

УДК 548:53+534.22

ВЛИЯНИЕ ГРАНИЧНЫХ УСЛОВИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОВЕРХНОСТНЫХ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН, РАСПРОСТРАНЯЮЩИХСЯ В НИОБАТЕ КАЛИЯ

© 2004 г. Б. Д. Зайцев, И. Е. Кузнецова, И. А. Бородина

Саратовское отделение Института радиотехники и электроники РАН

410019 Саратов, ул. Зеленая 38

E-mail: zaitsev@ire.san.ru

Поступила в редакцию 8.04.2003 г.

Продолжено исследование влияния идеально проводящей плоскости, находящейся на некотором расстоянии от поверхности кристалла ниобата калия, на характеристики обобщенных поверхностных акустических волн Рэлея и Гуляева–Блюстейна. Проанализировано также влияние бесконечно тонкого проводящего слоя, нанесенного на поверхность пьезоэлектрика, на характеристики вышеуказанных волн. Обнаружено, что изменение проводимости такого слоя может приводить к совершенно иному результату по сравнению с приближением идеально проводящей плоскости, хотя конечные состояния рассматриваемых воздействий (электрически открытая и электрически замкнутая поверхности) одинаковы. Приводится возможное физическое объяснение этого расхождения.

ВВЕДЕНИЕ

До недавнего времени считалось, что для поверхностных акустических волн (ПАВ), распространяющихся в пьезоэлектрических кристаллах, электрическое закорачивание поверхности всегда сохраняет тип волны с незначительным изменением структуры и приводит к уменьшению ее скорости. Это подтверждалось как многочисленными расчетами, так и экспериментами [1, 2]. Однако в последние годы появился ряд публикаций [3–6], в которых сообщается о том, что для сильных пьезоэлектриков подобное утверждение не всегда справедливо. Например, было теоретически предсказано, что существуют такие кристаллографические ориентации, для которых металлизация поверхности полубезграничного кристалла ниобата калия [3, 4] или пьезоэлектрической структуры на его основе [5] может привести к необычному явлению, а именно к увеличению скорости поверхностных акустических волн. Возможность существования подобного эффекта была также экспериментально продемонстрирована в статье [6] для ПАВ Рэлея, распространяющейся вдоль оси $X Y + 128^\circ$ – среза кристалла ниобата лития. В этом случае исследуемые образцы ниобата лития были подвергнуты специальной обработке, после которой ионы лития оказались частично замещенными протонами в тонком приповерхностном слое. В качестве гипотезы, объясняющей эффект увеличения скорости ПАВ при металлизации поверхности, было высказано

предположение о преобразовании типа поверхностной волны или возникновении гибридных связанных волн.

Известна также работа [7], в которой было теоретически проанализировано влияние идеально проводящей плоскости, расположенной на некотором расстоянии d от поверхности Y – среза ниобата калия, на характеристики обобщенных поверхностных акустических волн, распространяющихся вдоль направления $X + 15^\circ$. Предсказано еще одно необычное явление, а именно, показано, что при удалении такой плоскости от поверхности пьезоэлектрика возможно существенное изменение структуры волны и преобразование “обобщенной волны Гуляева–Блюстейна” в обобщенную волну Рэлея.

В настоящей работе продолжен анализ поведения характеристик поверхностных акустических волн, распространяющихся в $Y - X + 15^\circ$ ниобате калия, при плавном изменении электрических граничных условий. Это может быть сделано двумя способами, а именно, удалением идеально проводящей плоскости от поверхности пьезоэлектрика или изменением проводимости бесконечно тонкого проводящего слоя, нанесенного на поверхность ниобата калия. Проводится сравнение результатов, полученных указанными способами плавного перехода от электрически замкнутой к электрически открытой поверхности. Особенностью всех расчетов, используемых в работе, является то, что при минимизации модуля

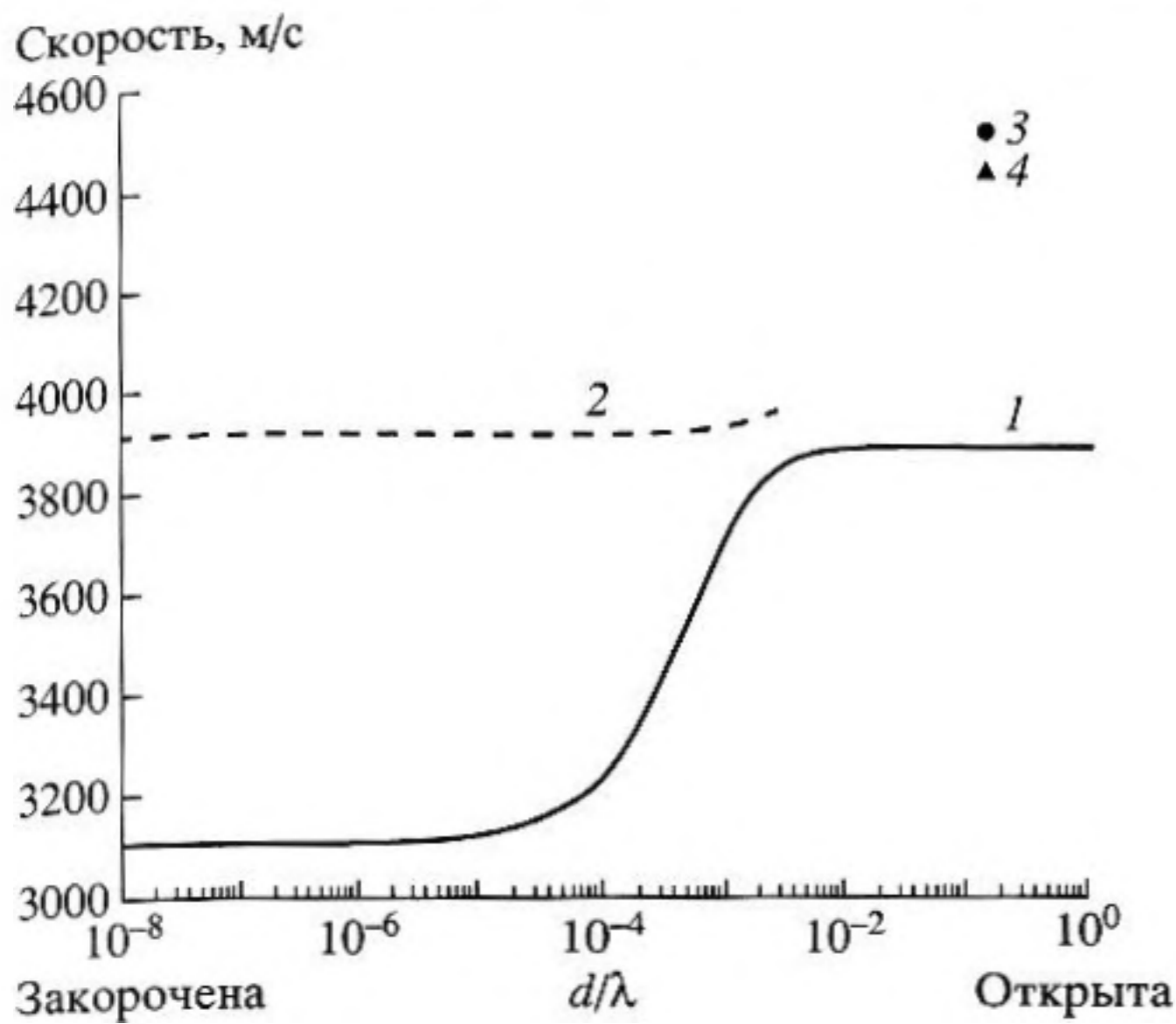


Рис. 1. Зависимости фазовых скоростей “обобщенной ПАВ Гуляева-Блюстейна” – обобщенной волны Рэлея (ветвь 1) и обобщенной волны Рэлея (ветвь 2) в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от величины вакуумного зазора d/λ между идеально проводящим экраном и поверхностью кристалла. 3 и 4 – быстрая и медленная квазипоперечные объемные волны.

детерминанта матрицы граничных условий, скорость представлялась в комплексном виде [8]. Действительная ее часть соответствовала фазовой скорости, а мнимая часть – затуханию, связанному либо с утекающим характером анализируемой волны [8], либо с присутствием проводящего слоя. Для расчета использовались материальные постоянные ниобата калия, взятые из [9].

Следует отметить, что на наш взгляд целесообразно различать “обобщенные волны Гуляева-Блюстейна” и обобщенные волны Рэлея. Под “обобщенной волной Гуляева-Блюстейна” будем понимать пьезоактивную поверхностную волну с тремя компонентами механического смещения, эллипс поляризации которой наиболее близок к поверхности кристалла [7]. Если же указанный эллипс наиболее близок к саггитальной плоскости, то такую волну будем считать обобщенной волной Рэлея.

1. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАВ В СТРУКТУРЕ ИДЕАЛЬНАЯ ПРОВОДЯЩАЯ ПЛОСКОСТЬ–ВАКУУМ–ПЬЕЗОКРИСТАЛЛ

Рассмотрим более подробно результаты анализа влияния бесконечно тонкой идеально проводящей плоскости, расположенной на некотором расстоянии d от свободной поверхности пьезоэлектрического материала, на характеристики обобщенных поверхностных акустических волн.

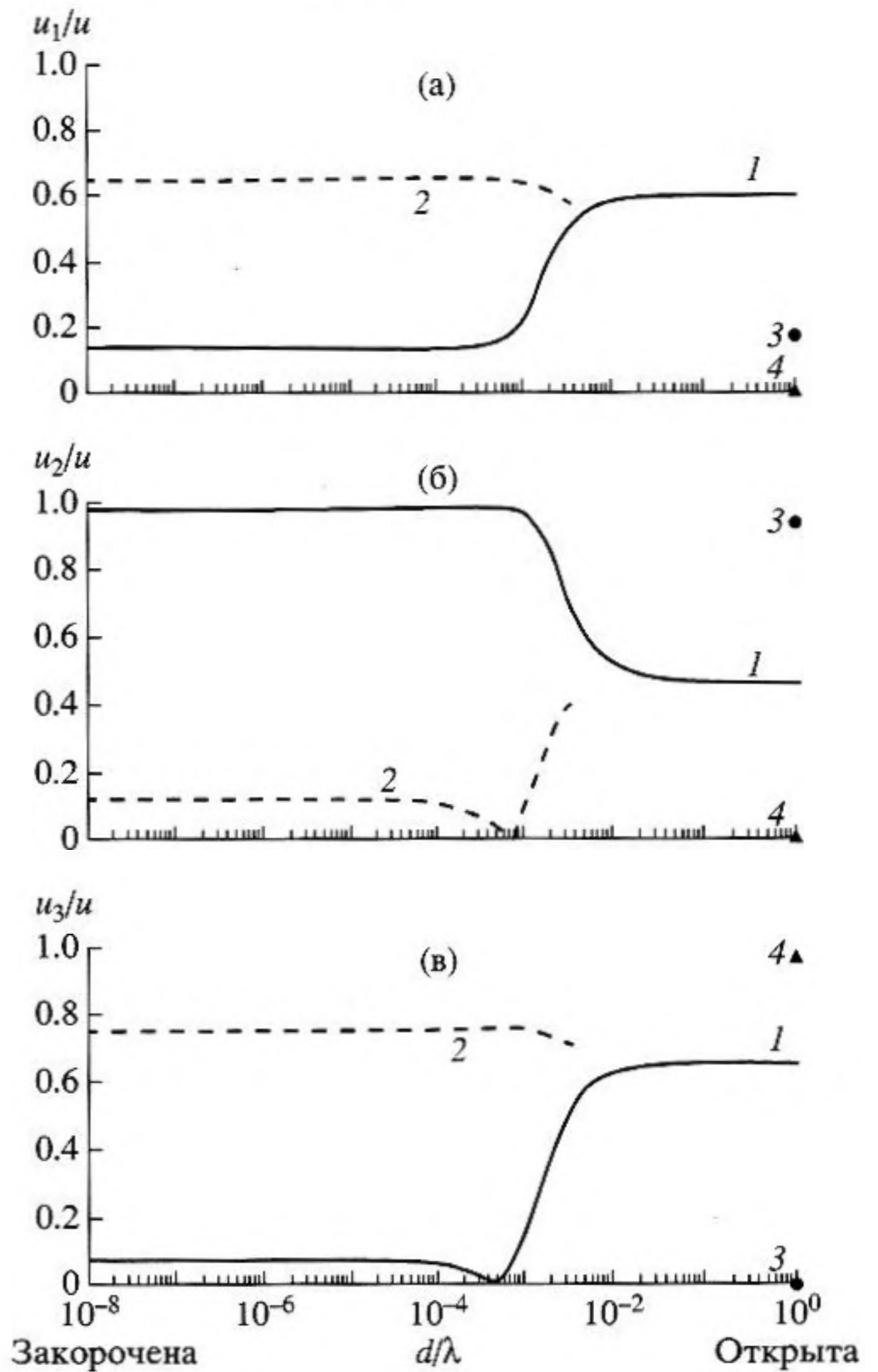


Рис. 2. Зависимости нормализованных компонент механического смещения частиц на поверхности u_1/u (а) u_2/u (б) и u_3/u (в) обобщенных ПАВ Гуляева-Блюстейна (1) и Рэлея (2) в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от величины вакуумного зазора d/λ между идеально проводящим экраном и поверхностью кристалла (а). 3 и 4 – быстрая и медленная квазипоперечные объемные волны.

Как показано в [7], при увеличении расстояния d в пределах от 0 до $\sim 0.1\lambda$, где λ – длина волны, осуществляется плавный переход от состояния с электрически закороченной поверхностью пьезокристалла к состоянию с электрически свободной поверхностью. В результате теоретического анализа были найдены зависимости скорости и компонент механического смещения частиц обобщенных поверхностных волн, распространяющихся в $Y-X+15^\circ$ кристалле ниобата калия, от величины нормированного вакуумного зазора d/λ . Зависимости фазовой скорости и нормированных компонент механического смещения u_1/u ,

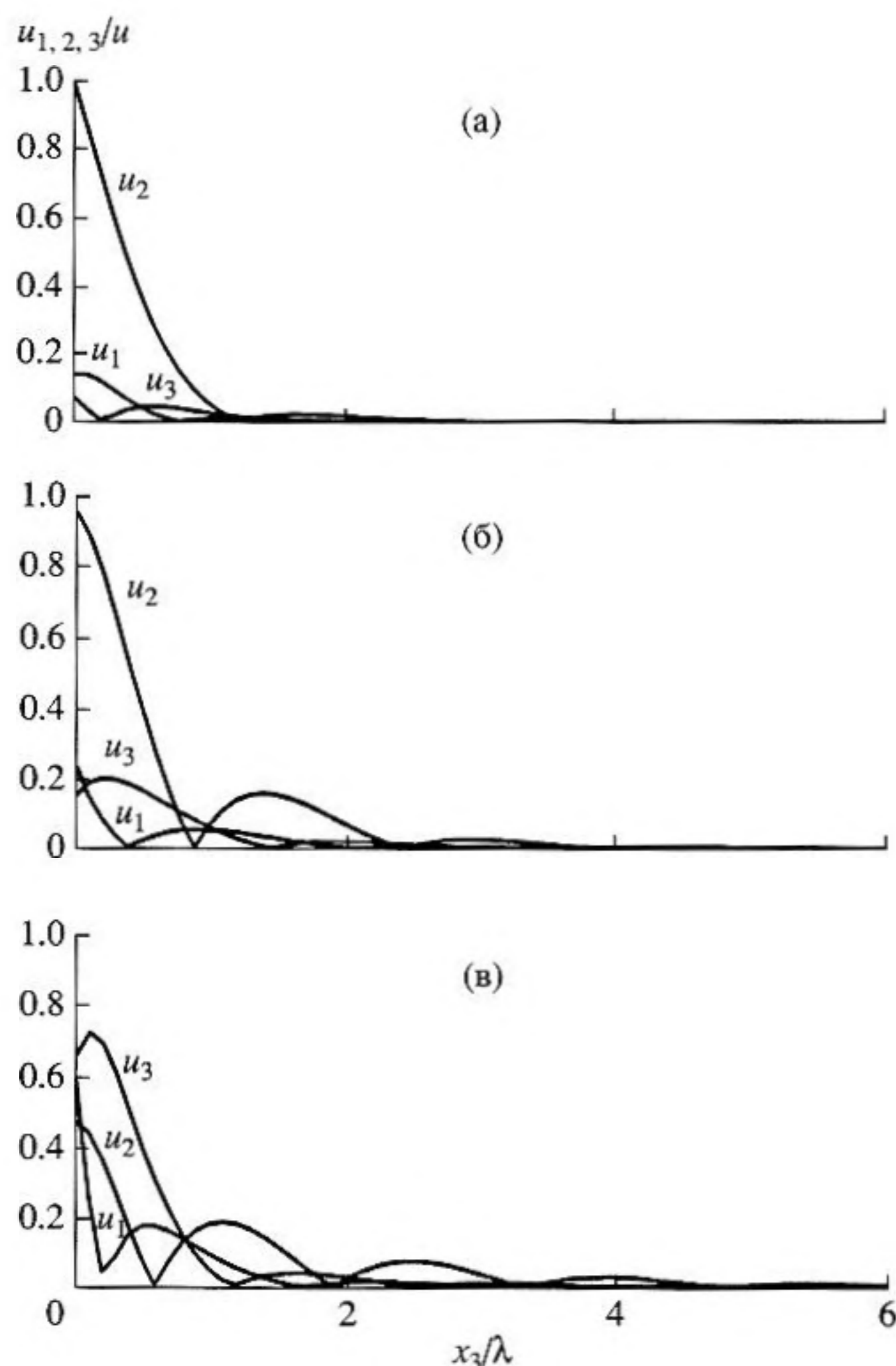


Рис. 3. Зависимости нормализованных компонент механического смещения частиц u_1/u , u_2/u и u_3/u “обобщенной волны Гуляева-Блюстейна” в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от глубины кристалла x_3/λ для различных значений вакуумного зазора d/λ между идеально проводящим экраном и поверхностью кристалла. $d/\lambda = 10^{-8}$ (а), 10^{-3} (б) и 10^{-1} (в).

u_2/u и u_3/u ($u = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2}$) на поверхности пьезоэлектрика от нормированного вакуумного зазора d/λ представлены соответственно на рис. 1 и 2. Здесь ось x_1 совпадает с направлением распространения волны, ось x_3 направлена нормально к поверхности, а ось x_2 лежит на поверхности и перпендикулярна направлению распространения. Анализ полученных зависимостей показал, что при данной кристаллографической ситуации существует две ветви решения. Первая ветвь, как видно из рис. 2 (кривая 1), соответствует “обобщенной волне Гуляева-Блюстейна”, если поверхность закорочена, поскольку вторая компонента механического смещения u_2 этой волны существенно больше, чем первая u_1 и третья u_3 компо-

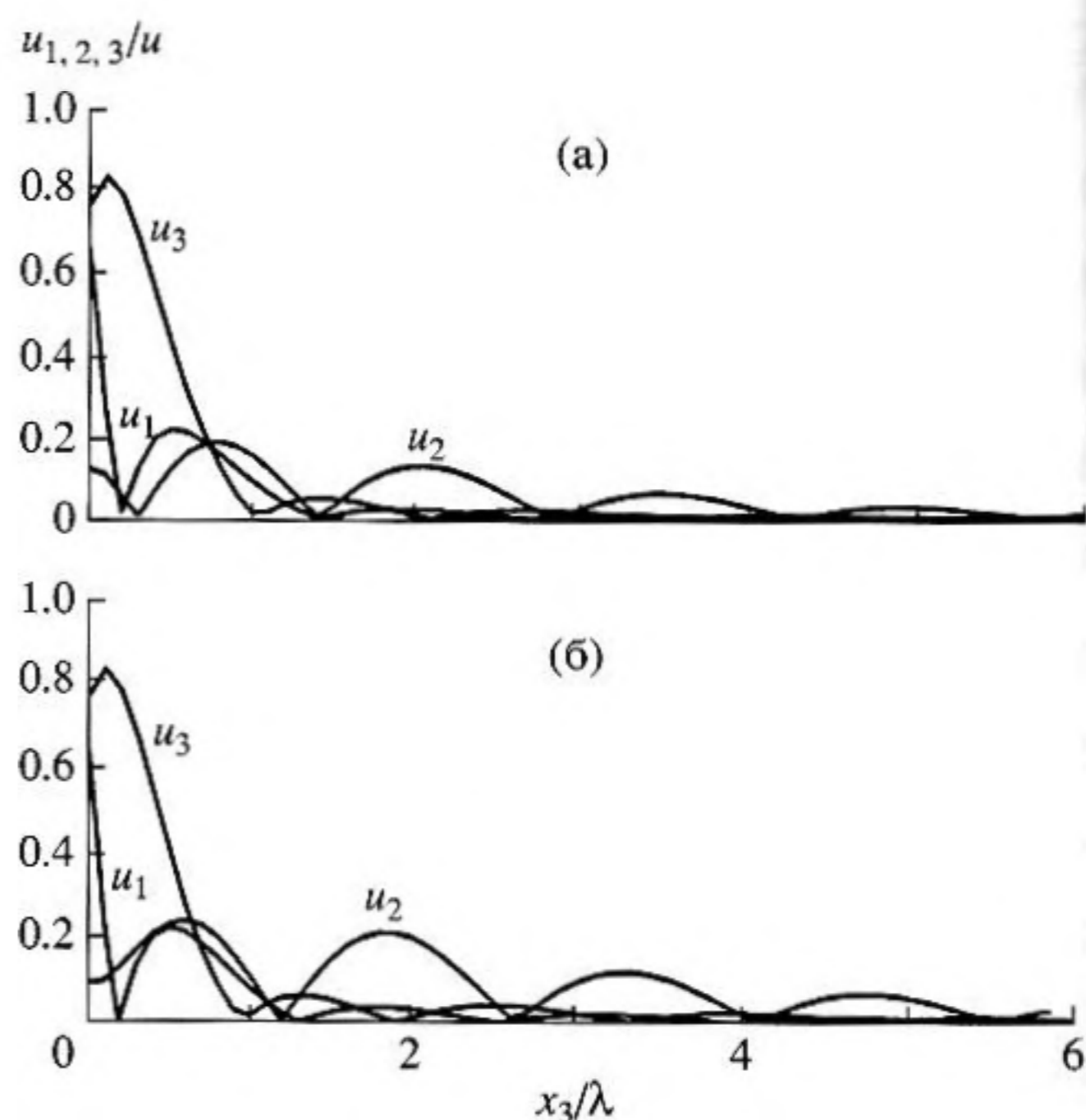


Рис. 4. Зависимости нормализованных компонент механического смещения частиц u_1/u , u_2/u и u_3/u обобщенной волны Рэлея в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от глубины кристалла x_3/λ для различных значений вакуумного зазора d/λ между идеально проводящим экраном и поверхностью кристалла. $d/\lambda = 10^{-8}$ (а) и 10^{-3} (б).

ненты. Вторая же ветвь решения (кривая 2) в этом случае соответствует обобщенной волне Рэлея, у которой максимальными являются первая u_1 и третья u_3 компоненты механического смещения. Дальнейший анализ зависимостей, приведенных на рис. 2, показывает, что с увеличением расстояния d от 0 до λ “обобщенная волна Гуляева-Блюстейна” (кривая 1), плавно трансформируется в обобщенную волну Рэлея. Что касается второй ветви решения, соответствующей обобщенной волне Рэлея (кривая 2), то ее структура практически не меняется, но ее инкремент затухания нарастает с увеличением расстояния d . При зазоре $d = 0.002\lambda$ эта волна перестает быть распространяющейся, и второе решение исчезает. На рис. 3 и 4 приведено распределение нормированных компонент механического смещения по глубине кристалла при различных значениях зазора d для первой и второй ветвей, соответственно. Видно, что обе волны являются достаточно сильно локализованными вблизи поверхности. Однако, для ветви 1 (рис. 3) при зазоре $d/\lambda \in [10^{-8}; 10^{-3}]$ максимальной компонентой является u_2 , которая с ростом d/λ уменьшается и при $d/\lambda = 10^{-2}$ наибольшей становится компонента u_3 . Это также подтверждает сделанный выше вывод о плавной трансформации “обобщенной волны Гуляева-

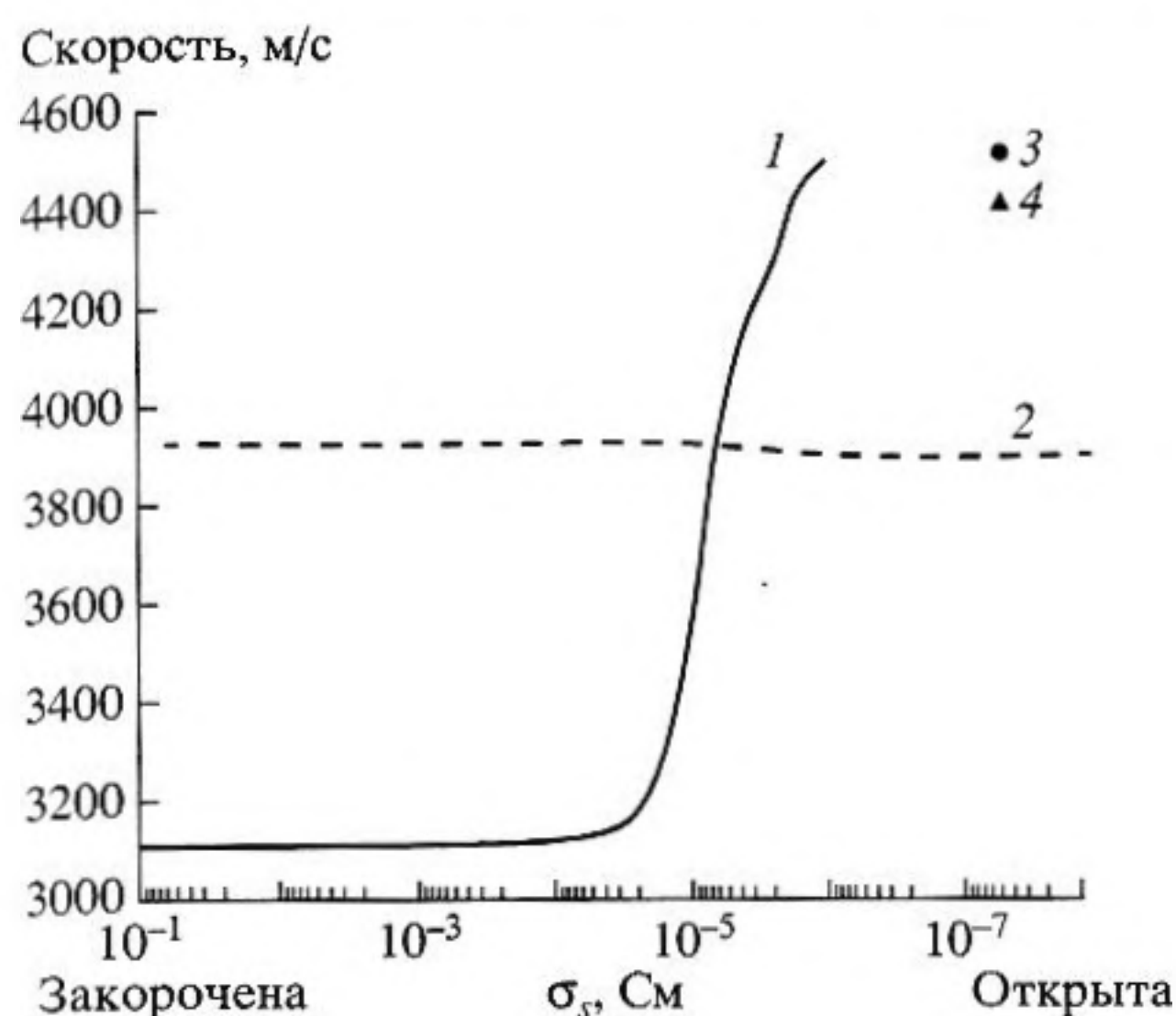


Рис. 5. Зависимости фазовых скоростей обобщенных ПАВ Гуляева-Блюстейна (1) и Рэлея (2), распространяющихся в направлении $X + 15^\circ Y$ -среза ниобата калия от проводимости тонкого слоя на поверхности кристалла. 3 и 4 – быстрая и медленная квазипоперечные объемные волны.

Блюстейна” в обобщенную волну Рэлея. Что касается ветви 2 (рис. 4), то во всем диапазоне изменения величины зазора d распределение амплитуд смещения по глубине остается практически неизменным. На рис. 1 и 2 приведены также скорости и нормированные значения компонент механического смещения для быстрой и медленной квазипоперечных сдвиговых волн, распространяющихся в том же направлении.

Таким образом, для ниобата калия существует кристаллографическая ориентация, при которой удаление идеально проводящей плоскости от поверхности кристалла может привести к плавному преобразованию “обобщенной волны Гуляева-Блюстейна” в обобщенную волну Рэлея.

2. ХАРАКТЕРИСТИКИ ПАВ В СТРУКТУРЕ ТОНКИЙ ПРОВОДЯЩИЙ СЛОЙ-ПЬЕЗОЭЛЕКТРИК

Рассмотрим теперь другую возможность плавного изменения электрических граничных условий, а именно исследуем изменение скорости и компонент механического смещения обобщенных поверхностных волн Рэлея и Гуляева-Блюстейна в зависимости от проводимости бесконечно тонкого проводящего слоя, расположенного на поверхности кристалла ниобата калия. Так же, как и в предыдущем случае, анализировалось $X + 15^\circ$ направление распространения на Y -срезе ниобата калия. В результате численного решения граничной задачи с использованием стандартных уравнений упругости и электростатики и стан-

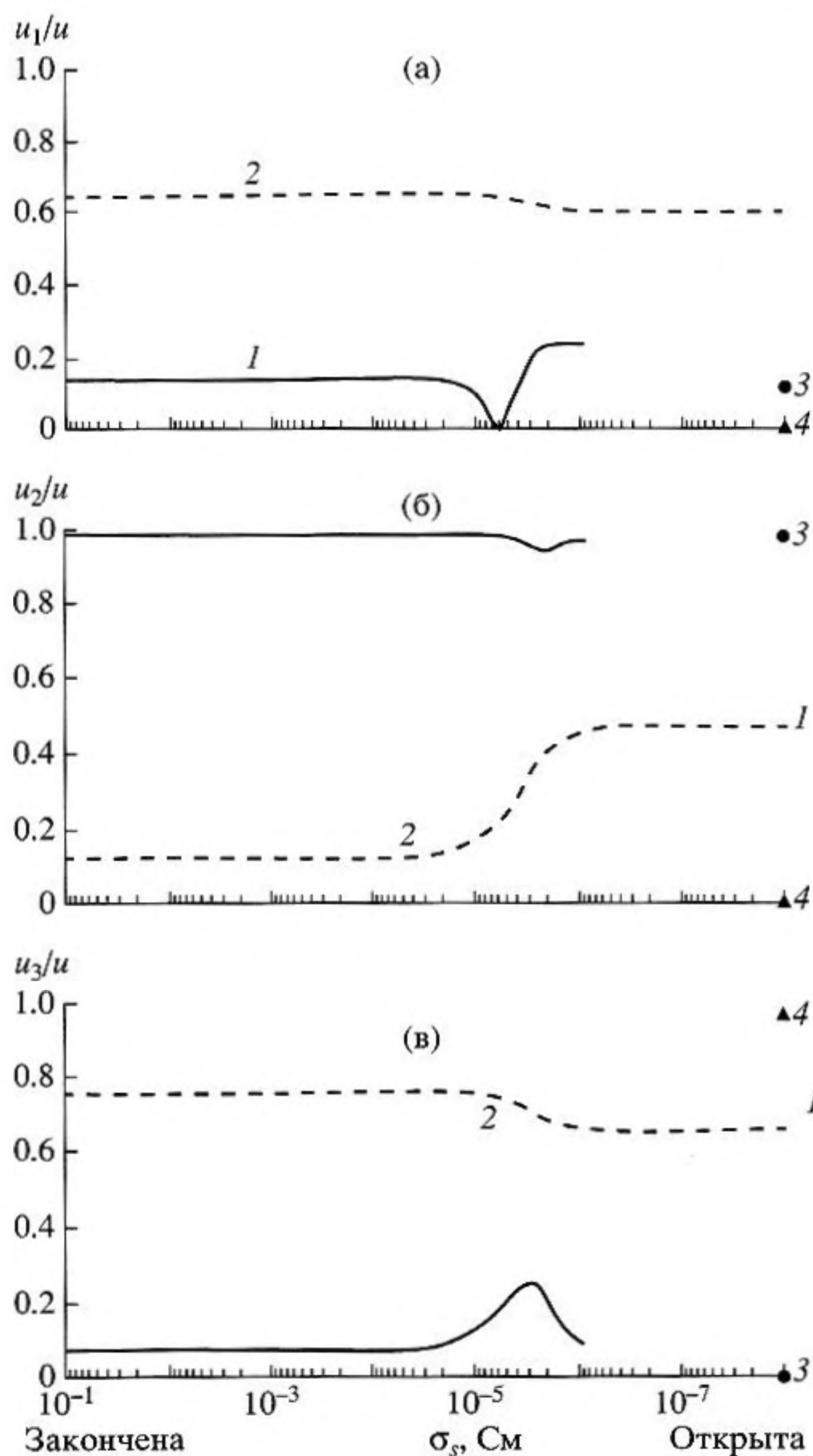


Рис. 6. Зависимости нормированных компонент механического смещения частиц на поверхности u_1/u (а) u_2/u (б) и u_3/u (в) обобщенных ПАВ Гуляева-Блюстейна (1) и Рэлея (2) в $Y - X + 15^\circ$ срезе ниобата калия от проводимости тонкого слоя на поверхности кристалла. 3 и 4 – быстрая и медленная квазипоперечные объемные волны.

дартных механических и электрических граничных условий, достаточно подробно описанных в [10], были получены зависимости фазовой скорости ПАВ от проводимости тонкого слоя, которые приведены на рис. 5. На рис. 6 представлены зависимости нормированных компонент механического смещения частиц на поверхности пьезоэлектрика от проводимости слоя. Видно, что и в этом случае также существуют две ветви решения. Анализ полученных зависимостей показал,

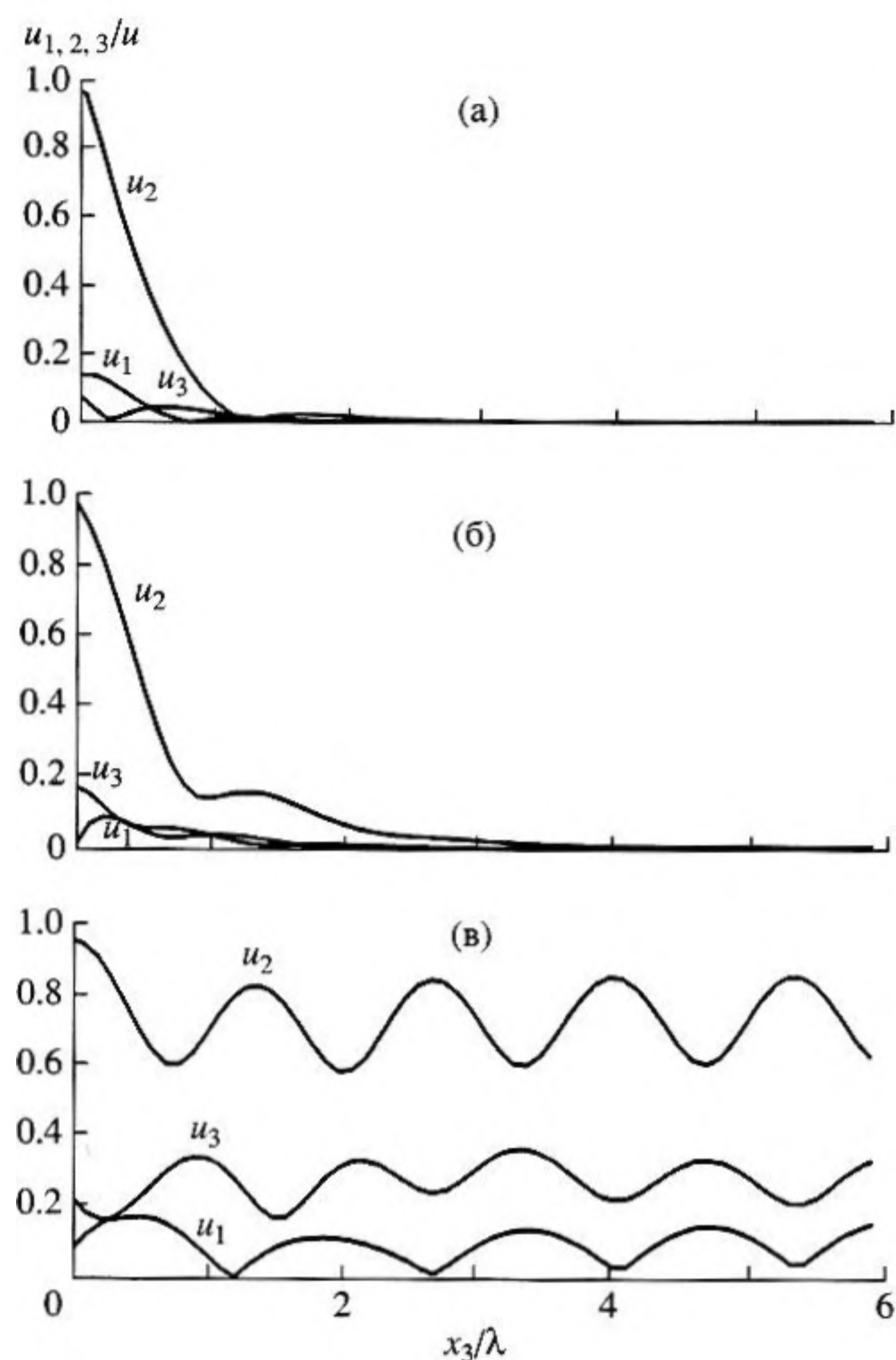


Рис. 7. Зависимости нормализованных компонент механического смещения частиц u_1/u , u_2/u и u_3/u "обобщенной волны Гуляева-Блюстейна" в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от глубины кристалла x_3/λ для различных значений поверхностной проводимости: $\sigma_s = 10^{-1}$ См (а), 5.8×10^{-6} См (б) и 10^{-6} (в).

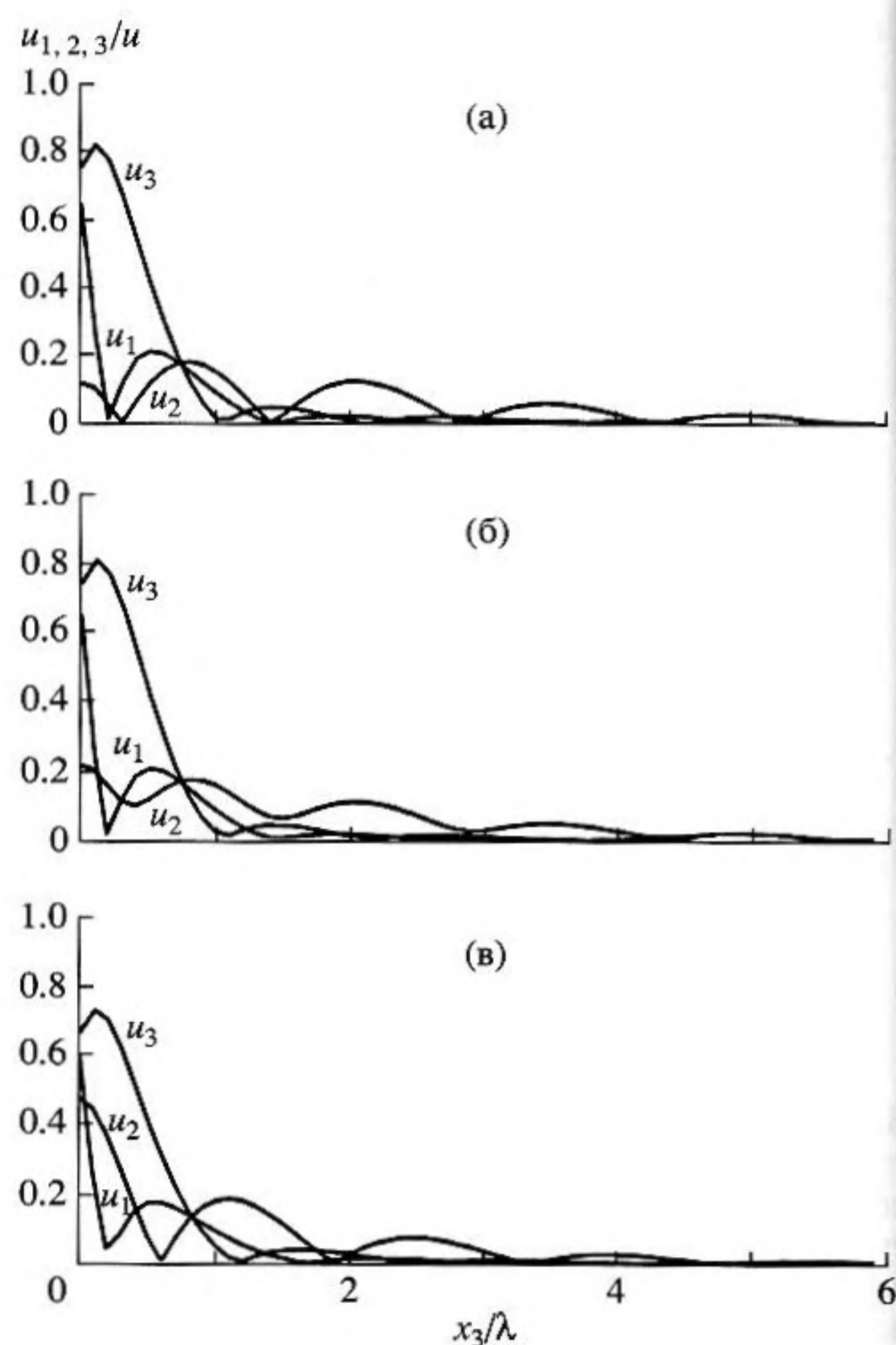


Рис. 8. Зависимости нормализованных компонент механического смещения частиц u_1/u , u_2/u и u_3/u обобщенной волны Рэлея в $Y-X+15^\circ$ срезе ниобата калия от глубины кристалла x_3/λ для различных значений поверхностной проводимости: $\sigma_s = 10^{-1}$ См (а), 5.8×10^{-6} См (б) и 10^{-8} (в).

что, как и в предыдущем случае, при закороченной поверхности первая ветвь соответствует "обобщенной волне Гуляева-Блюстейна", поскольку $u_2/u > u_1/u$ и $u_2/u > u_3/u$ (рис. 6). С уменьшением проводимости слоя скорость и инкремент затухания этой волны растут, достигают максимума при $\sigma_s = 10^{-6}$ См, т.е. волна перестает быть распространяющейся, а затем первая ветвь решения исчезает. По-видимому, на электрически открытой поверхности она трансформируется в быструю квазипоперечную объемную волну ($V = 4531$ м/с) с поляризацией $(-0.133; 0.991; 0)$ (рис. 5 и 6). Что касается структуры рассматриваемой волны на поверхности кристалла, то она практически не меняется (рис. 6), т.е. тип волны остается прежним. На рис. 7 приведены зависимости нормированных компонент механического смещения

частиц от глубины кристалла при различных значениях поверхностной проводимости. Видно, что во всем диапазоне изменения проводимости поверхностного слоя вторая компонента механического смещения u_2 остается максимальной. Что касается глубины проникновения (δ) рассматриваемой волны, то с уменьшением поверхностной проводимости она увеличивается и при $\sigma_s = 10^{-6}$ см достигает $\delta \approx 500\lambda$. Данный факт подтверждает сделанное выше предположение о возможности трансформации рассматриваемой волны в быструю квазипоперечную объемную волну.

Вторая ветвь решения (кривая 2 на рис. 5) соответствует обобщенной волне Рэлея, поскольку, как видно из рис. 6, вторая компонента механического смещения u_2 в данном случае является минимальной. С уменьшением проводимости

структура рассматриваемой волны остается практически неизменной. На рис. 8 приведены зависимости нормированных компонент механического смещения частиц от глубины кристалла при различных значениях поверхностной проводимости. Видно, что волна является сильно локализованной, а ее третья компонента механического смещения u_3 всегда остается максимальной. Скорость же этой волны с ростом проводимости увеличивается и при больших значениях проводимости слоя (электрически закороченная поверхность), она оказывается больше, чем скорость при нулевом значении проводимости слоя (электрически открытая поверхность). В этом случае эффективный коэффициент электромеханической связи $K_2 = 2\Delta v/v$ становится отрицательным.

Рисунок 5 показывает также, что возможна ситуация, когда вдоль одного направления при определенном значении проводимости поверхностного слоя ($\sigma_s = 5.8 \times 10^{-6}$ См) распространяются две пьезоактивные волны, обладающие одинаковой фазовой скоростью. Однако эти волны различаются степенью локализации и величиной компонент механического смещения, как на поверхности кристалла, так и по его глубине (рис. 6, 7б, 8б). Следует также отметить, что "обобщенная волна Гуляева-Блюстейна" обладает существенно большим затуханием, чем обобщенная волна Рэлея (рис. 9). Плавность изменения характеристик исследуемых волн при изменении поверхностной проводимости в области точки пересечения кривых на рис. 5 исключает ошибочный переход с одного типа решения на другой. Сравнение рис. 1 и 5 также показывает, что максимальное значение скорости "обобщенной волны Гуляева-Блюстейна" при приближении идеально проводящей плоскости составляет 3851 м/с, а при изменении проводимости поверхностного слоя – 4500 м/с.

Таким образом, проведенное исследование привело к совершенно неожиданному выводу. Оказалось, что изменение проводимости слоя на поверхности пьезоэлектрика может приводить к иному результату по сравнению с приближением идеально проводящей плоскости, хотя конечные состояния рассматриваемых воздействий (электрически открытая и электрически закороченная поверхность) абсолютно одинаковы. Анализ показал, что в отличие от удаления идеально проводящей плоскости от поверхности пьезокристалла, изменение проводимости тонкого слоя на его поверхности не приводит к преобразованию типа исследуемых волн. В этом случае реализуется ситуация, при которой металлизация поверхности

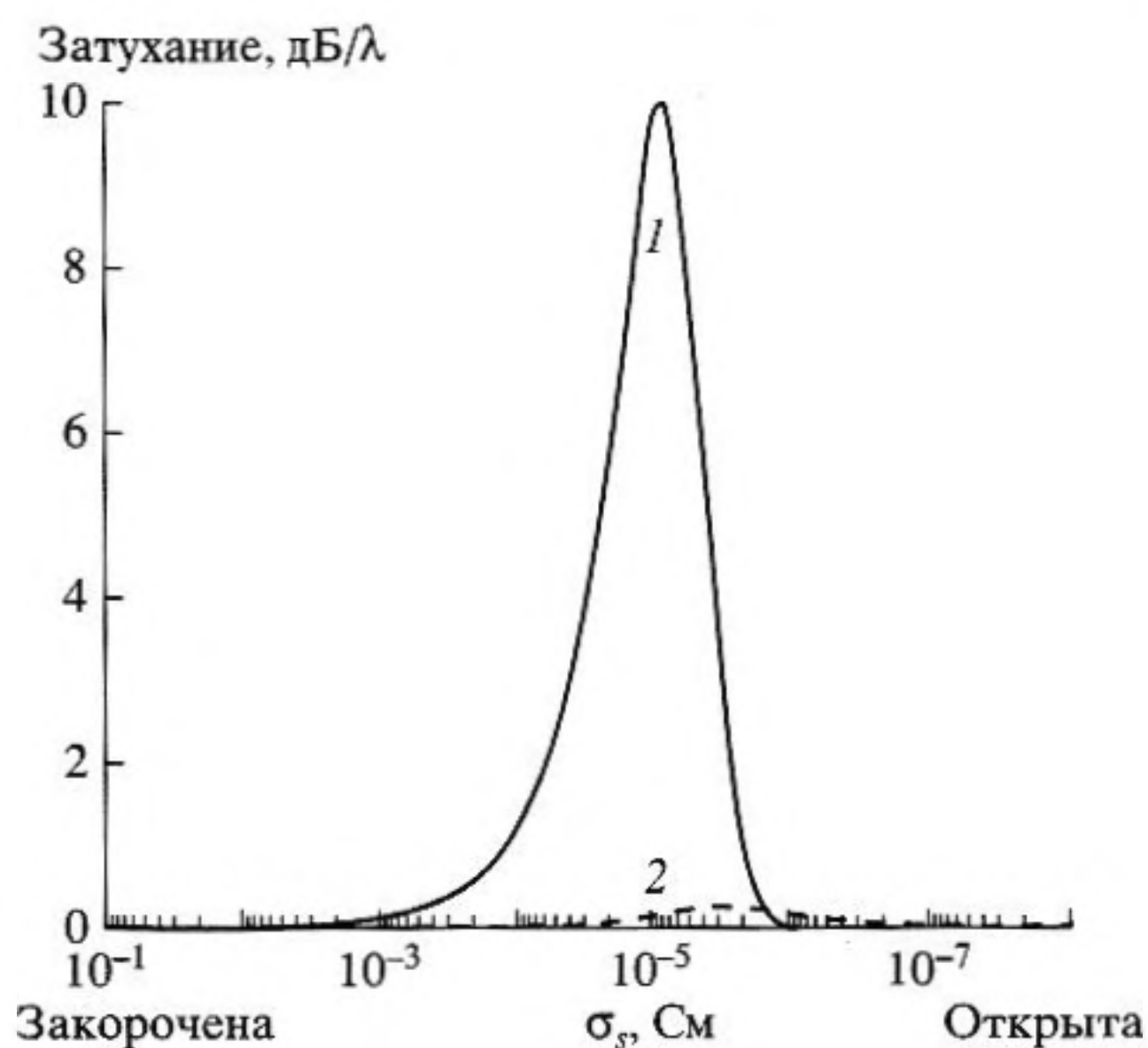


Рис. 9. Зависимости затухания на длину волны обобщенных ПАВ Гуляева-Блюстейна (1) и Рэлея (2), распространяющихся в направлении $X + 15^\circ Y$ -среза ниобата калия от проводимости тонкого слоя на поверхности кристалла.

увеличивает скорость поверхностной акустической волны.

3. ВЫВОДЫ

Теоретический анализ обобщенных поверхностных акустических волн, распространяющихся в $Y - X + 15^\circ$ ниобате калия, показал, что различные способы перехода полубесконечного кристалла из состояния с электрически закороченной поверхностью к состоянию с электрически открытой поверхностью могут приводить к различным результатам. Если такой переход достигается удалением идеально проводящей плоскости от поверхности пьезокристалла, то возможно преобразование "обобщенной волны Гуляева-Блюстейна" в обобщенную волну Рэлея. При этом скорость волны увеличивается, т.е. волна характеризуется положительным коэффициентом электромеханической связи, определенным через относительное изменение скорости. Если же переход от одного состояния в другое осуществляется путем изменения проводимости тонкого слоя на поверхности пьезоэлектрика, то никакого преобразования типа волны не происходит. Но при этом скорость обобщенной поверхностной волны Рэлея для электрически закороченной поверхности оказывается больше, чем для электрически открытой поверхности. В этом случае коэффициент электромеханической связи, определенный через относительное изменение скорости, оказывается как бы отрицательным.

По-видимому, причина того, что указанные выше способы перевода кристалла от электрически замкнутого состояния к электрически свободному, приводят к различным результатам, заключается в следующем. При удалении проводящей плоскости от поверхности пьезоэлектрического кристалла должна совершаться работа за счет внешней силы, которая увеличивает суммарную энергию поверхностной волны и изменяет ее поляризацию. В случае же изменения поверхностной проводимости тонкого проводящего слоя внешняя сила как бы отсутствует, и поляризация волны не меняется.

Материалы настоящей статьи получены при поддержке грантом РФФИ № 01-02-16266а.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Slobodnik A.J.* Microwave acoustic handbook. Bedford: Microwave Phys. Lab., 1973.
2. *Wixforth A., Scriba J., Wassermeier M., Kotthaus J.P., Weimann J., Schlapp W.* Interaction of surface acoustic waves with a two-dimensional electron system in a $\text{LiNbO}_3\text{-GaAs/AlGaAs}$ sandwich structure // *J. Appl. Phys.* 1988. V. 64. № 4. P. 2213–2215.
3. *Mozhaev V.G., Weihnacht M.* Incredible negative values of effective electromechanical coupling coefficient for surface acoustic waves in piezoelectrics // *Ultrasonics*. 2000. V. 37. P. 687–691.
4. *Mozhaev V.G., Weihnacht M.* Extraordinary case of acoustic wave acceleration due to electrical shorting of piezoelectrics // *IEEE Ultrasonics Symp.* 1999. P. 73–76.
5. *Zaitsev B.D., Kuznetsova I.E., Joshi S.G.* Anomalous resisto-acoustic effect // *J. Appl. Phys.* 1999. V. 86. P. 6868–6874.
6. *Kakio Sh., Nakamura H., Kanmori Y., Nakagawa Y.* Reversal phenomenon in phase velocity of surface acoustic waves on free and metallized surfaces by proton-exchange // *Jpn. J. Appl. Phys.* 1999. V. 38. Pt. 1. № 5B. P. 3261–3264.
7. *Zaitsev B., Kuznetsova I., Joshi S.* Influence of electrical boundary conditions on structure of surface acoustic waves in potassium niobate // *Electronic Letters*. 1999. V. 35. № 14. P. 1205–1206.
8. *Балакирев М.К., Гилинский И.А.* Волны в пьезокристаллах. Новосибирск: Наука, 1982. С. 96–100.
9. *Zgonik M., Schlessler R., Biaggio I., Voit E., Tscherry J., Gunter P.* Materials constants of KNbO_3 relevant for electro- and acousto-optics // *J. Appl. Phys.* 1993. V. 74. № 2. P. 1287–1297.
10. *Кузнецова И.Е., Джоши С.Г., Зайцев Б.Д.* SH акустические волны в пластинах ниобата лития и влияние электрических граничных условий на их свойства // *Акуст. журн.* 2001. Т. 47. № 3. С. 336–340.

The Effect of Electrical Boundary Conditions on the Characteristics of Surface Acoustic Waves Propagating in Potassium Niobate

B. D. Zaitsev, I. E. Kuznetsova, and I. A. Borodina

The study of the effect of a perfectly conducting plane placed at a certain distance from the surface of a potassium niobate crystal on the characteristics of the generalized Rayleigh and Gulyaev–Bleustein surface waves is continued. In addition, the effect of an infinitely thin conducting layer applied to the surface of the piezoelectric on the characteristics of these waves is analyzed. It is found that a variation in the conductivity of this layer can produce a result that completely differs from the result obtained when a perfectly conducting plane is moved toward the surface, although the extreme states of these actions (electrically open and short-circuited surfaces) are identical. A possible physical explanation of this difference is proposed.