

сутствии симметрии к обращению времени, сильного спин-орбитального взаимодействия и магнитного поля. Для многих из этих ситуаций в настоящий момент имеются экспериментальные измерения, проведенные в различных лабораториях. Результаты этих экспериментальных измерений можно сравнить с нашими теоретическими результатами в тех диапазонах параметров, которые учитываются решеточной моделью. Многие из этих результатов хорошо согласуются друг с другом, подтверждая тем самым, что теоретический подход адекватно объясняет рассматриваемое явление фазового перехода металл-изолятор. Наиболее яркой и убедительной проверкой предлагаемого в настоящей работе аналитического исследования является отличное согласие экспериментальных данных по статистике дискретных уровней в наноструктурных МОП-транзисторах с результатами вычислений, проведенных в условиях сильного спин-орбитального взаимодействия [7]. Представляется возможным привести прямое сравнение графиков для функций распределения уровней энергии из теоретической модели и из эксперимента, что и будет сделано в будущих работах.

### References

1. *Waffenschmidt S., Pfeleiderer C., Loehneysen H.V.* Critical behavior of the conductivity of Si:P at the metal-insulator transition under uniaxial stress // *Phys. Rev. Lett.* — 1999. — Vol. 83. — P. 3005–3008.
2. *Loehneysen H.V.* Metal-insulator transition in heavy doped semiconductors // *Current Opinion in Solid State and Materials Science.* — 1998. — Vol. 3. — № 1. — P. 5–15.
3. *Anissimova S., Kravchenko S.V. et al.* Flow diagram of the metal-insulator transition in two dimensions // *Nature Physics.* — 2007. — Vol. 3. — P. 707–710.
4. *Madelung O.* Physics of a solid state: the Localized conditions: the lane with English / Under the editorship of V.M.Agranovich. — M.: Science, 1985. — 184 p.
5. *Paierls R.* The quantum theory of solid states: The lane with English. IL — M., 1956. — 476 p.
6. *Anderson P.W.* Absence of Diffusion in Certain Random Lattices // *Phys. Rev.* — 1958. — Vol. 109. — P. 1492–1505.
7. *Schweitzer L., Zharekeshv I.Kh.* Critical level spacing distribution of two-dimensional disordered systems with spin-orbit coupling // *J.Phys.: Condens. Matter.* — 1995. — Vol. 7. — P. L377–L382.

УДК 535.37:535.34:539.19

## Природа пиков ТСЛ в кристаллах $K_2SO_4-Sm$

### The nature of TL peaks in $K_2SO_4-Sm$ crystals

Ким Л.М.<sup>1</sup>, Кокетайтеги Т.А.<sup>1</sup>, Салькеева А.К.<sup>2</sup>, Балтабеков А.С.<sup>1</sup>, Тагаева Б.С.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова

<sup>2</sup>Карагандинский государственный технический университет (E-mail: abskargu@mail.ru)

$K_2SO_4-Sm$  кристалдарындағы рекомбинациялық люминесценцияға зерттеу жүргізілді. ТСЛ қисығында максимумдары 100 К, 135 К және 220 К жаңа жарқырау шыңдары пайда болады. Үлгілерді термиялық өңдеуден кейін максимумдары 100 К және 220 К жарқырау шыңдары жоғалып кетеді. Ол кристалдарда су молекулаларының бар болуына байланысты. 135 К және 220 К ТСЛ шыңдары радиациядан пайда болған қоспалық орталықтардың ыдырауына негізделген. Қоспалық иондар 135 К аймақта рекомбинация орталықтары болып табылмайды. Су молекулалары радиациядан пайда болған қоспалық орталықтардың термиялық деңгейінің артуына әкеледі.

An investigation of the recombination luminescence of  $K_2SO_4-Sm$  is done. Three new peaks of the luminescence at 100K, 135K and 220K appear on the TL curve. As a result of thermal treatment of samples the luminescence peaks at 100K and 220K disappear. Hence, they are connected with presence of water molecules in crystals. The TL peaks at 135K and 220K are caused by the disintegration of the impurity radiation-induced centers. The impurity ions in the area 135K aren't the centers of recombination. The water molecules lead to increase of level thermal stability for impurity radiation-induced centers.

Ионы редкоземельных элементов (РЗЭ) являются стандартными люминесцентными зондами при изучении различных процессов при фото- и радиационном возбуждении кристаллов (см., например, [1]). Сульфаты щелочных металлов образуют обширный класс соединений. По своему строению и

типам химической связи они являются аналогами почти 2000 химических соединений [2]. С этой точки зрения сульфат калия, как типичный представитель, является удобной модельной системой для изучения процессов взаимодействия излучения с веществом. Анализ литературных данных показал, что радиационные процессы в этих кристаллах, активированных РЗЭ, изучены недостаточно. В работах [3–5] приводится ряд сведений об оптических и фотолюминесцентных свойствах сульфата калия, активированного ионами самария и гадолиния. В кристаллах  $K_2SO_4-Sm^{3+}$  при температуре жидкого азота наблюдается три полосы поглощения с максимумами при 4.35, 4.54 и 5.32 эВ [5], в которых возбуждается фотолюминесценция. В спектре излучения имеется две полосы излучения. В [5] показано, что эти полосы излучения связаны с примесными центрами, различающимися по своему строению. Одна из них связана с центром свечения, возмущенного молекулой воды, компенсирующей избыточный заряд примесных ионов. После термической обработки образца одна из полос свечения подавляется, а другая усиливается. По имеющимся литературным данным [6] кристаллы сульфата калия не гидратируются. Появление молекул воды связано с тем, что при их активации гетеровалентными ионами в исходной матрице возникают дополнительные вакансии, компенсирующие избыточный заряд. Поскольку образцы выращивались из водных растворов, то при росте в эти вакансии могут захватываться молекулы воды.

Наличие неконтролируемой примеси, в данном случае молекул воды, должно оказывать заметное влияние на протекание радиационно-стимулированных процессов.

На рисунке 1 приведена типичная кривая термостимулированной люминесценции  $K_2SO_4-Sm$ . Доза облучения рентгеновскими квантами при температуре жидкого азота составляла 50 кГр. Для монокристалла получена достаточно сложная картина рекомбинационных процессов. Кривая ТСЛ имеет выраженные максимумы свечения при температурах 145, 190, 220 и 280–300 К. Из рисунка видно, что первый пик рекомбинационной люминесценции с максимумом при 145 К является сложным. На его низкотемпературном крыле имеется перегиб, свидетельствующий о наличии еще одного пика свечения в области 100 К. Изотермический отжиг при температуре 100 К предварительно облученного рентгеновскими квантами образца позволяет показать, что максимум рекомбинационной люминесценции наблюдается в области 135 К. Пики ТСЛ с максимумами при 190 К и 280–300 К характерны для чистых кристаллов  $K_2SO_4$  [7]. Кроме того, в высокотемпературной группе пиков ТСЛ перераспределилась светосумма. В чистых кристаллах доминирующим пиком свечения является излучение с максимумом при 300 К. Таким образом, в активированном ионами самария монокристалле сульфата калия появились новые пики рекомбинационного свечения при 100 К, 135 К и 220 К.

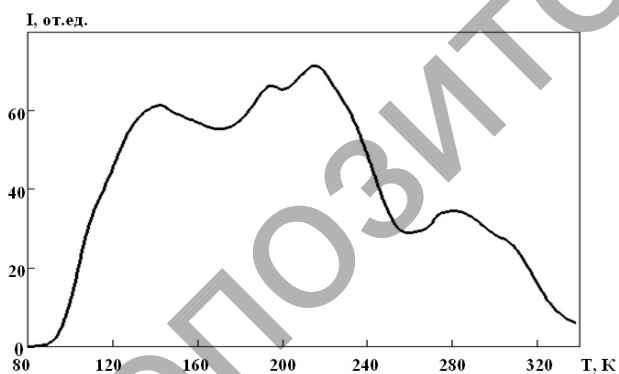


Рис. 1. Кривая ТСЛ кристалла  $K_2SO_4-Sm^{3+}$  после облучения рентгеновскими лучами с дозой 50 кГр

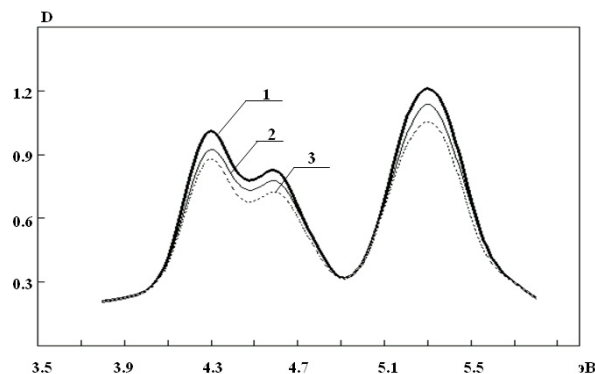


Рис. 2. Спектр поглощения кристалла  $K_2SO_4-Sm^{3+}$  при температуре 80 К до (1) и после облучения рентгеновскими квантами с дозой 100 кГр (2) и 150 кГр (3)

На рисунке 2 приведены спектры поглощения для монокристаллов  $K_2SO_4-Sm$  при температуре жидкого азота до и после облучения рентгеновскими квантами. При температуре 80 К примесное поглощение не претерпевает качественных изменений. В спектре наблюдаются те же три полосы поглощения, только при понижении температуры произошло смещение их максимумов в сторону более коротких длин волн. В результате облучения рентгеновскими квантами новых полос поглощения не обнаружено. При облучении ионизирующим излучением наблюдается уменьшение оптической плотности в полосах примесного поглощения. Как видно из рисунка 2, изменения в спектре поглощения увеличиваются с ростом дозы облучения. Подобное поведение оптического поглощения объясняется уменьшением концентрации трехвалентных примесных ионов, т.е. в результате облучения ионизи-

рующей радиацией происходит изменение их зарядового состояния. Оказалось, что рекомбинационные процессы в кристаллах  $K_2SO_4-Sm$  зависят от предыстории образцов.

На рисунке 3 приведена кривая ТСЛ для порошкообразного образца сульфата калия, активированного ионами самария. Перед измерением образец был подвергнут термической обработке. Исходные монокристаллы, перетертые в порошок, в течение 3 часов выдерживались при температуре  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . В результате такой термической обработки кривые ТСЛ с максимумом при  $100\text{ K}$  и  $220\text{ K}$  исчезли. Проявились пики рекомбинационной люминесценции при  $135\text{ K}$ . Известно, что после нагревания сульфата калия до температуры полиморфного фазового перехода из  $\alpha$ -структуры кристаллической решетки в  $\beta$  при фотовозбуждении появляется люминесценция в зеленой области спектра, которую авторы работы [8] связывают с возникновением молекулярных центров свечения  $S_2$ . Поскольку мы не нагревали образцы до температуры структурного фазового перехода, следовательно, изменения на кривой ТСЛ не могут быть связаны с центрами типа  $S_2$ . После нагревания образцы медленно охлаждались, т.е. не производилась их закалка. Поэтому нельзя связать изменения рекомбинационных процессов после термической обработки с появлением дополнительных вакансий в узлах кристаллической решетки.

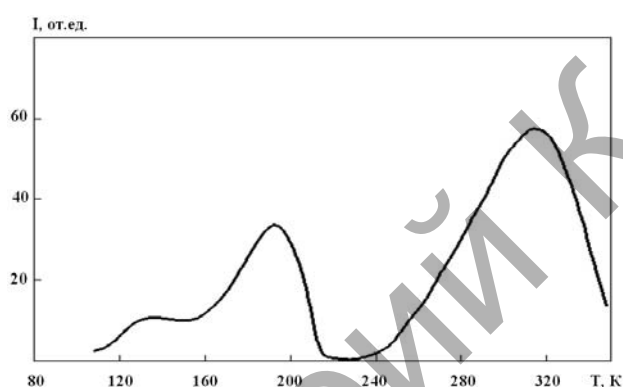


Рис. 3. Кривая ТСЛ кристалла  $K_2SO_4-Sm^{3+}$  после предварительной термической обработки при  $600\text{ }^\circ\text{C}$ . Доза облучения —  $50\text{ }\mu\text{Гр}$

Качественные изменения вида кривых ТСЛ, приведенных на рисунках 1 и 3, мы связываем с удалением из кристалла молекул структурной воды. Как показано в работе [3], при указанных выше условиях предварительной термической обработки образцов происходит исчезновение одного типа примесных центров люминесценции. Резкие изменения вида кривых температурной зависимости рекомбинационного свечения свидетельствуют об изменении состава изучаемых объектов.

Следовательно, можно утверждать, что рекомбинационная люминесценция в температурных областях  $100\text{ K}$  и  $220\text{ K}$  происходит с участием продуктов радиолиза молекул структурной воды. Кроме того, происходит перераспределение светосуммы в пиках ТСЛ  $280\text{--}300\text{ K}$ . До термической обработки в этом температурном диапазоне доминирующим был пик свечения с максимумом при  $280\text{ K}$ , после термической обработки образца —  $300\text{ K}$ . Подобное перераспределение светосумм наблюдалось ранее для кристаллов сульфата калия, активированных двухвалентными ионами металлов [9, 10]. Это явление объяснялось возникновением дополнительных катионных вакансий, возникающих при локальной компенсации избыточных зарядов. Единственным установленным электронно-избыточным центром в сульфатах щелочных металлов является ион  $O^-$  [11]. Данный дефект возникает в результате диссоциативного захвата сульфатными анионами свободных электронов [11,12]. Дефект  $O^-$  стабилизируется в решетке рядом с ионами  $SO_3^{2-}$ . Квантово-химическими расчетами показано, что уровень термической стабильности этого электронно-избыточного центра по отношению к миграции определяется его катионным окружением [7, 8]. Появление дополнительных вакансий приводит к перераспределению данных дефектов по уровням термической стабильности и, соответственно, к перераспределению светосумм по пикам рекомбинационной люминесценции. Исходя из этого наблюдаемое изменение распределения светосумм по пикам свечения в результате термической обработки связано с возникновением катионных вакансий. Поскольку после нагревания охлаждение происходило медленно, образец не закалялся, т.е. термообработка не приводит к появлению избыточных вакансий. Они возникают в результате удаления молекул структурной воды.

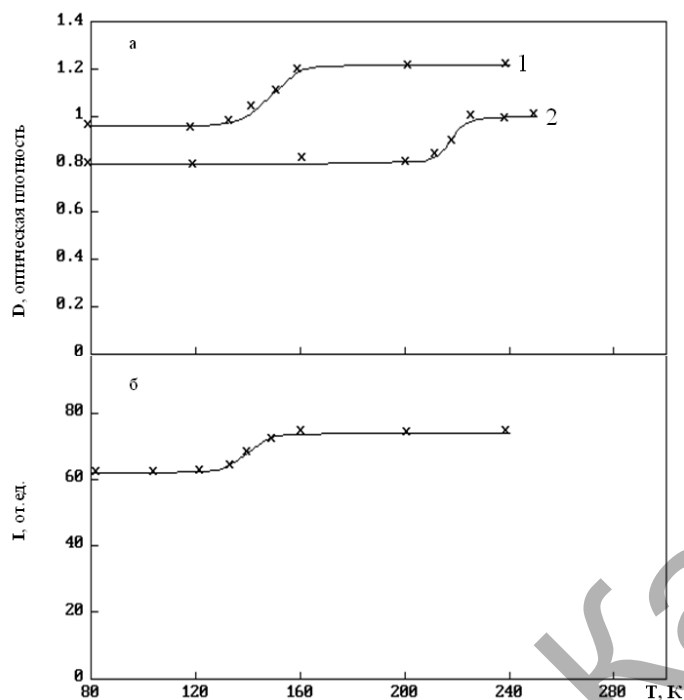


Рис. 4. (а) — температурная зависимость оптической плотности в примесных полосах поглощения 5.49 эВ (1) и 4.3 эВ (2) после облучения рентгеновскими квантами при 80 К дозой 150 кГр для монокристалла  $K_2SO_4$ -Sm; (б) — температурная зависимость выхода фотолюминесценции для порошкообразного  $K_2SO_4$ -Sm после термической обработки

На рисунке 4(а) представлена температурная зависимость оптической плотности монокристалла  $K_2SO_4$ -Sm, предварительно облученного рентгеновскими лучами при 80 К. Измерения оптической плотности проводились при 80 К, после нагревания образца до температур, указанных на рисунке, с последующим охлаждением до исходного состояния. При таком подходе исключены возможные температурные влияния на оптическое поглощение кристалла. Из рисунка видно, что оптическая плотность в полосах примесного поглощения восстанавливается в области 130–140 К и 210–215 К, т.е. при температурах наблюдения пиков ТСЛ. Следовательно, пики рекомбинационного свечения с максимумами при 135 К и 220 К связаны с распадом радиационно-наведенных примесных центров. Пик ТСЛ с максимумом при 220 К связан с распадом радиационно-наведенных примесных центров, где полная или частичная локальная компенсация избыточного заряда реализуется молекулами структурной воды, а рекомбинационная люминесценция с максимумом при 135 К — с распадом радиационно-наведенных примесных центров с локальной компенсацией заряда катионными вакансиями.

На рисунке 4(б) приведена температурная зависимость выхода фотолюминесценции для порошкообразного  $K_2SO_4$ -Sm, предварительно облученного рентгеновскими лучами при 80 К. Данный образец был подвергнут термической обработке, при которой один из типов примесных центров люминесценции исчезает. Поскольку для порошков измерение спектров поглощения невозможно, в эксперименте регистрировалась интенсивность люминесценции примесных центров при фотовозбуждении в полосе 5.4 эВ. Все измерения проводились при 80 К. Как и в предыдущем случае, перед каждым измерением образец нагревался до определенной температуры, а затем охлаждался до исходного состояния. Выход фотолюминесценции примесных центров испытывает температурное тушение. Измерение при постоянной температуре позволяет избежать данного эффекта. Из рисунка 4(б) видно, что выход фотолюминесценции ионов трехвалентного самария в области 130–140 К увеличивается. Поскольку все измерения проводились при 80 К, этот факт имеет единственное объяснение. В этой температурной области в предварительно облученном рентгеновскими квантами образце происходит увеличение количества центров, дающих наблюдаемую фотолюминесценцию.

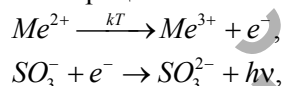
Измерение кривых накопления светосумм в пиках ТСЛ показало, что примесные ионы трехвалентных редкоземельных элементов являются ловушками для электронов.

Нами были измерены спектральные составы пиков ТСЛ для монокристалла  $K_2SO_4$ -Sm. Спектральный состав рекомбинационного излучения при 135 К имеет вид одиночной полосы излучения с

максимумом при 3.1 эВ. Для того чтобы на результат не оказывали влияния рекомбинационные процессы в области 100 К, монокристалл  $K_2SO_4-Sm$ , предварительно облученный рентгеновскими лучами при 80 К, был подвергнут изотермическому отжигу при 100 К, с последующим охлаждением до исходной температуры. Излучения примесных центров здесь нет. Для ионов трехвалентного самария в монокристаллах характерная люминесценция имеет максимумы при 3.12 и 3.54 эВ [5]. Длинноволновое излучение связано с центрами, возмущенными молекулами структурной воды. Следовательно, спектральный состав рекомбинационного излучения в области 135 К однозначно показывает, что радиационно-наведенные примесные центры типа  $Sm^{2+}$  не являются центрами рекомбинации. Наблюдаемое излучение 3.1 эВ характерно для рекомбинационных процессов в матрице и связано с распадом дефектов  $SO_3^-$  [7].

Для измерения спектрального состава излучения пика ТСЛ при 220 К предварительно облученный монокристалл сульфата калия, активированный ионами самария, подвергнулся изотермическому отжигу при 190 К. Наблюдаются полоса излучения с максимумом при 3.1 эВ и слабое излучение в области 2.5 эВ. Поскольку примесный центр, возмущенный молекулами структурной воды, имеет характерное излучение при 3.12 эВ, приведенный результат не позволяет однозначно сказать об отсутствии или наличии люминесценции примесных центров.

Радиационно-наведенные примесные дефекты не являются центрами рекомбинации. Молекулы структурной воды приводят к повышению уровня термической стабильности радиационно-наведенных примесных дефектов. Совокупность экспериментальных результатов дает возможность предложить следующий рекомбинационный процесс:



где  $Me$  — примесный ион. При нагревании происходит термическая ионизация ионов  $Me^{2+}$ . Рекомбинация свободного электрона с дырочным дефектом  $SO_3^-$  дает наблюдаемое излучение 3.1 эВ.

Предложенный рекомбинационный процесс не противоречив и согласуется с имеющимися литературными данными и экспериментальными результатами данной работы.

Таким образом, при росте образцов из водных растворов на кривой ТСЛ кристалла  $K_2SO_4-Sm$  появляется два новых пика рекомбинационной люминесценции — при 135 К и 220 К. Первый связан с примесным радиационно-наведенным центром  $Sm^{2+}$ , второй — с этим же центром, возмущенным молекулами воды. В области 135 К примесные ионы не являются центрами рекомбинации. В области 220 К этого заявить пока нельзя. Возникновение двух типов примесных радиационно-наведенных центров связано с существованием в сульфате калия двух типов примесных ионов, различающихся ближайшим окружением.

*Работа выполнена по гранту Фонда фундаментальных исследований МОН РК.*

## References

1. *Marphunin A.S.* Introduction in physics of minerals. — М., 1974. — 324 p.
2. *Aleksandrov K.S., Beznosikov B.V.* Structural phase transitions in crystals (family of potassium sulphate). — Novosibirsk, 1993. — 287 p.
3. *Salkeeva A.K., Kim L.M., Kuketaev T.A.* Influence of thermal processing on recombination luminescence of potassium sulphate doped by threevalence gadolinium ions // News of HIGH SCHOOLS. — Series of the Physicist. — 2006. — Vol. 49. — № 6. — P. 89–90.
4. *Salkeeva A.K., Kim L.M.* Luminescent properties of potassium sulphate doped by ions of a gadolinium // Works of the international scientific conference «Science and education — the leading factor of strategy «Kazakhstan-2030». — Karaganda, 2006. — P. 389–391.
5. *Salkeeva A.K.* Influence of samarium and gadolinium ions on optical and radiation properties of crystals  $K_2SO_4$  and  $LiKSO_4$ : The dissertation abstracts of the candidate science. — Almaty, 2008. — 16 p.
6. *Rabinovich V.A., Havin Z.J.* Short a chemical directory. — L., 1991. — 432 p.
7. *Makhmetov T.S.* Mechanisms of recombination luminescence in  $K_2SO_4$  and  $K_2SO_4-Cu^{2+}$ : The dissertation abstracts of the candidate science. — Karaganda, 1998. — 17 p.
8. *Sheludko V.I., Nedilko S.G., Bojko V.V.* Post-annealing green luminescence of sulphate crystals // Funct. Matter. — 2003. — 10,1. — P. 93–97.

9. Kuketaev T.A., Kim L.M., Mahmetov T.S. Recombination luminescence in  $K_2SO_4-Cu^{2+}$  // Solid-state detectors of ionizing radiation: Theses of reports of the international conference. — Ekaterinburg, 1997. — P. 113.
10. Kuketaev T.A., Murashova Z.F., Sagyndykova G.E. The thermal stimulation luminescence of potassium sulphate doped by mercury similar ions // Chaos and structures in nonlinear systems // The theory and experiment: Materials of 3rd international scientific conference. — Karaganda: Publ. KarSU, 2002. — P. 136–139.
11. Byberg J.L.  $O^-$  detected by EPR as a primary electron-excess defect in x-irradiated  $K_2SO_4$  // Chem. Phys. — Vol. 84. — № 11. — P. 6083–6085.
12. Kim L.M. Defect formation by radiation in sulphates on the mechanism of dissociation capture electrons // Problems of a modern science: an urgency, directions, prospects: Materials of the 3-d Republican scientific-technical. conferences. — Ust-Kamenogorsk, 2002. — P. 250–252.

УДК 539.3

### Движение периодической нагрузки по внутренней поверхности двухслойной оболочки в упругом полупространстве

### Movement of the periodic load on an internal surface of the two-layer shell in elastic half-space

Украинец В.Н., Тлеулесов А.К.

*Павлодарский государственный университет им. С.Торайгырова (E-mail: vitnikukr@mail.ru)*

Серпінді жартылай кеңістікте екі қабатты қабықшаға қозғалмалы мерзімдік жүктеменің әрекеті туралы есептің толық аналитикалық шешімі шығарылды. Қабықшаның жуан ішкі қабатын сипаттау үшін серпінділік теорияның динамикалық тендеулері қолданылады, жіңішке сыртқы қабатын тербелісі координаттардың қозғалмалы жүйесінде жіңішке қабықша теорияның классикалық тендеулерімен сипатталады. Шешім айнаымалылардың толық емес бөлінуінің әдісіне негізделген. Есепті санмен есептеу кезінде жүйелі шағылудың (жыуықтаудың) әдісін пайдалану ұсынылған.

The exact analytical solution of the problem about an action of the mobile periodic loading on a two-layer shell in elastic half-space is received. For the description of a thick inside layer of the shell the dynamic equations of the theory of elasticity are used, fluctuations of a thin external layer are described by the classical equations of the theory of thin shells in a mobile system of coordinates. The solution is based on a method of the incomplete division of variables. At numerical realization of the problem it is recommended to apply a method of successive approximations.

Рассмотрим в линейно-упругом, однородном и изотропном полупространстве, отнесенном к декартовой  $(x, y, z)$  или цилиндрической  $(r, \theta, z)$  неподвижной системе координат, бесконечно длинную круговую цилиндрическую двухслойную оболочку, наружным слоем которой является тонкостенная упругая оболочка толщиной  $h_0$  и радиусом срединной поверхности  $R_1$ , а внутренним — толстая упругая оболочка радиусом внутренней поверхности  $R_2$  (рис.). В силу малости  $h_0$  принимаем, что тонкостенная оболочка контактирует с толстой оболочкой и окружающей упругой средой (массивом) вдоль своей срединной поверхности. Условимся внутренний слой двухслойной оболочки называть несущим, а наружный — ограждающим. Контакт между слоями оболочки, а также между ограждающим слоем и массивом будем полагать либо жёстким, либо скользящим при двусторонней связи в радиальном направлении.