного источника (2.1)

Фурье-спектры зависимостей давления и интенсивности напряжений от времени показаны на рис. 2.7. 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.

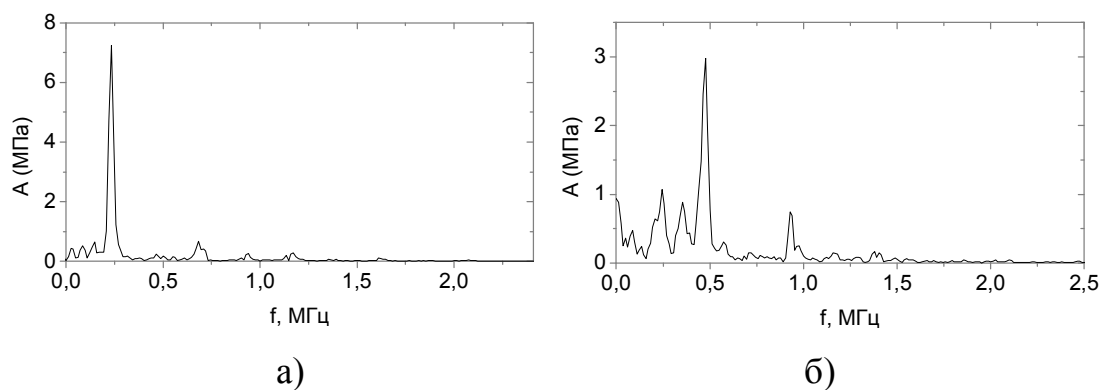


Рис. 2.7 – Фурье-спектры регистраций давления (а) и интенсивности напряжений (б) при непрерывном источнике упругих волн

Таким образом, результаты тестовых расчетов говорят о возможности того, что в случае процессов, например, трения, когда имеется множество источников волн и все они действуют непрерывно, анализ спектров Фурье позволит выявлять основную частоту, на которой происходит генерация упругих волн, соответствующих природе этого процесса.

2.2 Изучение частотного спектра упругих волн, генерируемых в пятне контакта при трении

На рис. 2.8,а представлено схематическое изображение зоны контакта при трении двух поверхностей. Известно, что области реального контакта составляют всего несколько процентов от номинальной поверхности взаимодействующих тел [121], эти области показаны на рис. 2.8,а пунктирными линиями. Рассмотрим некоторую часть реального контакта, находящуюся между вертикальными линиями, показанными в правой части рис. 2.8,а, и относящуюся к наноскопическому масштабному уровню. Выбранная область исследования позволяет применить периодические граничные условия вдоль

направления движения трущихся тел и несколько упростить задачу моделирования [122].

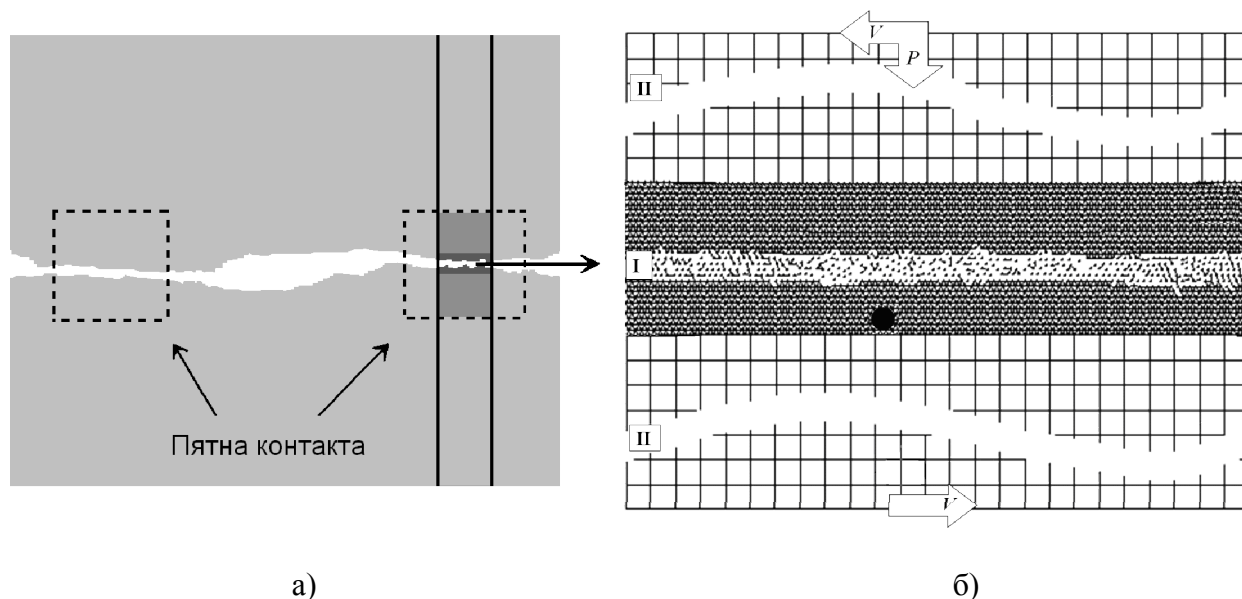


Рисунок 2.8 – Схема зоны контакта при трении с областью исследования (а) и структура расчетной области (б)

Моделирование трения производилось по схеме, предложенной в [13]. Зона трения описывалась в рамках метода подвижных клеточных автоматов, остальная часть взаимодействующих тел (с целью уменьшения требуемых вычислительных ресурсов) описывалась в рамках механики сплошной среды [123–128]. Подробная процедура совмещения конечно-разностного метода для решения уравнений механики сплошных сред с дискретным методом МСА рассмотрена в первом разделе.

Структура расчетной области и использованная схема нагружения представлены на рис. 2.8,б. Здесь область I моделировалась методом МСА, а область II — сеточным методом. Для уменьшения вертикальных размеров рисунка, показана только часть сетки. Кружком 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. 2.9). Одновременно на верхнюю поверхность действовало давление, наращиваемое

до максимальной величины $P_m=127,5$ МПа. Нижняя поверхность была зафиксирована по оси Y . На боковых границах расчетной области в горизонтальном направлении задавались периодические граничные условия. Диаметр автомата равен 2,5 мм, шаг сетки — 10 мкм.

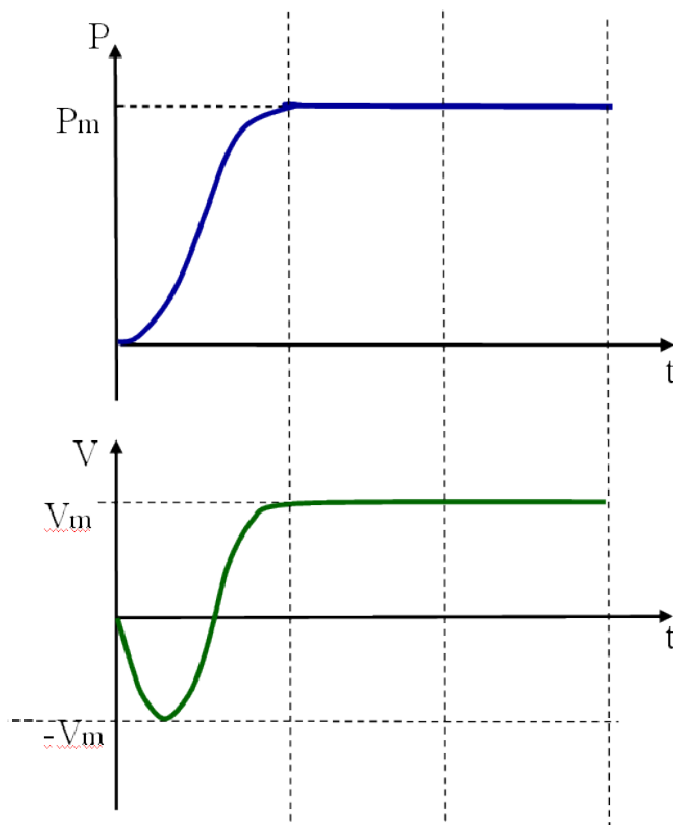


Рисунок 2.9 – Схема нагружения моделируемой пары трения

Функция отклика модельного материала и ее параметры представлены на рис. 2.10 и в таблице 2.1.

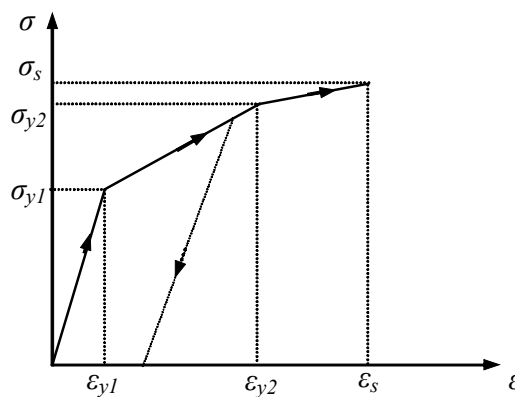


Рисунок 2.10 – Схематическое изображение функции отклика модельного материала

Таблица 2.1 – Параметры модельного материала

Плотность, кг/м ³	7800
Модуль Юнга E, ГПа	206
Коэффициент Пуассона ν	0,3
σ_{y1} , МПа	510
σ_{y2} , МПа	800
σ_s , МПа	920
ϵ_{y2}	0,04
ϵ_s	0,112

Первоначально в области контакта задавалась некоторая шероховатость взаимодействующих поверхностей. На рис. 2.11 представлены три характерных образца исследуемых пар трения. Образцы *а* и *б* имели одинаковую ширину 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*), а в другом таких неровностей было три, при этом их высота была меньше (образец *б*). Третий образец (*в*) по ширине был в два раза больше первых двух и имел профиль поверхности, соответствующий образцу *б*.

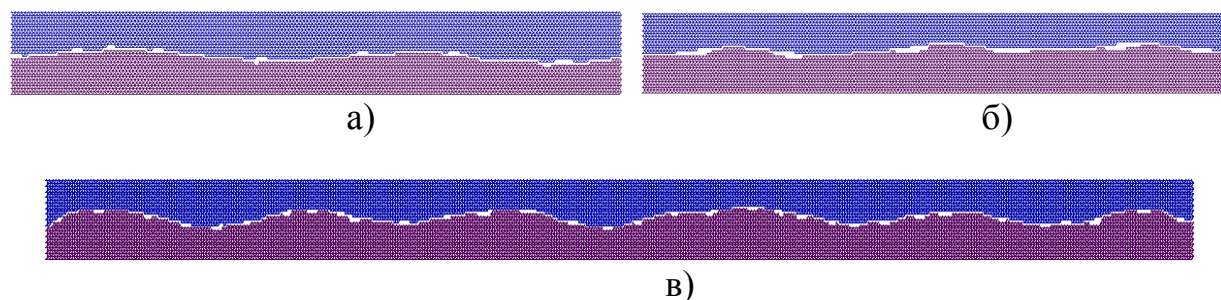


Рисунок 2.11 – Исходные образцы пар трения (показана только область МСА).

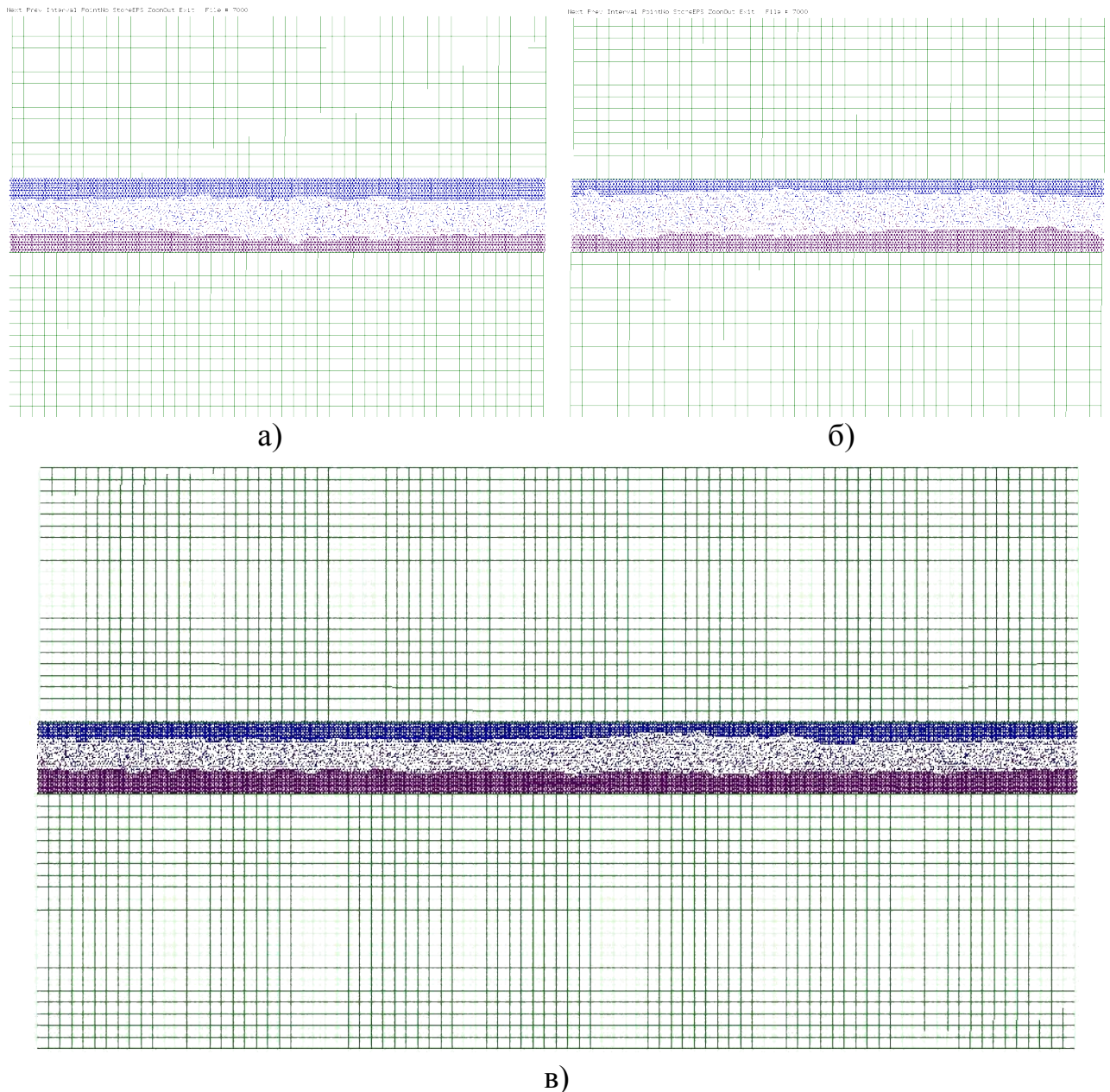


Рисунок 2.12 – Структура образцов, представленных на рис. 2.11, после 7 мкс процесса трения

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 происходила «притирка» в области контакта, сопровождающаяся значительным шумом в рассматриваемых данных «автомата-датчика».

Для образцов, представленных на рис. 2.11, спектры Фурье регистрируемых сигналов приведены на рис. 2.13. Видно, что для всех образцов

основные пики совпадают, однако имеется некоторое отличие в деталях. Схожесть спектров обусловлена тем, что для всех рассматриваемых образцов после установления процесса взаимодействия область «квазижидкого» слоя (представляющая собой область автоматов, не связанных ни с одним из блоков, на рис. 2.8,б) имела одинаковые размеры (рис. 2.12). Для того чтобы понять и объяснить их отличия нужно идентифицировать все пики, присутствующие на спектрах.

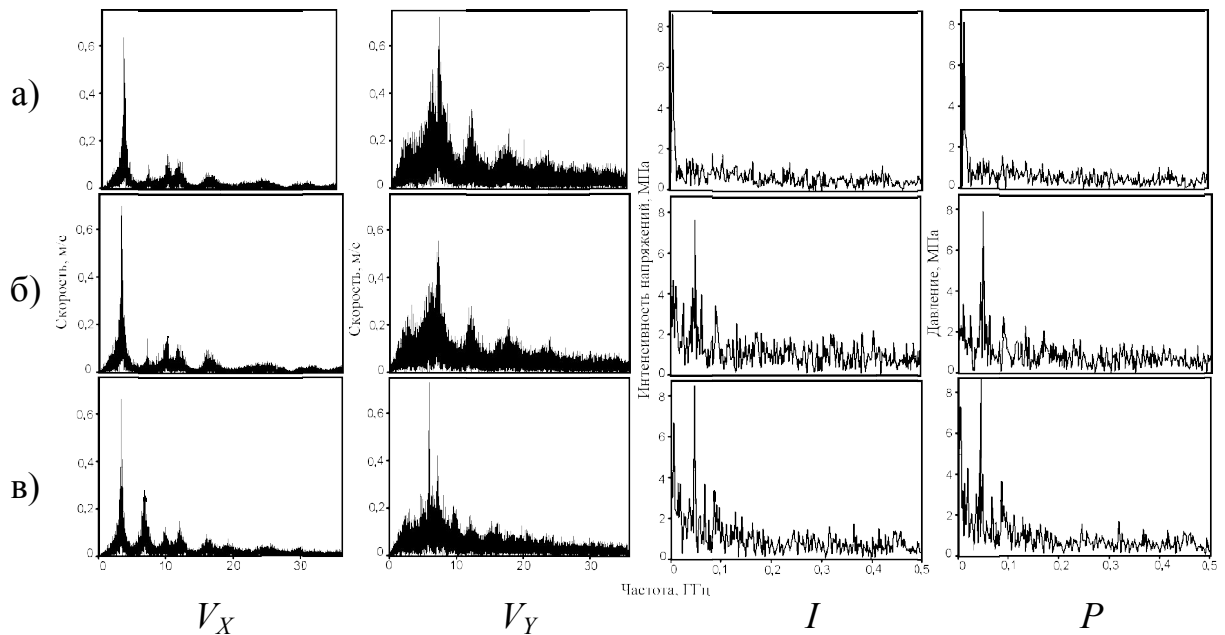


Рисунок 2.13 – Спектры Фурье регистрируемых данных.

Ряды *a–в*, соответствуют образцам на рис. 2.11,
а подписи колонок – анализируемым величинам

На первом этапе оценим 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 со стержнем, закрепленным на одном конце [129], т.е. по формуле $p_k = v(k-0,5)/2l$, где v — скорость волны, а l — высота «полосы». Скорость поперечного 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 $v_p = 5,81$ 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 свободным стержнем по формуле $p_k = vk/2l$ [129]. Следовательно, 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, следовательно, 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 которой можно рассчитать по формуле $f = 2V/s$, где $V = 10$ м/с — скорость движения каждого блока, s — ширина образца. Для образцов *a* и *б* эта частота равна 44,44 МГц, а для образца *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.

При изменении размеров образца собственные частоты будут соответствующим образом меняться, это подтверждено специально проведенными дополнительными расчетами [114, 130]. При изменении размеров автоматов изменяются только пики, соответствующие искусственной шероховатости. Единственный пик (размытый), который не меняется при изменении размеров образца и автоматов, соответствует частоте 2 ГГц и присутствует на спектрах давления и интенсивности напряжений, а также

вертикальной компоненты скорости. Как показал дополнительный анализ, эта частота характеризует среднее время существования «связанных» пар автоматов в «квазижидком» слое вблизи взаимодействующих поверхностей. Ее можно интерпретировать как характерную частоту движения на микроуровне в прерывистом режиме («stick-slip»). Эта частота меняется при изменении критерия восстановления связи между несвязанными автоматами (рис. 2.14,б), что может быть вызвано, например, повышением температуры в зоне контакта.

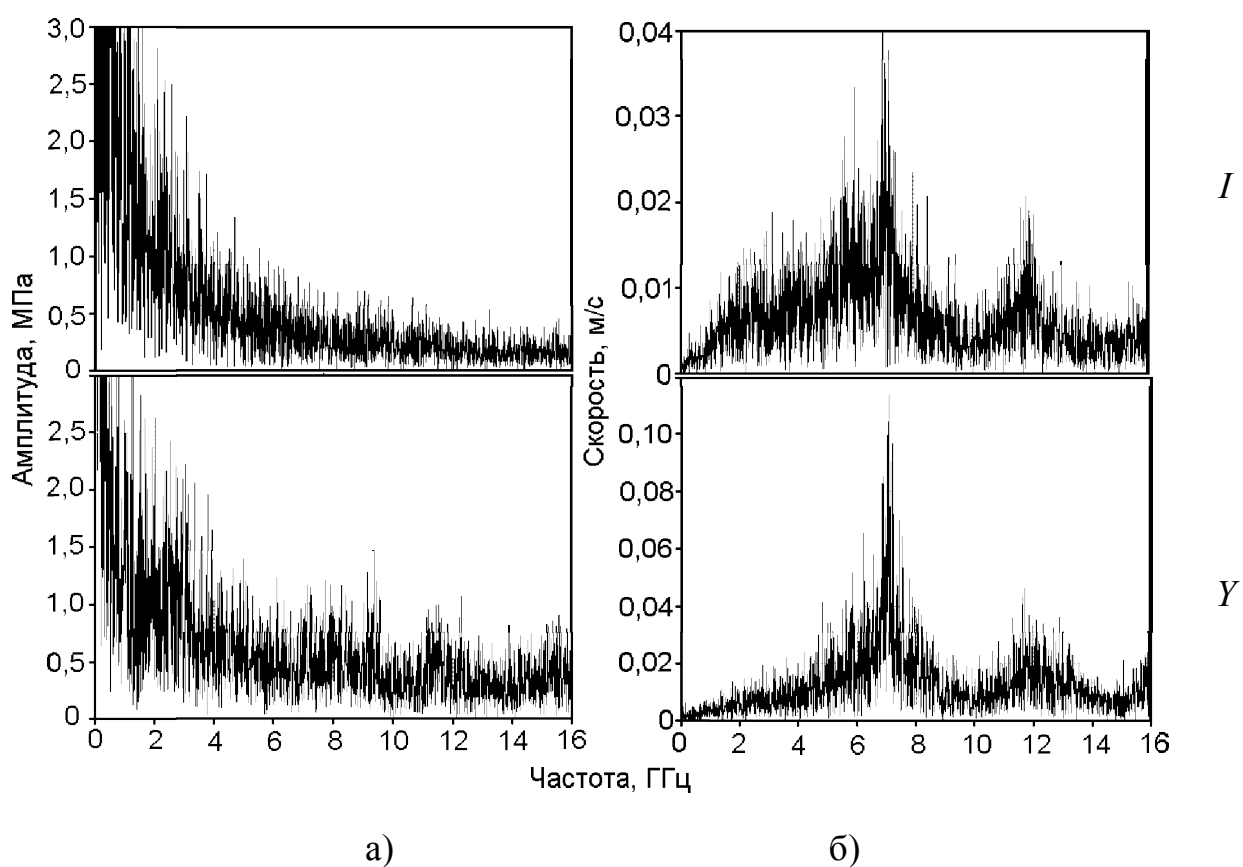


Рисунок 2.14 – Фурье-спектры регистраций интенсивности напряжений для исходного образца (а) и образца с уменьшенным критерием восстановления связи межавтоматных пар (б)

2.3 Частотно-временной анализ упругих колебаний в модельной паре трения

Вообще говоря, приведенные в предыдущем подразделе 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. На рис. 2.15 видно, что амплитуда и положение некоторых пиков изменяются в зависимости от рассматриваемого временного интервала. Так, на спектрах V_X , 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 [131]. В некотором приближении данные рис. 2.15 можно рассматривать как результат оконного преобразования Фурье с шириной окна и шагом равным 1,3 мкс [132–139].

В данной работе также применялось изучаемых сигналов. Для этого использовался свободно распространяемый пакет обработки сигналов «Last Wave» [140]. В качестве вейвлетов выбирались наиболее распространенные функции — «мексиканская шляпа» и Морле. Для того чтобы лучше понять возможности частотно-временного анализа, основанного на вейвлет-преобразованиях, проанализируем с помощью выбранных вейвлетов два простых сигнала, а именно, амплитудно- и частотно-моделированные синусоидальные сигналы (рис. 2.16).

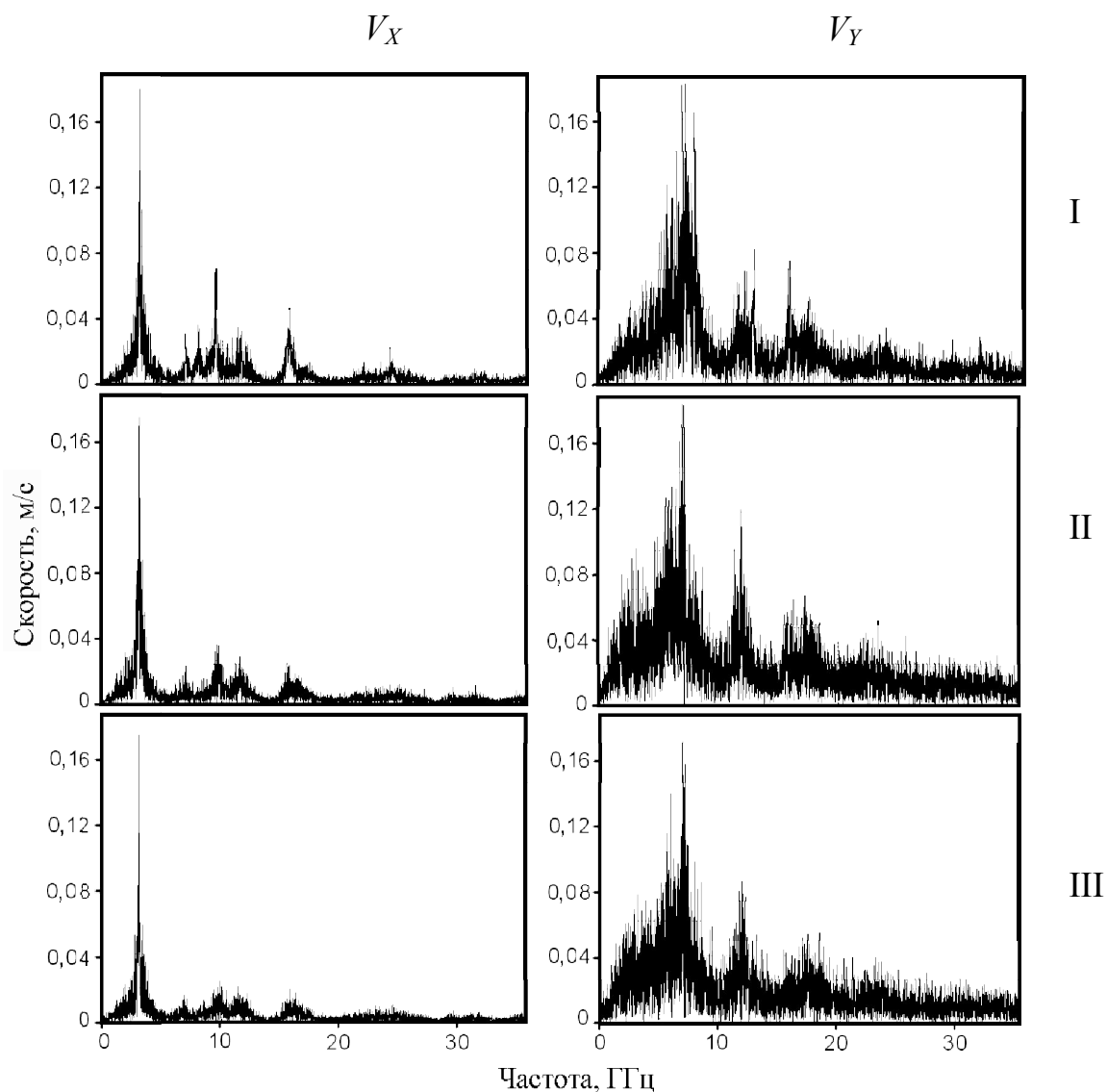


Рисунок 2.15 – Спектры Фурье регистрируемых значений, построенные для образца *б* на рис. 2.11, в различные интервалы времени:

I) 0,025...1,33; II) 1,33...2,64; III) 2,64...3,95 мкс

Ось ординат на вейвлет-изображениях представлена в безразмерных величинах, называемых масштабом a и 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 (соответственно, по частоте для частотной модуляции и по амплитуде для амплитудной модуляции).

Преобразование Фурье не позволяет выявить такую особенность рассматриваемых сигналов. В верхних углах изображений, соответствующих началу и концу сигнала, иногда можно видеть полосы (рис. 2.16). Это артефакты (наводки), вызванные конечностью сигнала, подобные «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».

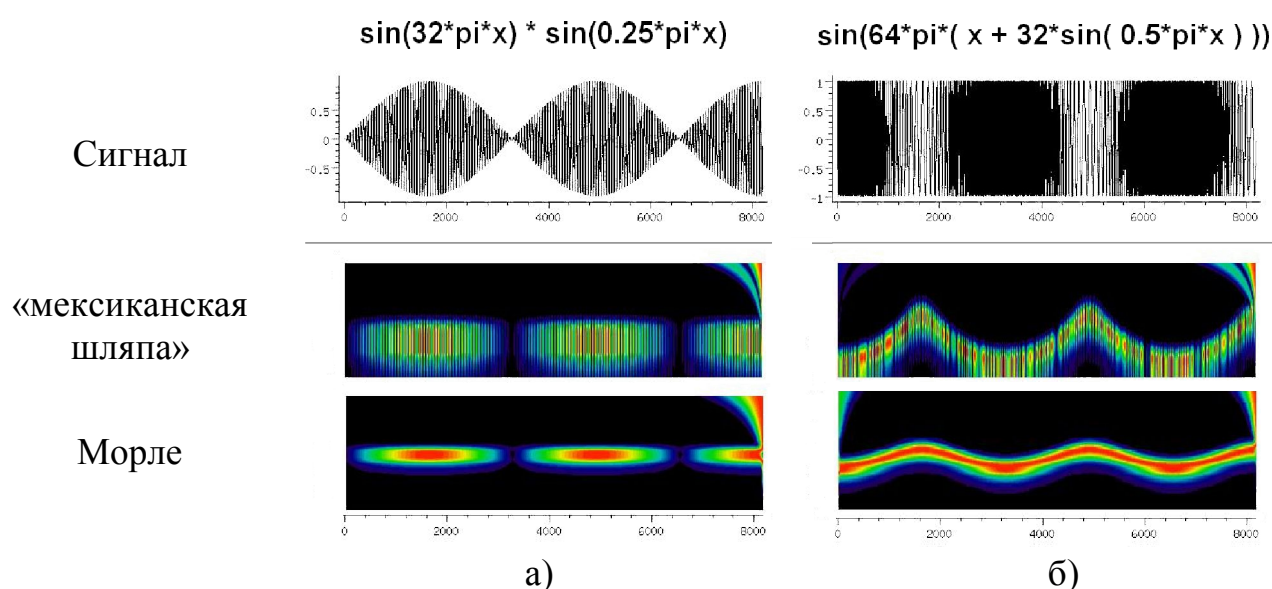


Рисунок 2.16 – Анализ простейших сигналов:

а) амплитудная модуляция б) частотная модуляция

Математически частотно-модулированный сигнал записывается как $\sin[w x + d(x)]$, где w — несущая частота, d — функция, модулирующая сигнал, x — время. В данной работе $w = 64\pi$, $d(x) = 8 \cdot \sin(u \cdot x)$, где u — модулирующая частота. На рис. 2.17 представлены вейвлет-преобразования функцией «мексиканская шляпа» частотно-модулированных сигналов с различными модулирующими частотами $u = 4 \cdot k \cdot \pi$. Видно, что с увеличением модулирующей частоты значительно изменяется внешний вид получаемых вейвлет-

изображений, в то время как преобразование функцией Морле сохраняет зигзагообразный вид, характерный для частотно-модулированных сигналов.

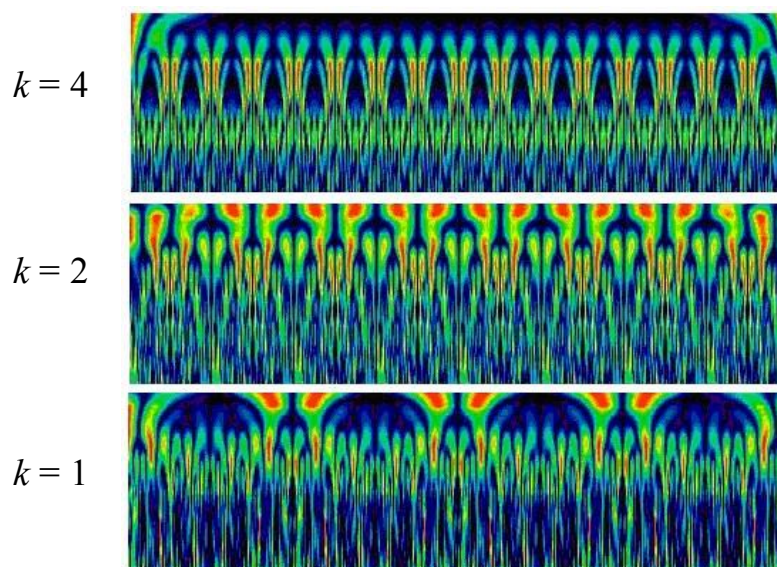


Рисунок 2.17 – Вейвлет-преобразование сигналов с различными модулирующими частотами

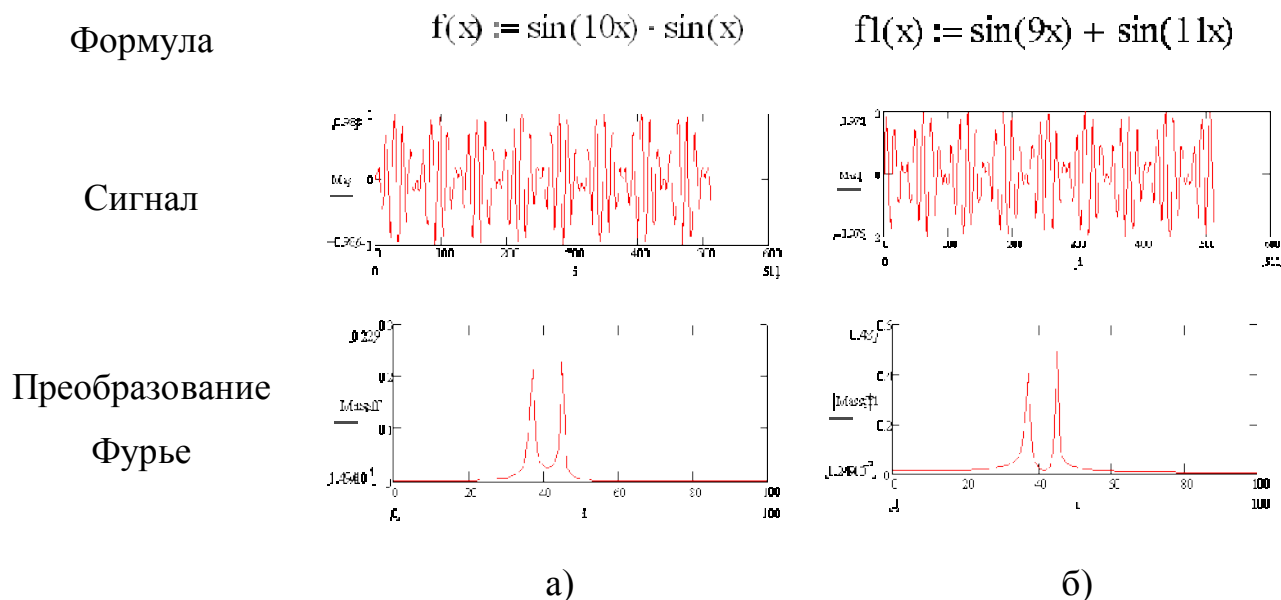


Рисунок 2.18 – Преобразование Фурье амплитудно-модулированного сигнала (а) и суммы двух сигналов (б)

Обычное дискретное преобразование Фурье для частотно- и амплитудно-модулированных сигналов дает несколько «смазанную» картину.

Так на рис. 2.18 представлено преобразование Фурье амплитудно-модулированного сигнала и преобразование Фурье суммы двух сигналов. Из рисунка видно, что амплитудно-модулированный сигнал на преобразовании Фурье представляется точно также как и сумма двух сигналов. Один из пиков соответствует частоте, равной разности несущей и модулирующей частот, а второй — сумме этих частот. На вейвлет-преобразовании амплитудно-модулируемый сигнал распознать значительно легче.

На рис. 2.19 представлено преобразование Фурье частотно-модулированного сигнала. Видно, что возле основного пика существует своеобразная «юбка». Существование такой «юбки» у пика на преобразовании Фурье может расцениваться как признак частотной модуляции. На спектрах регистрируемых данных у всех пиков присутствует «юбки». Следовательно, можно предположить, что все они являются частотно-модулированными.

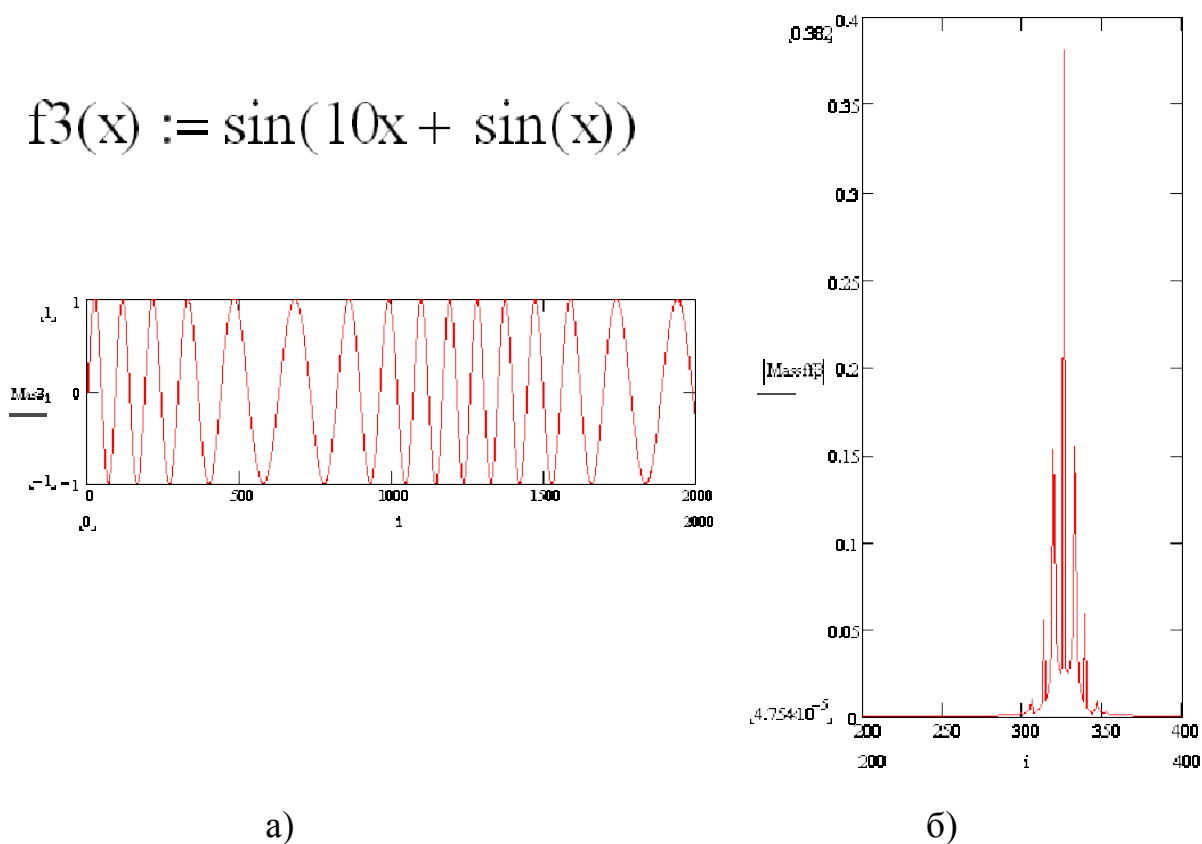


Рисунок 2.19 –Частотно модулированный сигнал (а)
и его преобразование Фурье (б)

Теперь рассмотрим результаты вейвлет-преобразования регистраций, полученных при моделировании трения (рис. 2.20). Сравнивая их с данными, приведенными на рис. 2.16 и 2.17, можно сделать вывод, что упругие волны, генерируемые в модельной паре трения, являются частотно- и амплитудно-модулированными.

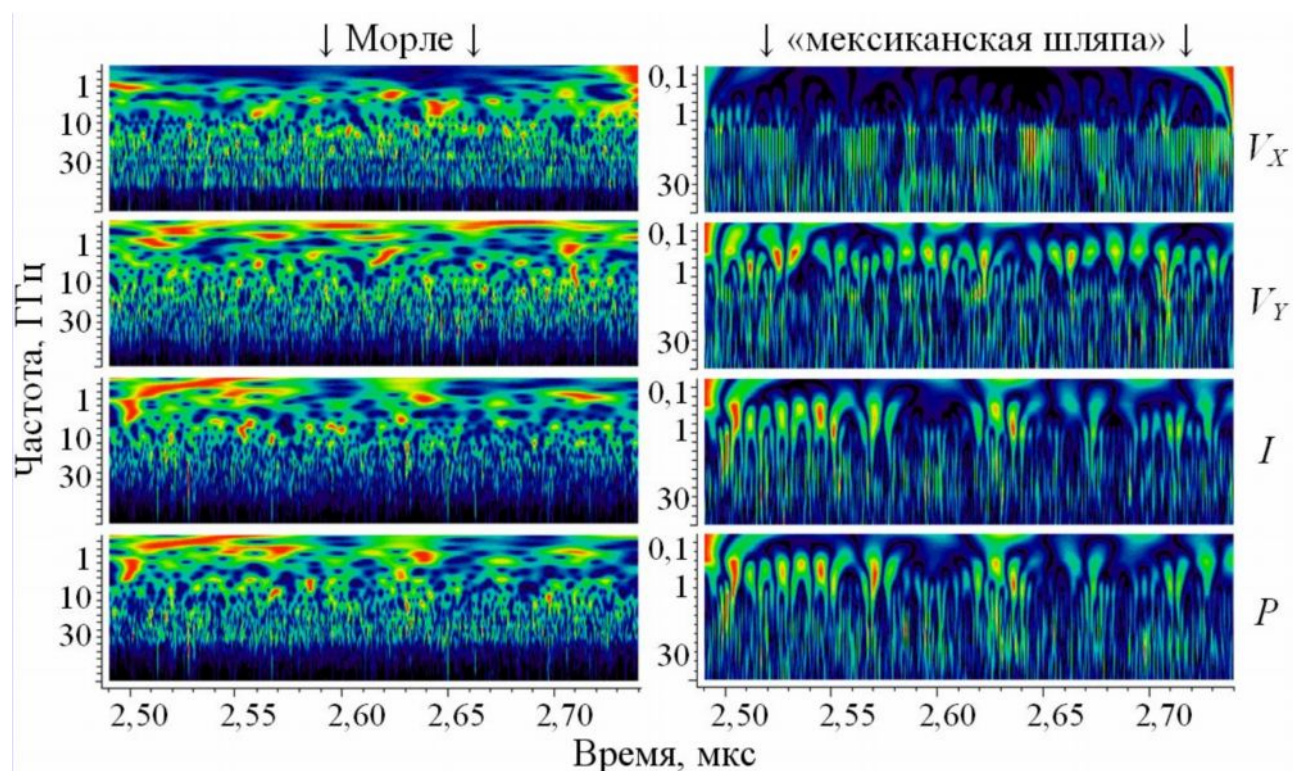


Рисунок 2.20 – Вейвлет-преобразования регистраций данных для образца *б* на рис. 2.11

Действительно, как было показано ранее, собственные частоты рассматриваемой системы 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»). В рассматриваемом случае это видно достаточно четко вследствие малых размеров блоков, так что небольшие изменения в толщине «квазжидкого» слоя ощутимо сказываются на собственных частотах. В случае больших размеров образца этот эффект не будет так заметен.

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 [112, 113], так и в наших расчетах. На рис. 2.21 приведено изменение коэффициента трения во времени для одного из рассматриваемых образцов, а также спектр Фурье этой зависимости. Кроме того, на рис. 2.21,а приведена кривая, сглаживающая зависимость коэффициента трения по тысячи ближайших записей. Хорошо видно, что и эта зависимость не является гладкой. Спектр Фурье показывает, что характерные частоты колебаний коэффициента трения коррелируют с некоторыми частотами на регистрациях горизонтальной компоненты скорости.

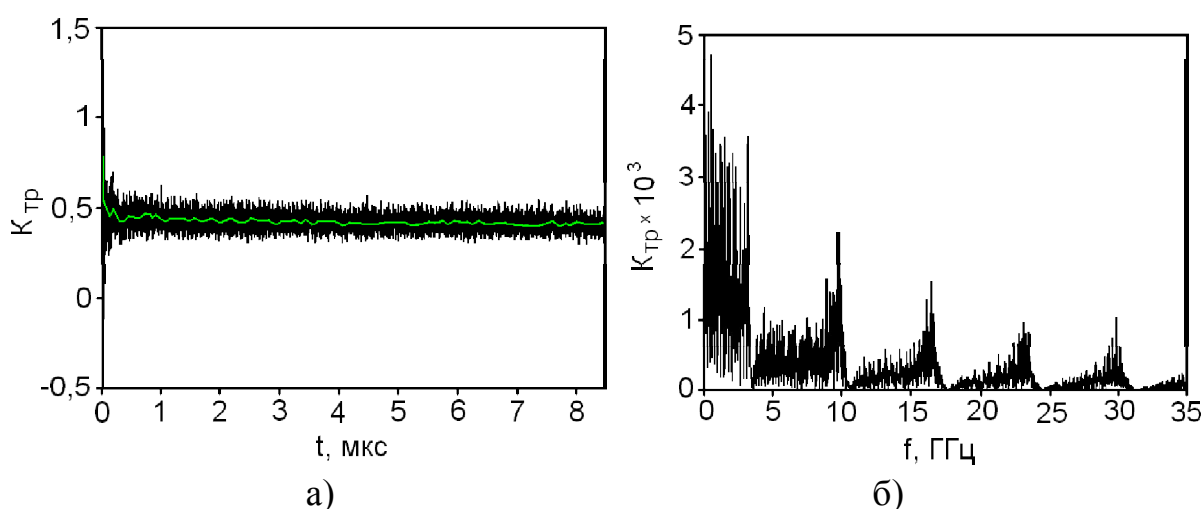


Рисунок 2.21 – Изменение коэффициента трения во времени для образца на рис. 2.11,б) (а) и спектр Фурье этого сигнала (б)

Таким образом, проведенные расчеты показывают, что периодически изменяющийся коэффициент трения может обуславливать амплитудную модуляцию регистрируемых сигналов, соответствующих генерируемому при трении упругим волнам, а представленные модели на основе метода подвижных клеточных автоматов в достаточном объеме описывают трение как сложное, существенно динамическое явление.

2.4 Влияние профиля взаимодействующих поверхностей на особенности частотного спектра колебаний в паре трения

Выше было показано, что на спектрах величин, регистрирующих прохождение упругих волн, генерируемых в процессе трения, присутствуют как собственные частоты системы, так и частоты, обусловленные характерными размерами модели (ширина расчетной области и размер автомата) и скоростью относительного движения блоков. Также отмечалось наличие неидентифицированных пиков в низкочастотной части спектров, положение и высота которых изменяются со временем (рис. 2.22).

Дополнительный анализ результатов моделирования показал, что в процессе трения изменяется профиль поверхности, разделяющей «квазижидкий» слой и «твердую» часть образцов. Это позволило предположить, что наличие таких пиков может быть обусловлено характерным размером шероховатостей таких профилей.

За основу алгоритма построения профиля поверхности, разделяющей «квазижидкий» слой и «твердую» часть образцов, брался алгоритм, предложенный в [113], однако он был изменен таким образом, чтобы отсеять «высокочастотные» составляющие [141–143], связанные с дискретностью представления. На рис. 2.23 показаны функции, описывающие профиль нижней поверхности модельной пары трибосопряжения, построенные по разным алгоритмам. На рис. 2.23,а, показана функция, построенная по алгоритму работы [113], а на рис. 2.23,б, — результат работы алгоритма, используемого в данной работе. Функция на рис. 2.23,б, сглаживает вступающие из твердой поверхности цепочки межавтоматных связей, поскольку считается, что они представляют собой часть «квазижидкого» слоя.

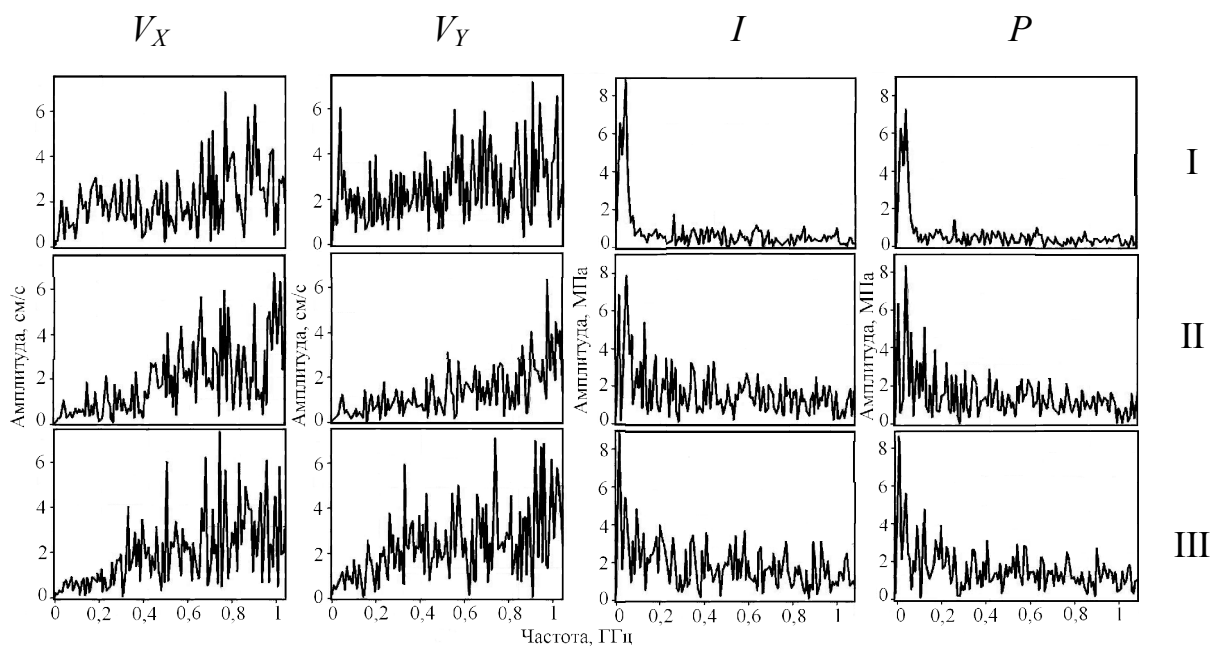


Рисунок 2.22 – Спектры Фурье регистрируемых данных взаимодействия для образца рис. 2.11,б в различные интервалы времени:

I) 0,025...1,33; II) 1,33...2,64 и III) 2,64...3,95 мкс

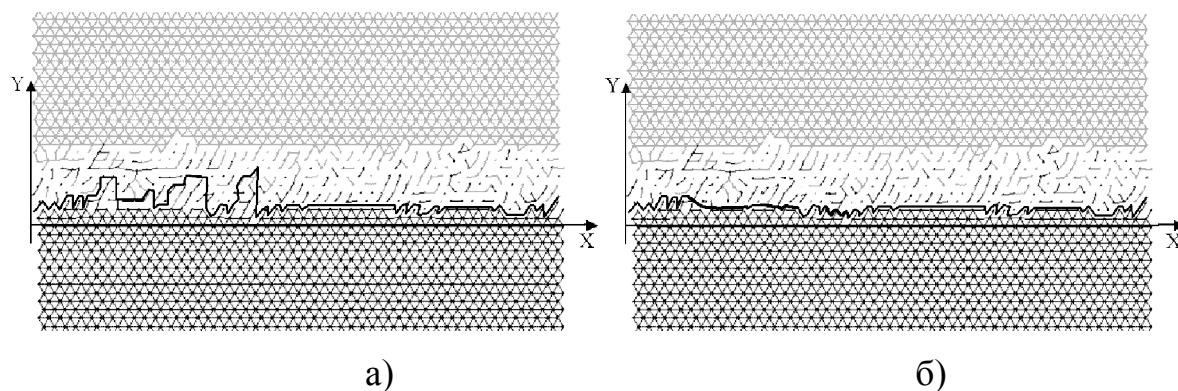


Рисунок 2.23 – Примеры функций, описывающих профиль нижней поверхности модельной пары трибосопряжения

Схема дискретного представления искомой функции $h(x)$ показана на рис. 2.24. Величина шага дискретизации δ соответствует радиусу автомата (минимальное расстояние между вертикальными проекциями центров автоматов в плотной упаковке).

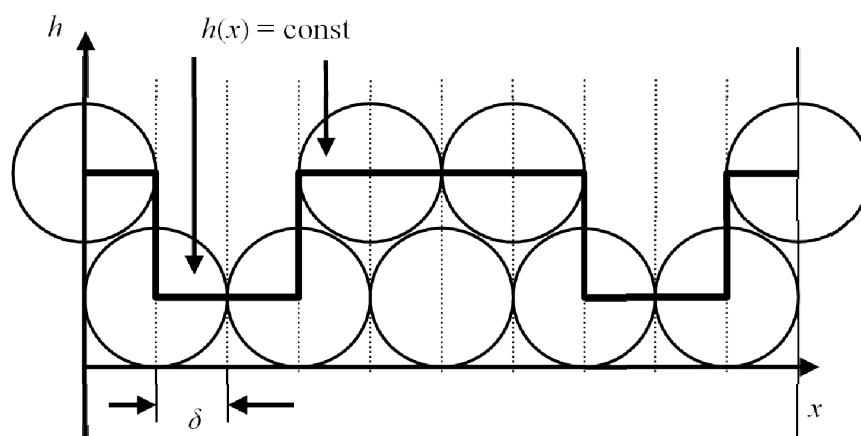


Рисунок 2.24 – Схема дискретизации функции, описывающей профиль поверхности

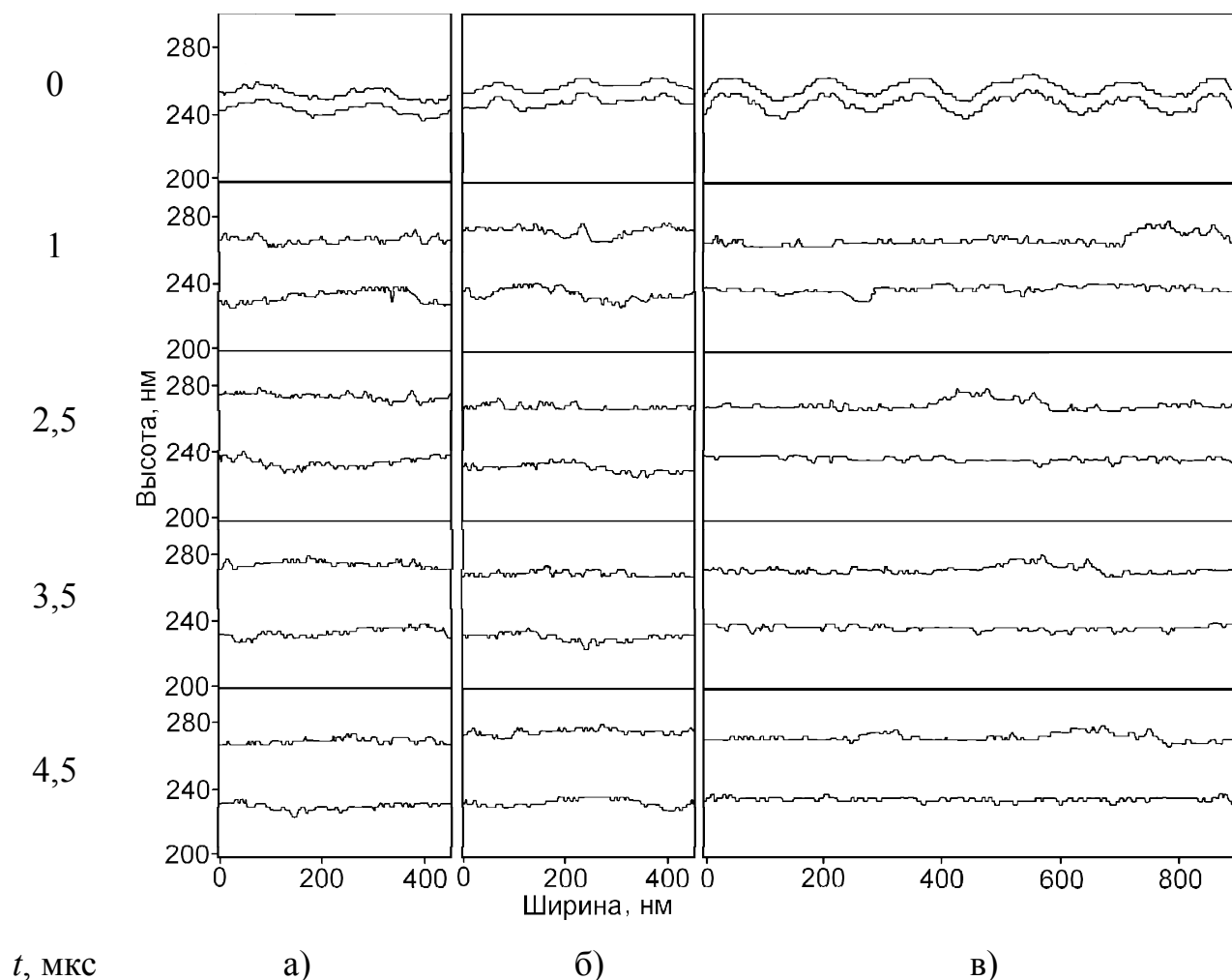


Рисунок 2.25 – Профили поверхностей верхнего и нижнего блоков для образцов (а–в) на рис. 2.11 в различные моменты времени t . Обозначения колонок соответствуют образцам, представленным на рис. 2.11

На рис. 2.25 представлены профили поверхностей рассматриваемых пар трения, построенные в различные моменты времени. Видно, что с увеличением времени взаимодействия толщина слоя трения увеличивается, а поверхности блоков становятся более гладкими.

Наличие периодичности в профилях взаимодействующих поверхностей должно проявляться в соответствующих частотах упругих волн, возникающих при их относительном перемещении. Ожидаемая частота соответствующего сигнала рассчитывается по формуле $f=v/l$, где v — скорость движения блоков относительно друг друга, l — расстояние между выступами шероховатости поверхности. На основе полученных профилей поверхностей были построены спектры Фурье ожидаемых сигналов, они представлены на рис. 2.26. Поскольку в работе использовалось быстрое преобразование Фурье, то для анализа нужно было иметь выборку данных размером, кратным некоторой степени двойки. Данные, описывающие профиль поверхности, имели размер отличный от требуемого, поэтому, в силу периодических граничных условий модели, имеющаяся выборка дополнялась до необходимого размера за счет периодического использования исходных данных.

Как видно из представленных спектров, в разные моменты времени для таких профилей более интенсивно должны проявляться то одни, то другие частоты. Кроме того, должны присутствовать пики, которые незначительно изменяют свое положение (частоту), и пики, которые незначительно изменяют свою амплитуду.

На спектрах ожидаемых сигналов наиболее явно выделяются частоты равные 70, 90, 110 и 160 МГц. Эти же частоты были обнаружены в спектрах данных датчиков модельных пар трения, представленных на рис. 2.22. Причем соответствие было более четким для регистраций давления и интенсивности напряжений. В силу изменчивости коэффициента трения в процессе взаимодействия следует ожидать, что возникающие колебания могут быть амплитудно-модулированы.

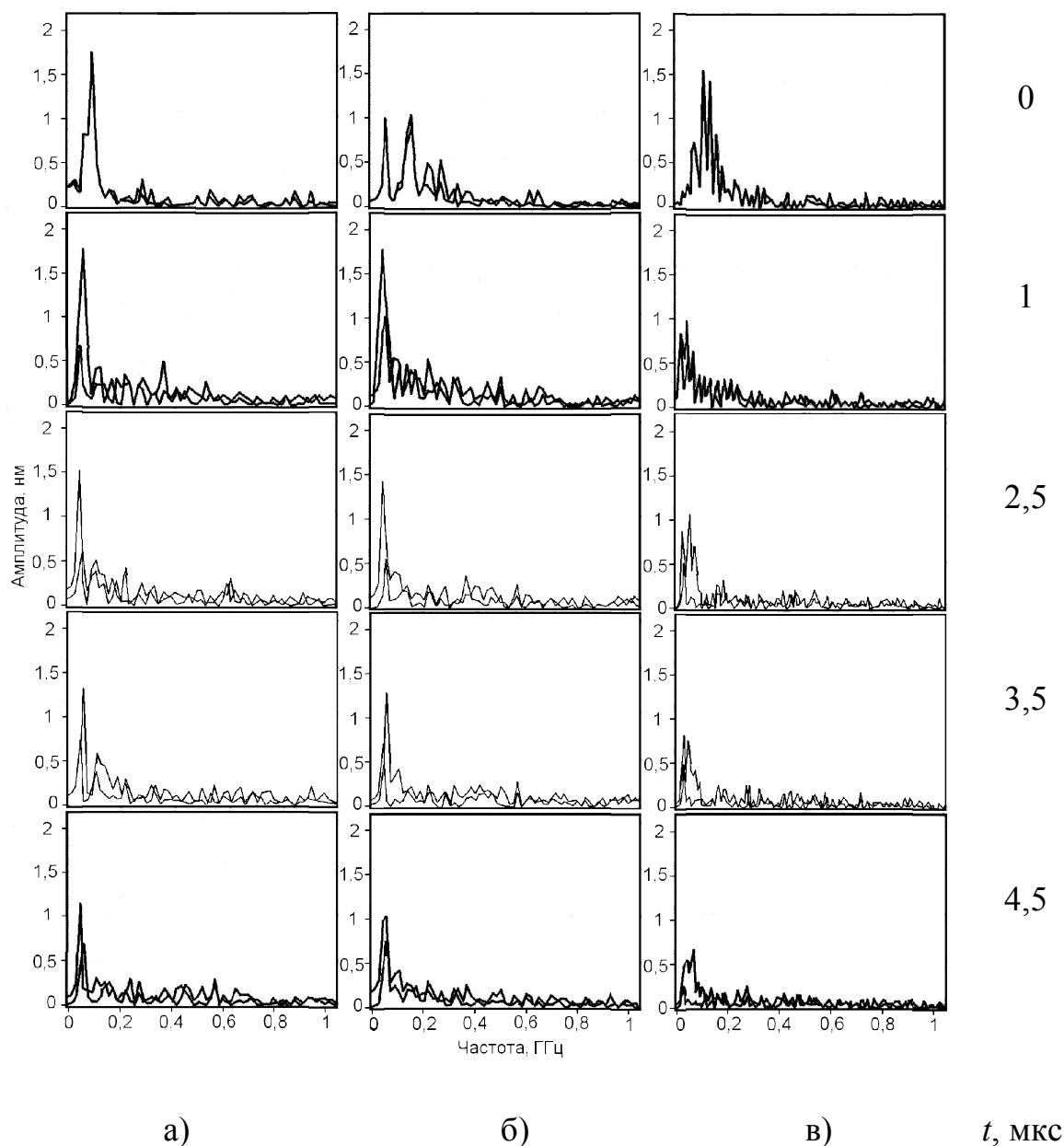


Рисунок 2.26 – Спектры ожидаемых сигналов в различные моменты времени t

2.5 Возможности частотно-временного анализа данных акустической эмиссии в изучении процесса изнашивания

Изучению акустических колебаний, генерируемых при трении скольжения, в последние годы уделяется пристальное внимание. Это вызвано не только тем, что вибрация от работающих механизмов оказывает отрицательное воздействие как на физиологию человека, так и на механическое поведение элементов самой конструкции, но и тем, что методы, базирующиеся

на принципах акустической эмиссии, лежат в основе многих современных систем неразрушающего контроля и технической диагностики. Данные методы позволяют прогнозировать разрушение элементов взаимодействующих систем и возникновение аварийных ситуаций, а также исследовать триботехнические свойства контактирующих материалов.

Известно, что спектр акустических колебаний, генерируемых в паре трения, чрезвычайно разнообразен и труден для анализа. В первую очередь он представляет собой «смесь» собственных частот различных составных элементов системы и узла трения в целом. В нем присутствуют также частоты случайной и периодической природы, звукового и ультразвукового диапазона, которые зависят от режима скольжения и условий нагружения. Кроме того необходимо принимать во внимание суперпозицию упругих волн, излучаемых множеством отдельных пятен фактического контакта, возникающих при перемещении сопряженных поверхностей. При этом генерация этих волн может сопровождаться модуляцией, а их распространение — интерференцией.

В данном подразделе предпринята попытка определения частотно-временной структуры акустического сигнала при трении стали Гадфильда [44], сопровождаемого изнашиванием, с использованием средств частотно-временного анализа.

Триботехнические испытания по типу «вал – втулка» проводились на машине трения 2168 УМТ-1 (рис. 2.27,а) [44]. В данных испытаниях использовались образцы-втулки с внутренним диаметром 31,1 мм, внешним диаметром 39 мм, шириной 10 мм. Втулки были изготовлены из стали Гадфильда (110Г13Л). Сталь Гадфильда (0,9–1,4 % С; 13,0 % Мп; 0,8–1,0 % Cr) обладает уникальными свойствами — высокой пластичностью, способностью к интенсивному деформационному упрочнению, а также низкой скоростью изнашивания при трении скольжения. Для предотвращения проворачивания втулки в держателе была сделана выточка и выполнена фиксация винтом. Контртелом служили валы диаметром 30,0 мм из стали 42ХМ4Ф, термически обработанной на твердость 56 HRC. Скорость вращения вала составляла

$\sim 40 \text{ мин}^{-1}$, что соответствовало линейной скорости $0,067 \text{ м/с}$. Нагружение производилось с помощью пневмомеханизма через втулку для создания давления порядка $1\text{--}3 \text{ МПа}$ в зоне контакта вала и втулки. Испытания проводились в условиях сухого трения.

Для регистрации звука применяли микрофон Behringer XM8500, у которого неравномерность амплитудно-частотной характеристики составляет $\pm 5 \text{ Дб}$ в интервале частот от 100 до 15000 Гц . Микрофон закреплялся на расстоянии 30 см от узла трения. Звуковой сигнал и его параметры регистрировали на персональном компьютере.

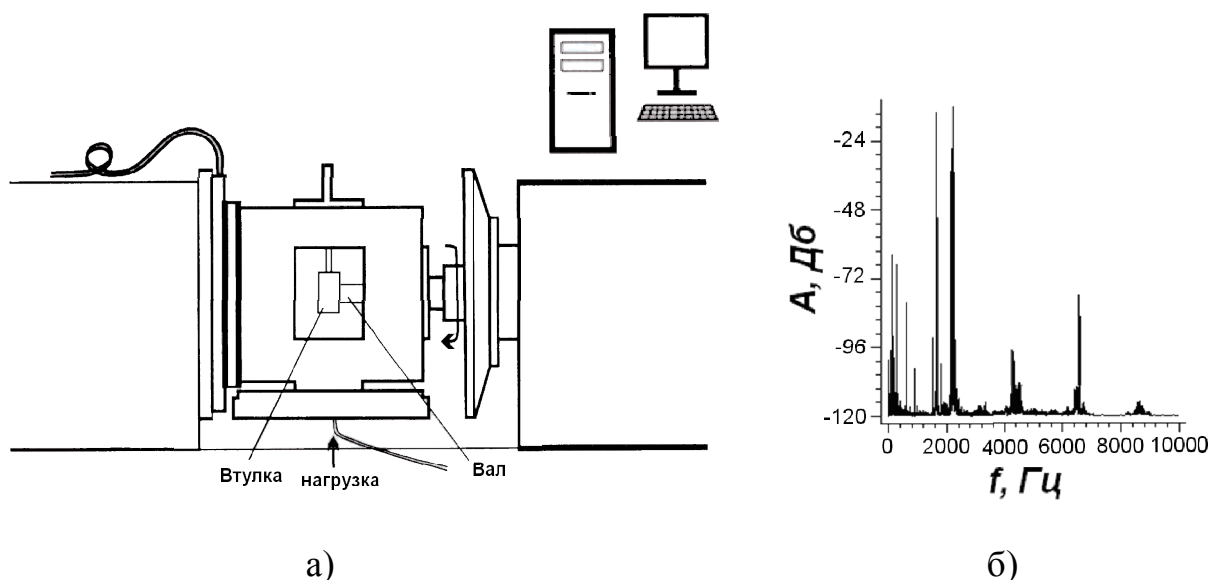


Рисунок 2.27 – Схема испытаний «вал-втулка» с записью звука при трении (а) и спектр регистрируемого сигнала (б)

На рис. 2.27,б показано Фурье-преобразование звукового сигнала, полученного на описанной выше установке [144, 44]. Заметим, что в проведенных экспериментах микрофон регистрирует звуковые волны в воздухе, которые фактически являются колебаниями давления (продольными волнами). Естественно ожидать на этом спектре собственные частоты элементов экспериментальной установки. Однако сам спектр не позволяет ответить на вопрос, по каким причинам и в какие моменты времени в процессе

эксперимента обусловлено возбуждение тех или иных резонансных частот системы.

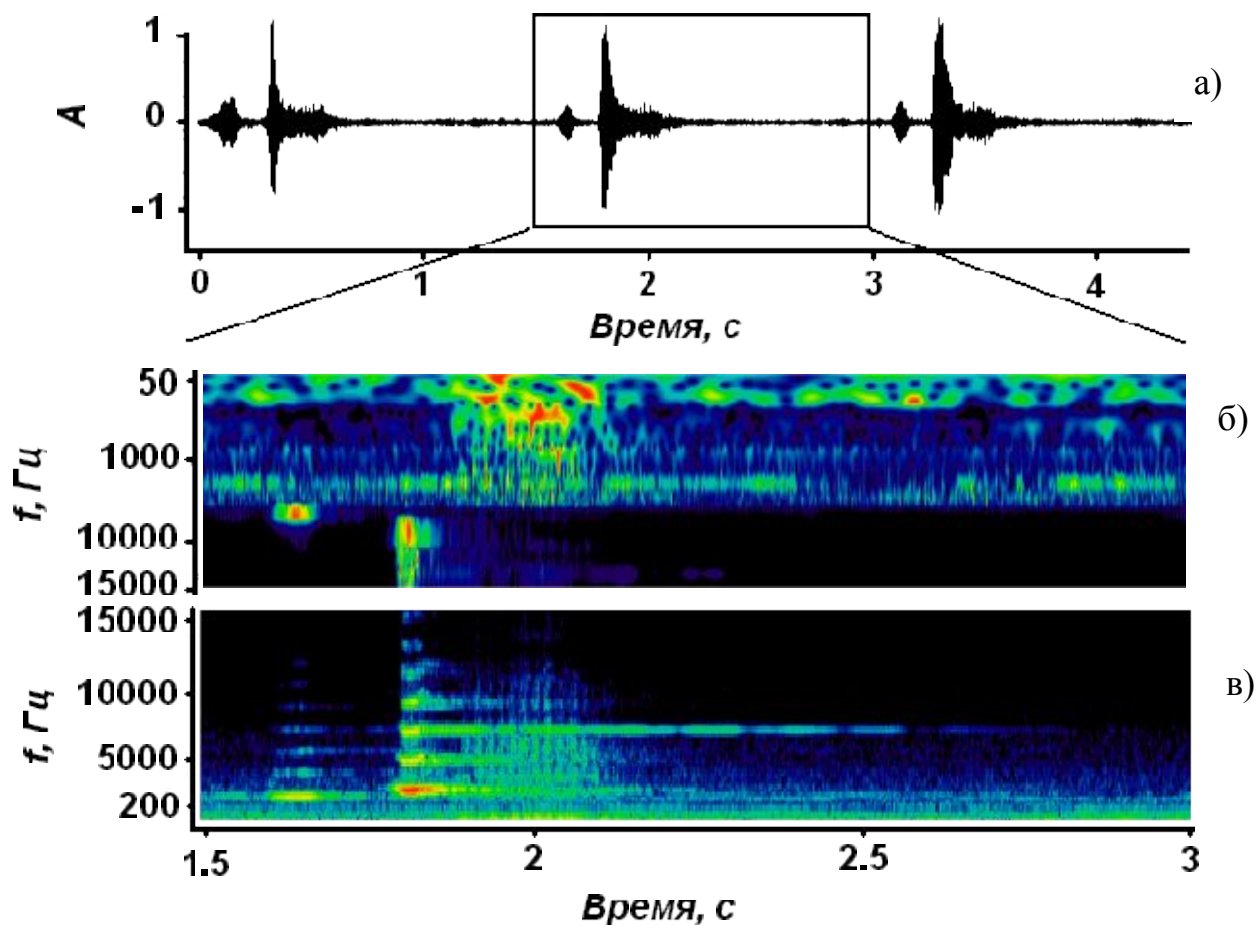


Рисунок 2.28 – Звуковой сигнал (а), его вейвлет-преобразование (б) и оконное преобразование Фурье (в)

Для ответа на этот вопрос воспользуемся средствами частотно-временного анализа и рассмотрим типичный звуковой сигнал (рис. 2.28,а). На нем видны квазипериодические всплески интенсивности колебаний, которые коррелируют с периодом вращения вала. В работе [145] было показано, что износ стали Гадфильда происходит в основном за счет окисления и срыва поверхностного слоя. Там же отмечалось, что в процессе трения на поверхности образца образуется очень тонкий (~ 5 мкм) наноструктурный слой, в котором локализуется и накапливается деформация. По мере накопления критической деформации происходит срыв наноструктурного слоя с формированием частиц износа. Было высказано предположение, что подобные

срывы и вызывают резкое повышение интенсивности акустического сигнала, в том числе и в звуковом диапазоне.

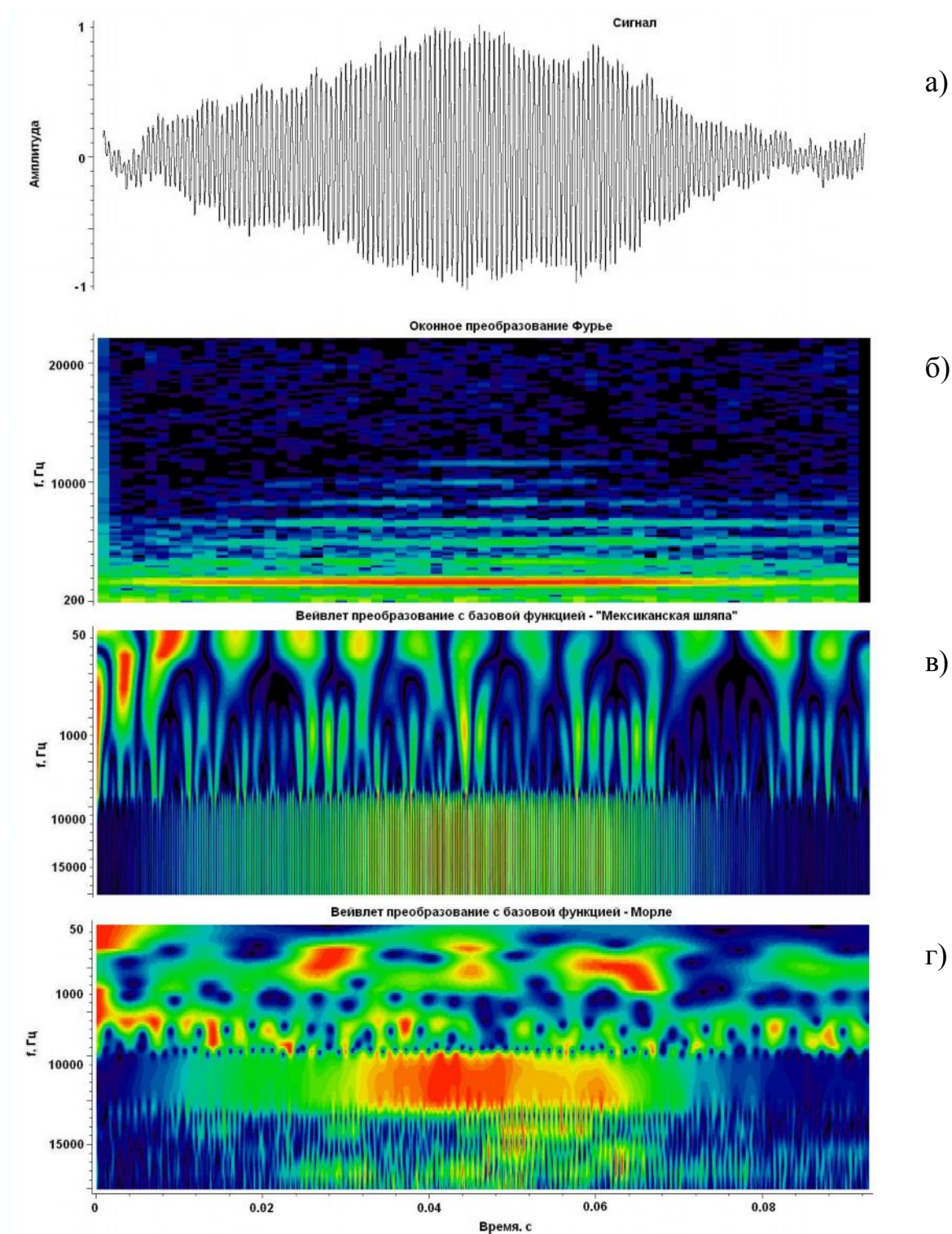


Рисунок 2.29 – Фрагмент звуковой сигнал, соответствующий всплеску интенсивности (а), его оконное преобразование Фурье (б) и вейвлет-преобразование (в,г)

На рис. 2.28,б представлено вейвлет-преобразование [131] регистрируемого сигнала. Оно показывает, что всплески интенсивности акустических колебаний происходят на фоне некоторого постоянного сигнала, который имеет однородную структуру. Частоты этого фоновых сигнала лежат в диапазоне от 10 до 900 Гц, а сами колебания являются амплитудно-модулированными некоторым непериодическим сигналом (см. рис. 2.29). Если учесть, что собственные частоты p простых однородных тел (стержень, пластина) связаны с их характерными размерами l и скоростью звука v как $p \sim v/l$ [129], то можно заключить, что фоновые колебания соответствуют собственным частотам элементов здания (стены, балки, перекрытия), а также массивных частей установки. Следует отметить, что колебания этого диапазона наблюдаются при работе установки и без узла трения, и в дальнейшем нами не рассматривались.

Из рис. 2.28 и 2.29 видно, что всплески интенсивности акустических колебаний имеют более высокую частоту и их спектр не перекрывается со спектром «фона». Типичные частоты этих всплесков — 2,2; 4,4; 6,6 и 8,6 кГц. Следует отметить, что для различных давлений прижимающей нагрузки эти частоты отличаются незначительно (до 5%). Воспользовавшись связью между собственными частотами и размерами простых тел можно заключить, что указанные частоты соответствуют таким элементам экспериментальной установки, как держатель втулки и вал с контртелом. Высокочастотная составляющая сигнала (9 и 16 кГц) проявляется одновременно со всплесками интенсивности колебаний, однако ее амплитуда незначительна, что можно объяснить отсутствием соответствующих резонаторов в экспериментальной установке.

Как отмечалось выше, резкое повышение интенсивности акустического сигнала возможно связано с разрушением поверхностного наноструктурного слоя. Так, согласно результатам работы [145], характерный размер частиц износа, а значит и характерный шаг микронеровностей поверхности в процессе изнашивания, составляет $d = 3\text{--}50$ мкм. При движении таких шероховатых

поверхностей с относительной скоростью V будут происходить множественные соударения, вызывающие генерацию упругих волн, с частотой $p = V/d$. Принимая во внимание скорость относительного движения $V = 0,067$ м/с, частота упругих колебаний будет находиться в диапазоне 2,2–0,13 кГц. Поскольку этот диапазон коррелирует с собственными частотами упомянутых элементов установки, то генерация упругих волн, связанных именно с изнашиванием наноструктурного слоя, может вызывать резонанс этих элементов, а, значит, являться причиной резкого повышения интенсивности акустического сигнала. Изменение характерного шага микронеровностей после приработки разрушенного наноструктурного слоя приводит к изменению частот генерируемых волн, а, следовательно, падению интенсивности звучания трибосистемы вследствие отсутствия соответствующих резонаторов.

Оконное преобразование Фурье экспериментального сигнала представлено на рис. 2.28, в. Качественно эти данные отражают отмеченные выше частотно-временные особенности изучаемых сигналов, полученные из анализа вейвлет-преобразований. Поскольку здесь масштаб частот линейный, по этим данным удобнее анализировать частоты составляющих общего сигнала. Однако, данные оконного преобразования Фурье не дают возможности увидеть детальные временные особенности сигнала, которые видны на вейвлет-изображениях.

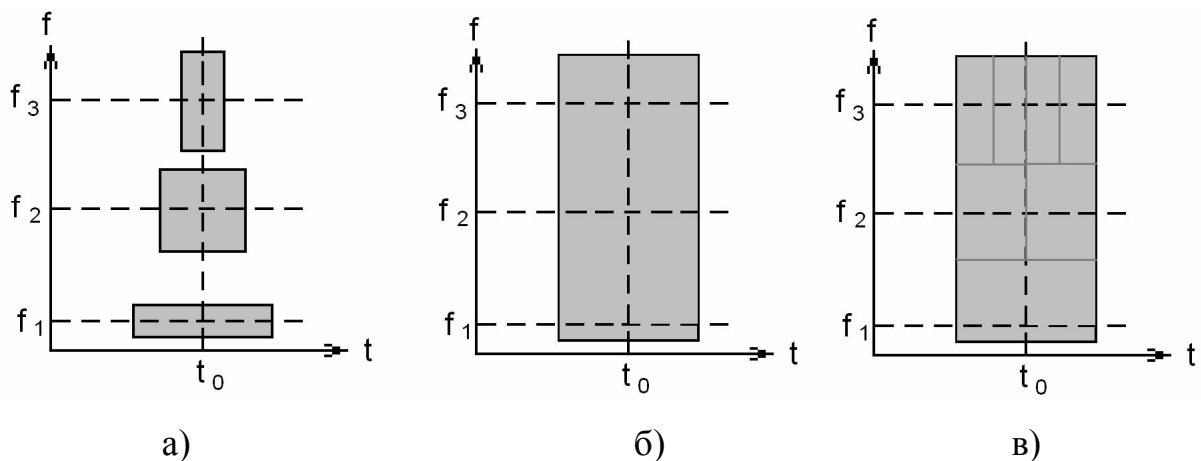


Рисунок. 2.30 – Окно вейвлета (а), окно преобразования Фурье (б) и модификация окна для преобразования Фурье в пакете «Last Wave» (в)

Важной особенностью вейвлетов является хорошее разрешение, как по времени, так и по частоте [131]. Так на рис. 2.30,*а* представлена частотно-временная локализация вейвлет-преобразования (окно вейвлета) для разных центральных частот: при высокой центральной частоте f окно сужается, а при низкой расширяется. Таким образом, высокочастотная составляющая спектра может быть представлена в подробном временном масштабе. Отметим, что при оконном преобразовании Фурье (рис. 2.30,*б*) высокочастотная составляющая представляется в виде усредненного значения в области заданного окна. Уменьшение ширины окна при этом вызовет невозможность анализа в низкочастотном диапазоне. В данной работе для вейвлет-анализа и оконного преобразования Фурье использовался пакет обработки сигналов «Last Wave» [140]. В нем реализовано преобразование Фурье с модифицированным окном, схематически представленным на рис. 2.30,*в*. Суть этого подхода состоит в том, что исходное окно разбивается на несколько подокон в области высоких частот и таким образом для низкочастотного диапазона проводится одно преобразование, для более высокого – два, для следующего – четыре и т.д.

Итак, предложенная методика, основанная на частотно-временном анализе акустических колебаний, позволила на примере стали Гадфильда установить связь между появлением квазипериодических всплесков интенсивности акустической эмиссии при трении скольжения с процессами, отвечающими за формирование частиц износа. Отметим, что экспериментальные акустические сигналы, получаемые при трении, являются достаточно сложными для анализа и содержат разнородную информацию даже в звуковом диапазоне. В связи с этим для более глубокого понимания структуры спектра таких сигналов следует привлекать средства компьютерного моделирования, в рамках которого можно детально исследовать процессы, протекающие в пятнах контакта, и анализировать влияние отдельных факторов на акустический спектр излучаемых упругих волн.