

# ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ ЭМА-ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ПО ИЗЛУЧЕНИЮ СФОКУСИРОВАННЫХ РЭЛЕЕВСКИХ ВОЛН

В. И. ГОРДЕЛИЙ, В. Е. ЧАБАНОВ

*Разработан математический аппарат и получены решения для обоих типов поляризации волн Рэля, излучаемых ЭМА-преобразователями, рабочие катушки которых составлены из прямых и скругленных токопроводов. С их помощью проведен численный анализ и установлены основные закономерности, которым указанные волны подчиняются. Это позволяет конструировать соответствующие преобразователи, способные решать нужные практические задачи.*

*A body of mathematics has been developed and solutions have been derived for both types of polarization of Raleigh waves, emitted by EMA-transducers with working coils composed of straight and rounded current conduits. They are used to perform numerical analysis and establish the main regularities governing the above waves. The allows designing the respective transducers, capable of solving the required practical problems.*

О возможности возникновения поверхностных волн на границах твердых тел впервые было заявлено Рэлеем в 1888 г. [1]. В последующем интерес к ним постоянно увеличивался [2–5]. Теоретические и экспериментальные исследования работы ЭМА-преобразователей, предназначенных для приема и генерации волн Рэля осуществлялись многими авторами [6–8, 15–15].

Вместе с тем некоторые важные особенности работы их до настоящего времени остаются не выявленными. Так, не установлено воздействие на характеристики возбуждаемого звука экранов, их параметров, различных конструктивных зазоров, неизбежных при изготовлении преобразователей. Открытыми являются вопросы влияния формы импульсных сигналов на характеристики генерируемых акустических волн, особенности работы сфокусированных ЭМА-преобразователей и т. д. Большую часть указанных проблем удалось решить в работе [19]. Однако достаточно полного исследования работы сфокусированных ЭМА-излучателей (и приемников) рэлеевских волн до настоящего времени нет. В определенной мере разрешить данную проблему призвана настоящая работа.

Для изучения волн Рэля, излучаемых сфокусированными ЭМА-преобразователями, воспользуемся следующей схемой (рис. 1). В данной схеме точка  $O_0$  является центром используемой системы координат;  $O_x$  представляет точку наблюдения на плоскости, на которой располагается излучающий токопровод;  $r_1$  — проекция ее расстояния до центральной части токопровода;  $r$  — то же для произвольного элемента токопровода  $dl$ , от которого исходит излучение;  $\varphi_0$  — направление на точку наблюдения  $O_x$ ;  $\varphi$  — угол между нормалью к элементу  $dl$  и направлением на точку наблюдения;  $x$  — расстояние от  $O_0$  до элемента  $dl$ ;  $b$  — дистанция от центра координат до середины витка;  $O$  — центр координат кругового токопровода радиусом  $r_0$ ; угол  $\alpha$  указывает координату элемента  $dl$ . Остальные обозначения легко прослеживаются из рисунка.

Рассмотрим основные соотношения, наблюдаемые в данной задаче. Искомыми параметрами здесь выступают оперативные значения  $r(\alpha)$  и  $\varphi(\alpha)$ , зависящие от расположения элементарной части токопровода, равной  $dl = r_0 d\alpha$ . Откуда получаем:

$$r(\alpha) = \sqrt{r_1^2 + x(\alpha)^2 - 2r_1 x(\alpha)} \times \dots \times \sqrt{(\cos \varphi_0 \sqrt{x(\alpha)^2 - r_0^2 \sin^2 \alpha} - r_0 \sin \varphi_0 \sin \alpha)} \dots$$

$$x(\alpha) = \sqrt{(b + r_0)^2 + r_0^2 - 2r_0(b + r_0)\cos \alpha}, \quad (1)$$

$$\varphi(\alpha) = \arcsin [(r_0 + b)\sin \alpha / x(\alpha)] - \arccos \left[ \frac{r(\alpha)^2 + x(\alpha)^2 - r_1^2}{2x(\alpha)r(\alpha)} \right].$$

Изучение работы системы токопроводов необходимо начать с проблемы их приведения к одной системе координат. Для этого введем параметр  $b_n = g[n - (N - 1)/2]$ , где  $n$  — порядковый номер токопровода;  $N$  — общее их число. Тогда центр выбранной системы координат совпадает с центром всей катушки из токопроводов. В результате, применяя соотношения (1), получаем

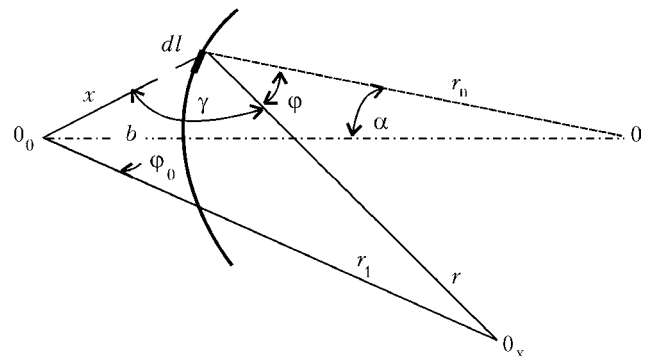


Рис. 1. Схема расположения одного токопровода катушки и точки наблюдения в горизонтальной плоскости

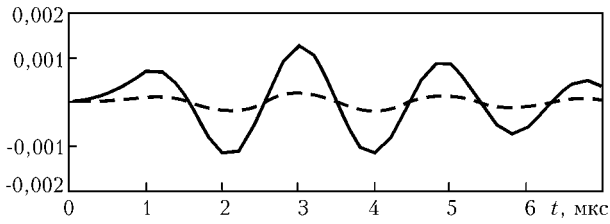


Рис. 2. Временная характеристика вертикальной (большая амплитуда) и горизонтальной составляющих акустического импульсного сигнала, излучаемого одним токопроводом, на расстоянии 8 см от его центра в направлении вогнутости (угол наблюдения – 0)

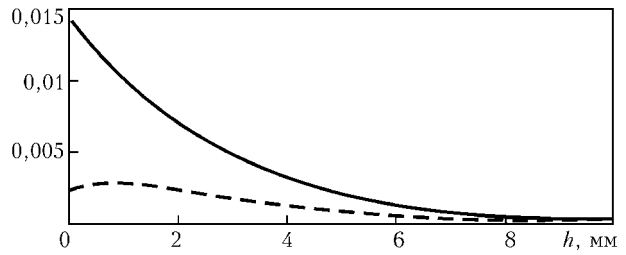


Рис. 3. Зависимость соответствующих амплитуд волн Рэлея от глубины их наблюдения

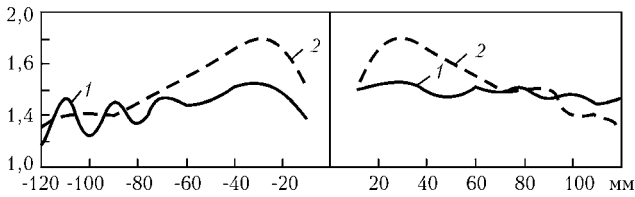


Рис. 4. Зависимость амплитуды вертикальной составляющей рэлеевской волны, излучаемой одним токопроводом, по нормали к нему, от расстояния до точки наблюдения: 1 – фокус 8 см; 2 – фокус 8 м

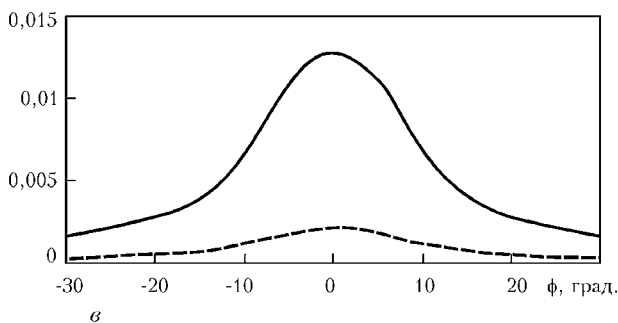
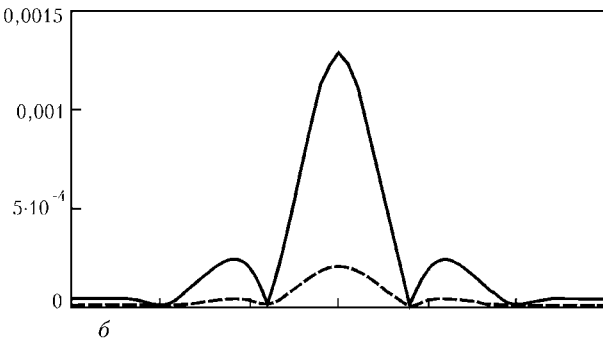
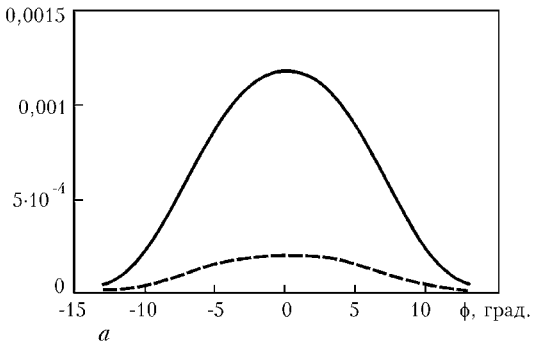


Рис. 5. Направленность излучения волн Рэлея у прямого токопровода (а), у скругленного токопровода в фокусе (б) и на том же расстоянии с другой стороны скругленного токопровода (в)

$$r(\alpha)_n = \sqrt{r_1^2 + x(\alpha)_n^2 - 2r_1 \times \dots} \times \sqrt{(\cos \varphi_0 \sqrt{x(\alpha)_n^2 - r_0^2 \sin^2 \alpha} - r_0 \sin \varphi_0 \sin \alpha)},$$

$$x(\alpha)_n = \sqrt{(b_n + r_0)^2 + r_0^2 - 2r_0(b_n + r_0)\cos \alpha},$$

$$\varphi(\alpha)_n = \arcsin [(r_0 + b_n)\sin \alpha / x(\alpha)_n] - \arccos \left[ \frac{r(\alpha)_n^2 + x(\alpha)_n^2 - r_1^2}{2x(\alpha)_n r(\alpha)} \right].$$

Подставляя указанные результаты в полученные ранее решения для излучения волн Рэлея катушкой, составленной из прямых токопроводов [19], и осуществляя интегрирование по параметру  $\alpha$ , проведем искомые вычисления для поля преобразователей с круговыми витками:

$$u_z(t) = -\frac{D_{00}}{4\alpha_0} \left( \frac{e\eta}{\gamma} \right)^\gamma \sqrt{\frac{(2\pi m)^3}{c}} \times \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \frac{[E_1(\omega_0 - i\eta) + E_1(-\omega_0 - i\eta)]}{Z(\alpha)r(\alpha)^{0,5}} d\alpha,$$

$$u_r(t) = -\frac{iD_{00}}{4\alpha_0} \left( \frac{e\eta}{\gamma} \right)^\gamma \sqrt{\frac{(2\pi)^3 m}{c}} \times \int_{-\alpha_0}^{\alpha_0} \frac{[E_2(\omega_0 - i\eta) + E_2(-\omega_0 - i\eta)]}{Z(\alpha)r(\alpha)^{0,5}} d\alpha,$$

где  $D_{00} = \frac{\mu_0 I_0 B_0 \sigma_2}{4\pi}$ ;

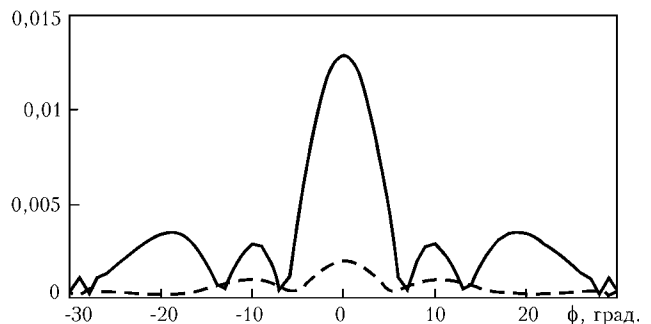


Рис. 6. Направленность излучения сигналов от преобразователя рэлеевских волн на расстоянии, равном фокусу



$$Z(\alpha) = m [ 2m^2(1 + \cos^2 \varphi(\alpha)) - p^2/2(3 + \cos^2 \varphi(\alpha)) - m^2 \left( \frac{\sqrt{m^2 - p^2}}{\sqrt{m^2 - 1}} + \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{\sqrt{m^2 - p^2}} \right) - 2\cos^2 \varphi(\alpha) \sqrt{m^2 - p^2} \sqrt{m^2 - 1} ];$$

$$E_1(\omega) = \frac{d^2}{d\omega^2} [\Psi^0 \omega^{-1,5} (\sqrt{m^2 - 1} M(\alpha)_1 e^{-k\sqrt{m^2 - 1}z} + M(\alpha)_2 e^{-k\sqrt{m^2 - p^2}z}) e^{-i\omega t_R}];$$

$$E_2(\omega) = \frac{d^2}{d\omega^2} [\Psi^0 \omega^{-1,5} (m^2 M(\alpha)_1 e^{-k\sqrt{m^2 - 1}z} + \sqrt{m^2 - p^2} M(\alpha)_2 e^{-k\sqrt{m^2 - p^2}z}) e^{-i\omega t_R}].$$

Здесь

$$t_R = t - r(\alpha)_n + r_0 \sin \varphi(\alpha)_n \frac{a}{C_R};$$

$$M(\alpha)_1 = \cos(\alpha) [ \sqrt{m^2 - p^2} (F_1^0 \sqrt{m^2 - p^2} - F_3) + m^2 \cos^2 \varphi(\alpha) (F_2 \sqrt{m^2 - p^2} + F_1^0) ];$$

$$M(\alpha)_2 = m^2 \cos^2 \varphi(\alpha) \times [ F_2^0 (m^2 - \frac{p^2}{2}) + 2F_1^0 \sqrt{m^2 - 1} ] - F_3 (m^2 - \frac{p^2}{2});$$

$$F_1^0 = \frac{1}{\sqrt{m^2 - n^2}} [ \frac{p^2/2 - 1}{\sqrt{m^2 - 1} (\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - 1})} + \frac{2n^2(p^2/2 - 1)}{n^2 - 1} - \frac{\sqrt{m^2 - 1}}{\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - 1}} - \frac{2(m^2 - n^2)}{n^2 - 1} ] + \frac{1}{\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - p^2}} + \frac{2\sqrt{m^2 - n^2}}{n^2 - p^2};$$

$$F_2^0 = \frac{2}{\sqrt{m^2 - n^2}} \left( \frac{1}{\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - 1}} + \frac{2\sqrt{m^2 - n^2}}{n^2 - 1} \right) - \frac{1}{\sqrt{m^2 - p^2} (\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - p^2})} - \frac{2}{n^2 - p^2};$$

$$F_3^0 = \frac{\sqrt{m^2 - p^2}}{\sqrt{m^2 - n^2} - \sqrt{m^2 - p^2}} + \frac{2(m^2 - n^2)}{n^2 - p^2};$$

$$\Psi_0 = \frac{e^{k_i q_1^0 (H-h)} (Q_1^0 + Q_4^0) + Q_1^0 (e^{k_i q_1^0 h} + W^0 e^{-k_i q_1^0 h}) (Q_1^0 + Q_4^0) + W^0 e^{-k_i q_1^0 (H-h)} (Q_1^0 - Q_4^0)}{(e^{k_i q_1^0 h} - W^0 e^{-k_i q_1^0 h}) (Q_1^0 + Q_2^0 Q_4^0)} - \dots$$

электромагнитное поле в поверхностном объеме контролируемого тела.

Для теоретического исследования сигналов, излучаемых сфокусированными токопроводами, с помощью полученных выше выражений сделаем требуемые расчеты (рис. 2, 3). Они проводились для токопровода радиусом 8 см, расположенного на расстоянии 1 мм от поверхности контроля. Рабочая частота применяемого импульсного сигнала равнялась 0,538 МГц, форма сигнала типовая, расстояние между токопроводами — 3 мм. Рассматривается вертикальная  $U_{lz}$  и горизонтальная  $U_{lr}$  составляющие смещений, образованных волной Рэлея в основном на глубине 0 мм. Сила тока, возбуждающего токопроводы, как и ранее, считалась равной 1 А. В реальности она достигает в пике 100 А, а поэтому соответствующим образом увеличивается и амплитуда изучаемых волн Рэлея. Напряженность магнитного поля — 0,934 Тл, амплитуда смещений отсчитывается в ангстремах.

Ослабление акустических сигналов с глубиной осуществляется экспоненциально. Исключение составляет только горизонтальная составляющая волны, которая до глубины 2 мм практически не убывает (рис. 4).

Нетрудно видеть, что амплитуда сигналов волн Рэлея при наличии радиуса искривления токопроводов по сравнению с отсутствием такового (радиус 8 м) по нормали к центральной их части в целом оказывается более низкой. Причем, в направлении искривления (положительные значения координат точки наблюдения) сигнал убывает более монотонно, чем в противоположном направлении.

В этой связи требуется более внимательно рассмотреть изменение направленности излучения (рис. 5).

Из сравнения полученных кривых следует, что направленность излучения в фокусе, как и следовало ожидать, существенно выше, чем у прямого токопровода, а тем более с противоположной стороны скругления.

Далее рассматривается излучение всего преобразователя рэлеевских волн, состоящего из восьми неравномерных токопроводов, возбуждаемых асинфазно. При этом очевидно, что многие зависимости сигналов рэлеевской волны от параметров оказываются точно такими же, как и для одного токопровода (рис. 6).

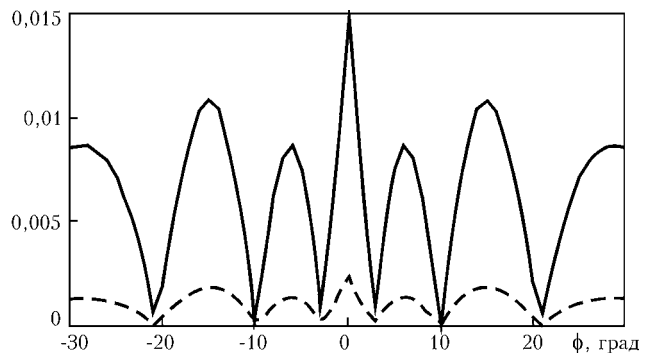


Рис. 7. Направленность излучения преобразователя рэлеевских волн в направлении, обратном фокусу, и расстоянии, равном его величине

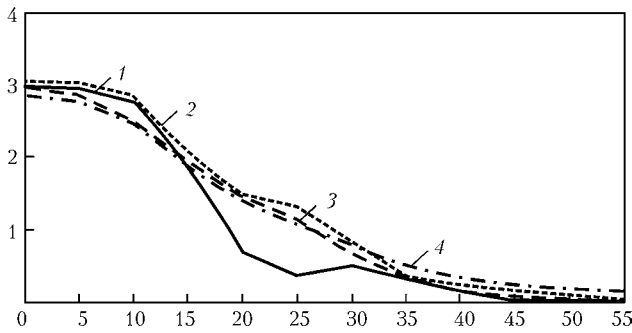


Рис. 8. Направленность излучения сфокусированного ЭМА-преобразователя при измерении на различных расстояниях от него: 1 —  $\Phi_0$  — прямые токопроводы; 2 —  $\Phi_1$  — расстояние 11 см; 3 —  $\Phi_2$  — расстояние 20 см; 4 —  $\Phi_3$  — расстояние 28 см

По сравнению с сигналами от одного токопровода (см. рис. 5, б), направленность излучения оказалась более узкой, амплитуда максимума увеличилась более чем в 10 раз. Кроме того, появились более значительные лепестки направленности на углах  $\pm 20^\circ$  (рис. 7).

Здесь появились достаточно ярко выраженные дифракционные пики. Удивляться их возникновению не приходится, поскольку по длине токопроводов укладывается чуть больше трех длин рэлеевских волн, а значит их концы не могут оказывать заметного воздействия на направленность излучения. Кроме того, сигналы от выпуклой части различных токопроводов, интерферируя на углах, отличных от нормального, не могут формировать монотонную картину.

Далее приводятся результаты экспериментально измеренной направленности сфокусированного преобразователя, сформированного типовой катушкой, каждый из витков которой имеет закругление, равное 8 см, т. е. здесь имеются сфокусированные витки, но не сам преобразователь (рис. 8).

В целом направленности при различных расстояниях идентичны и шире, чем у ненаправленного преобразователя. И это неудивительно, поскольку все они измерялись на дистанциях, больших фокуса (8 см). Эксперимент достаточно хорошо согласуется с расчетом.

## Выводы

Разработан математический аппарат и получены решения для обоих типов поляризации волн Рэлея, излучаемых ЭМА-преобразователями, рабочие катушки которых составлены из прямых и скругленных токопроводов. С их помощью удалось провести

численный анализ и установить основные закономерности, которым указанные волны подчиняются. Это позволяет конструировать соответствующие преобразователи, с помощью которых можно решать нужные практические задачи.

1. Rayleigh J. W. On Waves Propagated Along the Plane Surface of an Elastic Solid // Proc. Math. Soc. London, 17 (1885). — P. 4–11.
2. Чабанов В. Е. Лазерный ультразвуковой контроль материалов. — Л.: МГУ, 1986. — 231 с.
3. Новацкий В. Теория упругости. — М.: Мир, 1975. — 872 с.
4. Скучик Е. Простые и сложные колебательные системы. — М.: Мир, 1971. — 557 с.
5. Викторов И. А. Звуковые поверхностные волны в твердых телах. — М.: Мир, 1981. — 287 с.
6. Ильин И. В. Исследование электромагнитно-акустического метода возбуждения и приема волн Рэлея в ферромагнетиках: Дис. ... канд. техн. наук. — Л.: Ленингр. электротехнич. ин-т им. В. И. Ульянова (Ленина), 1979.
7. Ильин И. В., Харитонов А. В. К теории ЭМА-метода приема волн Рэлея для ферромагнитных материалов // Дефектоскопия. — 1980. — № 7. — С. 86–93.
8. Шубаев С. Н. Возбуждение волн Рэлея и Лэмба в ферромагнитных металлах электромагнитным методом // Неразрушающие методы и средства контроля и их применение в промышленности. — Минск: Наука и техника, 1973. — С. 319–323.
9. Шубаев С. Н., Шкарлет Ю. М. Расчет датчиков, применяемых при электромагнитном приеме волн Рэлея и Лэмба // Дефектоскопия. — 1969. — № 1. — С. 121–123.
10. Шубаев С. Н., Шкарлет Ю. М. Переменные поля, возникающие при электромагнитном приеме волн Рэлея и Лэмба // Там же. — 1972. — № 6. — С. 62–68.
11. Шубаев С. Н., Шкарлет Ю. М. Общие закономерности электромагнитного метода приема волн Рэлея и Лэмба // Там же. — 1972. — № 5. — С. 63–72.
12. Шубаев С. Н., Шкарлет Ю. М. Переменные поля, возникающие при электромагнитном приеме волн Рэлея и Лэмба // Там же. — 1972. — № 6. — С. 62–68.
13. Шкарлет Ю. М. Бесконтактные методы ультразвукового контроля. — М.: Информприбор, 1974. — 57 с.
14. Комаров В. А. Квазистационарное ЭМА преобразование в металлах. — Свердловск, УНЦ АН СССР, 1986.
15. Комаров В. А., Мужижкий В. Ф., Гуревич С. Ю. Теория физических полей. Т. 2. — Челябинск-Ижевск, 1998. — 300 с.
16. Пауштин А. В. Расчет для периодических магнитных систем электромагнитно-акустических преобразователей нормальных волн // Изв. ЛЭТИ. — 1974. — Вып. 145. — С. 16–22.
17. Пауштин А. В., Харитонов А. В. Некоторые вопросы теории электромагнитно-акустических преобразователей нормальных волн, имеющих периодическую структуру // Там же. — 1975. — Вып. 165. — С. 12–19.
18. Dobbs R. Phys. Acoustics. V.10. Ch.3. Academic Press. New York and London, 1973.
19. Чабанов В. Е., Горделий В. И. Исследование волн Рэлея, излучаемых электромагнитно-акустическими преобразователями // Неразрушающий контроль и диагностика материалов, конструкций и окружающей среды // Сб. докл. V Всероссийск. науч.-практ. семинара. — СПб. — 2004. — С. 111–123.

НПП «ВИГОР»,  
Москва, РФ

Поступила в редакцию  
27.04.2004