

УДК 621.396.029.6

## ПРИМЕНЕНИЕ ЩЕЛЕВЫХ АНТЕНН ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАВНОМЕРНОСТИ НАГРЕВА МАТЕРИАЛОВ ПРИ СВЧ-ТЕРМООБРАБОТКЕ

*канд. техн. наук, доц. А.Л. АДАМОВИЧ, канд. техн. наук, доц. Ю.Г. ГРОЗБЕРГ,  
О.А. РЫМАРЕВА, А.В. ЛАПТИНСКИЙ  
(Полоцкий государственный университет);  
д-р техн. наук, проф. С.П. КУНДАС*

*(Международный государственный экологический университет им. А.Д. Сахарова, Минск)*

*Представлен анализ поля излучения резонансной и нерезонансной щелевых антенн на реальную несогласованную нагрузку, расположенную в ближней зоне антенн. Выявлены и проанализированы достоинства и недостатки рассматриваемых типов антенн для применения их в качестве излучателей при СВЧ-нагреве материалов. Большинство недостатков, характерных для резонансных щелевых антенн, лишены нерезонансные щелевые антенны. Достоинства нерезонансных щелевых антенн – возможность создавать излучатели большой протяженности, в том числе двухмерные антенные решетки; достаточная полоса пропускания для обеспечения необходимого согласования с генератором без необходимости применения развязывающих СВЧ-устройств; отсутствие значительного влияния колебания частоты генератора на распределение поля в ближней зоне излучателя.*

**Введение.** Волноводно-щелевые антенны могут быть использованы в качестве излучателей в технологических СВЧ-установках, так как позволяют сформировать плоский фронт волны падающего поля и произвести облучение объектов большой протяженности. Резонансные и нерезонансные щелевые антенны имеют свои достоинства и недостатки.

Цель данной работы – оценить эффективность применения резонансной и нерезонансной щелевых антенн для создания на образце однородного распределения поля при высоких передаточных характеристиках с наличием отраженных в направлении антенны волн и незначительном колебании рабочей частоты СВЧ-генератора. Достичь поставленной цели можно лишь с помощью численных методов решения электродинамической задачи, так как аналитические методы расчета поля в ближней зоне такой антенны отсутствуют, тем более с учетом отраженных волн.

**Моделирование резонансной щелевой антенны.** В качестве резонансной антенны был выбран излучатель с продольными (шунтовыми) щелями в широкой стенке прямоугольного волновода (рис. 1).

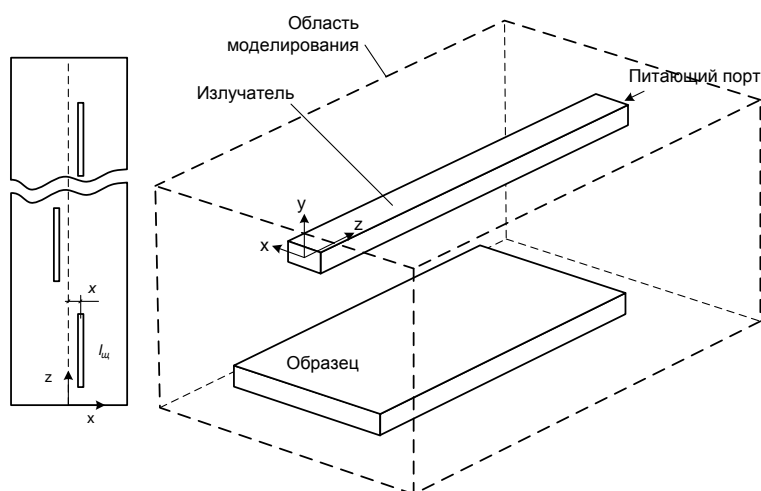


Рис. 1. Волноводно-щелевой излучатель и геометрия области моделирования

Возбуждение антенны осуществляется через питающий порт волной основного типа. В ближней зоне антенны расположен образец модельного материала. Внешняя область моделирования – открытое пространство.

Численное моделирование осуществлялось с применением метода МКР (FDTD) решения основного уравнения электродинамики.

Аналитический расчет щелевых антенн с различными видами и конфигурацией излучающих щелей хорошо разработан и подтвержден на практике [1].

Условие согласования волноводно-щелевого излучателя:

$$nG_{щ} = 1, \quad (1)$$

где  $G_{щ}$  – нормированная проводимость щели:

$$G_{щ} = 2,09 \frac{a \lambda_0}{b \lambda} \cdot \cos^2 \left( \frac{\pi \lambda}{2 \lambda_0} \right) \cdot \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right). \quad (2)$$

Здесь  $a, b$  – поперечные размеры волновода, м;  $\lambda, \lambda_0$  – длины волн в свободном пространстве и в волноводе, м;  $x$  – расстояние от середины волновода до середины щели, м.

Окончательно геометрические параметры излучателя на основе волновода стандартного сечения  $90 \times 45$  мм и рабочей частоте  $f = 2,45$  ГГц ( $\lambda = 12,24$  см,  $\lambda_0 = 16,685$  см):

- количество щелей 10,  $x = 9,5$  мм;
- ширина и длина щели соответственно  $t_{щ} \square l_{щ} = 4$  мм и  $l_{щ} = \lambda/2 = 6,12$  см;
- расстояние между щелями  $d = \lambda_0/2 = 83,425$  см.

Моделирование излучения антенны на частоте 2,45 ГГц в открытое пространство (без образца) показало слишком высокий расчетный коэффициент отражения  $|S_{11}|$ , который составил 0,45 (20 % по мощности).

Путем проведения серии численных расчетов с различными длинами излучающих щелей была определена их оптимальная длина (5,75 см), при которой  $|S_{11}|$  оказался минимальным ( $|S_{11}| = 0,054$ ).

На рисунке 2 представлены результаты моделирования излучения СВЧ-поля резонансной щелевой антенны в свободном пространстве.

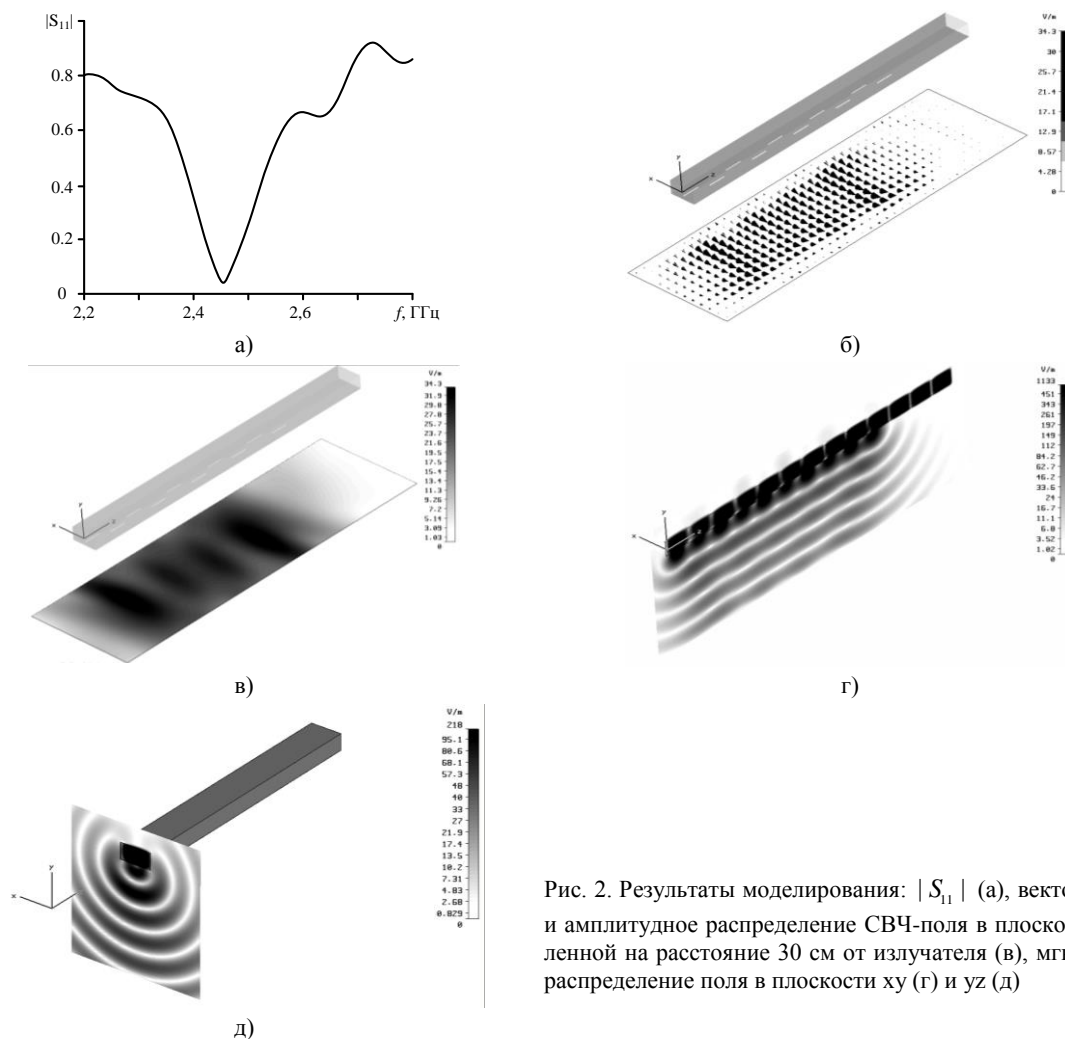


Рис. 2. Результаты моделирования:  $|S_{11}|$  (а), векторное (б) и амплитудное распределение СВЧ-поля в плоскости, удаленной на расстояние 30 см от излучателя (в), мгновенное распределение поля в плоскости  $xy$  (г) и  $yz$  (д)

Далее осуществлялись расчеты излучения антенны на реальную нагрузку, которой являлся диэлектрический образец ( $\epsilon' = 20$ ,  $\epsilon'' = 5$ ,  $tg\sigma = 0,25$ ) с размерами  $800 \times 400 \times 50$  мм и находящийся на расстоянии 300 мм от поверхности антенны.

Согласно результатам расчетов (рис. 3), несмотря на возникновение ярко выраженных стоячих волн в области «антенна – образец» (рис. 3, д) и отраженной в направлении излучателя волны, значительного увеличения  $|S_{11}|$  практически не отмечается ( $|S_{11}| = 0,12$ ), а амплитудное распределение поля на поверхности образца остается достаточно однородным.

Однако в случаях отклонения частоты генератора от резонансной хотя бы на 2 % ( $\pm 50$  МГц) наблюдается нарушение однородности поля вдоль поверхности образца со смещением максимума в область короткозамкнутого конца излучателя (рис. 3, в, г).

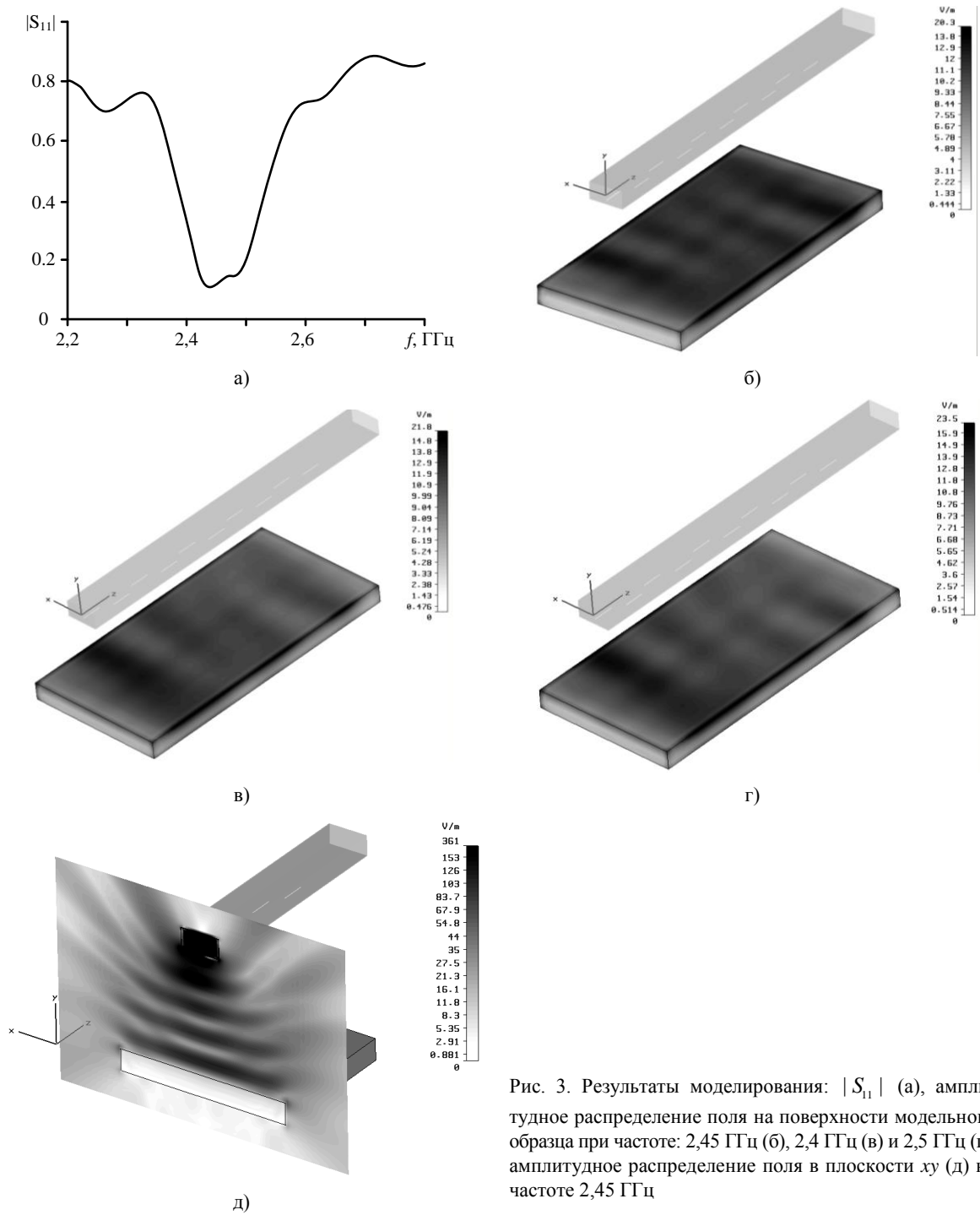


Рис. 3. Результаты моделирования:  $|S_{11}|$  (а), амплитудное распределение поля на поверхности модельного образца при частоте: 2,45 ГГц (б), 2,4 ГГц (в) и 2,5 ГГц (г), амплитудное распределение поля в плоскости  $xz$  (д) на частоте 2,45 ГГц

**Моделирование нерезонансной щелевой антенны.** Нерезонансные щелевые антенны обладают лучшим согласованием в широкой полосе частот по сравнению с резонансными антеннами. Единственным недостатком являются дополнительные потери энергии до 10...15 % в поглощающей нагрузке на выходном конце антенны [1].

Расположение излучающих щелей такой антенны может быть изменено и оптимизировано для получения заданного амплитудного распределения поля вдоль антенны, что является важным фактором для применения таких антенн в технологических СВЧ-установках в качестве излучателей для объектов достаточно большой протяженности.

В качестве нерезонансной антенны был выбран излучатель с продольными (шунтовыми) щелями в широкой стенке прямоугольного волновода, находящимися на разном расстоянии от ее середины.

Антенна возбуждается волной основного типа  $H_{10}$ . В ближней зоне антенны расположен образец модельного материала. Внешняя область моделирования – открытое пространство.

Геометрические параметры излучающих щелей и их расположение подбирались в результате серии численных экспериментов по приемлемой полосе пропускания, в которой коэффициент отражения  $|S_{11}|$  и коэффициент передачи  $|S_{12}|$  минимальны.

В результате расчетов были подобраны наиболее оптимальные геометрические параметры излучателя на основе волновода стандартного сечения  $90 \times 45$  мм при рабочей частоте  $f = 2,45$  ГГц ( $\lambda = 12,24$  см;  $\lambda_g = 16,685$  см) и эффективной длине антенны 1,5 м:

- количество щелей 25;
- расстояние между ними  $d = 0,7\lambda_g/2 = 58,4$  см;
- смещение 1-й и 2-й щели  $x_1 = x_2 = 5,25$  мм;
- смещение остальных щелей  $\Delta x = 0,9$  мм;
- ширина и длина щелей соответственно  $t_{щ} \square l_{щ} = 4$  мм и  $l_{щ} = 5,75$  см.

На рисунке 4 представлены результаты моделирования излучения СВЧ-поля нерезонансной щелевой антенны в свободном пространстве.

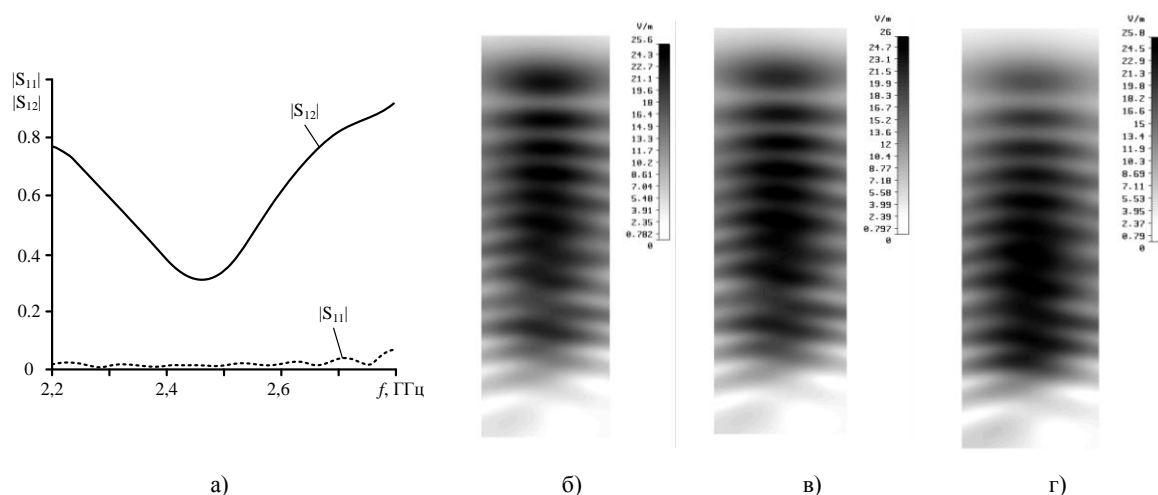


Рис. 4. Зависимость коэффициента передачи и отражения от частоты (а), амплитудное распределение поля в плоскости на расстоянии 300 мм от излучателя для частот: 2,4 ГГц (б), 2,45 ГГц (в) и 2,5 ГГц (г)

Для указанных параметров  $|S_{11}|$  не превышает 0,01,  $|S_{12}|$  находится в диапазоне 0,31...0,38 в области частот 2,4...2,5 ГГц, при приемлемой однородности поля вдоль излучателя.

Далее осуществлялись расчеты излучения антенны на реальную нагрузку – диэлектрический образец ( $\epsilon' = 20$ ,  $\epsilon'' = 5$ ,  $tg\sigma = 0,25$ ) с размерами  $1500 \times 400 \times 50$  мм и находящийся на расстоянии 300 мм от поверхности антенны. Согласно результатам численных расчетов (рис. 5)  $|S_{11}|$  не превышает 0,022,  $|S_{12}|$  находится в диапазоне 0,26...0,47, а амплитудное распределение СВЧ-поля практически не искажается при девиации частоты генератора в пределах  $\pm 50$  МГц.

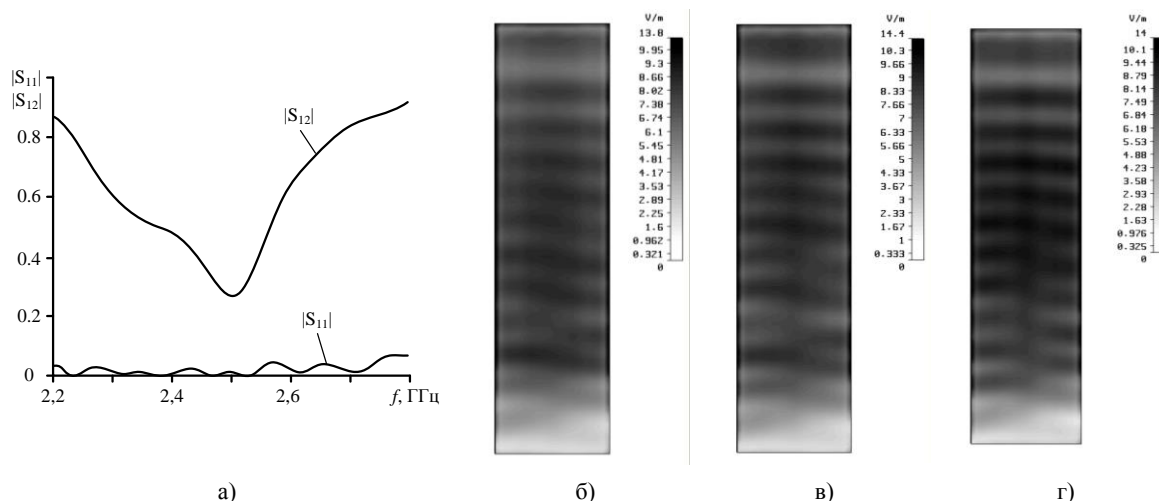


Рис. 5. Зависимость коэффициента передачи и отражения от частоты (а), амплитудное распределение поля на поверхности образца для частот: 2,4 ГГц (б), 2,45 ГГц (в) и 2,5ГГц (г)

**Заключение.** Рассмотренная резонансная щелевая антенна обеспечивает приемлемую однородность поля как в ближней зоне в свободном пространстве, так и на диэлектрической нагрузке. Кроме того, несмотря на возникновение отраженного от диэлектрического образца поля, согласование антенны не ухудшается. Однако существенной проблемой остается крайне узкая полоса пропускания резонансного щелевого излучателя. Для магнетронов естественный уход частоты даже на 1...2 % может привести к рассогласованию антенны, снижению ее КПД и изменению амплитудного распределения поля по длине излучателя. Кроме того, требования к точности изготовления резонансной щелевой антенны крайне высоки. Большинство недостатков, характерных для резонансных щелевых антенн, лишены нерезонансные щелевые антенны. Достоинством нерезонансных щелевых антенн является возможность создавать излучатели большой протяженности, в том числе двухмерные антенные решетки, достаточная полоса пропускания для обеспечения необходимого согласования с генератором без необходимости применения развязывающих СВЧ-устройств, а также отсутствие значительного влияния колебания частоты генератора на распределение поля в ближней зоне излучателя. Некоторой проблемой остается наличие дополнительных потерь на обязательное поглощение прошедшей волны согласованной нагрузкой, установленной на выходе антенны. Следует отметить, что путем параллельного расположения нескольких таких антенн можно создавать двухмерные антенные решетки для облучения протяженных и крупногабаритных объектов. Важно, что конструктивные параметры щелевых излучателей могут быть легко оптимизированы с применением численных методов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кюн, Р. Микроволновые антенны / Р. Кюн. – Л.: Судостроение, 1967. – 520 с.

Поступила 28.05.2008