

# Исследование и разработка моделей светящихся тел светодиодов серии «КИПД140А»

В.А. ГАВРИЛЕНКОВ

Филиал ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске  
E-mail: gva1096@yandex.ru

## Аннотация

Приведены результаты измерений геометрических и светотехнических характеристик двух типов светодиодов серии «КИПД140А». Предложено аналитическое описание моделей светящихся тел светодиодов, устанавливающее взаимосвязь геометрических и светотехнических характеристик светящихся тел светодиодов и позволяющее по известному световому потоку светодиода находить его осевую силу света и распределение яркости по поверхности светящегося тела. Статья посвящается памяти проф. В.В. Трёмбача.

**Ключевые слова:** светодиод, светящее тело, модель, геометрические параметры, яркость, сила света, световой поток, измерение, аналитическое описание.

Применение компьютерных методов решения задач синтеза, анализа и оптимизации световой части световых приборов (СП) требует разработки математических моделей светящихся тел (СТ) источников излучения.

Под светящим телом источника излучения понимают ту его часть, в которой осуществляется преобразование подводимой электрической энергии в световой поток [1]. Характеризуется СТ геометрическими и светотехническими характеристиками. К геометрическим характеристикам относятся

форма и размеры СТ, к светотехническим – световой поток, сила света и яркость. Разработка моделей СТ источников излучения, включая светодиоды (СД), основывается на анализе результатов измерений их параметров и характеристик.

Объекты исследований в настоящей работе – СД серии «КИПД140А»: типов КИПД140А-120-1Б-1,2 и КИПД140А-120-1Л-1,2 [2], общий вид которых и некоторые каталожные характеристики приведены в табл. 1.

Кривые силы света (КСС) СД измерялись на гониометре [3]. Анализ результатов этих измерений для СД типа КИПД140А-120-1Б-1,2 – белого свечения с рассеивающей первичной оптикой – и типа КИПД140А-120-1Л-1,2 – зелёного свечения с прозрачной первичной оптикой – позволяет отметить следующее:

1. КСС СД в разных меридиональных плоскостях различаются незначительно, что позволяет описывать пространственное распределение потока излучения в световом пучке этих СД усреднёнными кривыми (рис. 1).

2. КСС СД типа КИПД140А-120-1Б-1,2, с рассеивающей первичной оптикой, (рис. 1, а) можно аппроксимировать как

$$I_{\varphi} = I_0 \cdot \cos^m \varphi, \quad (1)$$

где  $I_0$  – осевая сила света СД;  $\varphi$  – угловая координата исследуемого на-

правления;  $m$  – коэффициент аппроксимации, определяющий степень отличия аппроксимирующей кривой от косинусной функции.

Коэффициент  $m$  рассчитывается по формуле

$$m = \lg 0,5 / \lg(\cos \varphi_{0,5}), \quad (2)$$

где  $\varphi_{0,5}$  – угловая координата направления, соответствующая равенству  $I_{\varphi} = 0,5 \cdot I_0$ .

3. При аппроксимации КСС СД типа КИПД140А-120-1Л-1,2, с прозрачной первичной оптикой, (рис. 1, б) можно выделить два диапазона: а)  $0^{\circ} \leq \varphi < 60^{\circ}$ , в котором КСС может аппроксимироваться функцией вида (1) с коэффициентом аппроксимации  $m_1 = 0,24-0,27$  и осевой силой света  $(I_0)_2 = I_0$  (кривая 2); б)  $60^{\circ} \leq \varphi \leq 90^{\circ}$  КСС также аппроксимируется функцией вида (1), но с коэффициентом аппроксимации  $m_2 = 0,6-0,8$  и осевой силой света  $(I_0)_3 = (0,3-0,4) \cdot I_0$  (кривая 3).

4. Предложенная аппроксимация КСС позволяет получить выражения взаимосвязи светового потока  $\Phi_v$  с  $I_0$  СД обоих рассматриваемых типов.

Например:

• для СД типа КИПД140А-120-1Б-1,2

$$\Phi_v = 2\pi \cdot I_0 \int_0^{90^{\circ}} \cos^m \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi$$

откуда

$$\Phi_v = 2\pi \cdot I_0 / (m+1); \quad (3)$$

• для СД типа КИПД140А-120-1Л-1,2, с учётом двудиапазонной аппроксимации КСС,

$$\Phi_v = 2\pi \cdot I_0 \cdot \left[ \int_0^{60^{\circ}} \cos^{m_1} \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi + 0,3 \cdot \int_0^{90^{\circ}} \cos^{m_2} \varphi \cdot \sin \varphi \cdot d\varphi \right],$$

откуда

$$\Phi_v = 2\pi \cdot I_0 \cdot \left[ (1 - \cos^{m_1+1} 60^{\circ}) / (m_1 + 1) + (0,3 \cdot \cos^{m_2+1} 60^{\circ}) / (m_2 + 1) \right]. \quad (4)$$

Геометрические параметры и яркость СТ СД измерялись с помощью микроскопа-яркомера [4].

Вид СТ СД под микроскопом приведён на рис. 2, а анализ результатов измерений яркостных характеристик этих СТ (рис. 3, а и 4) позволяет отметить, что:

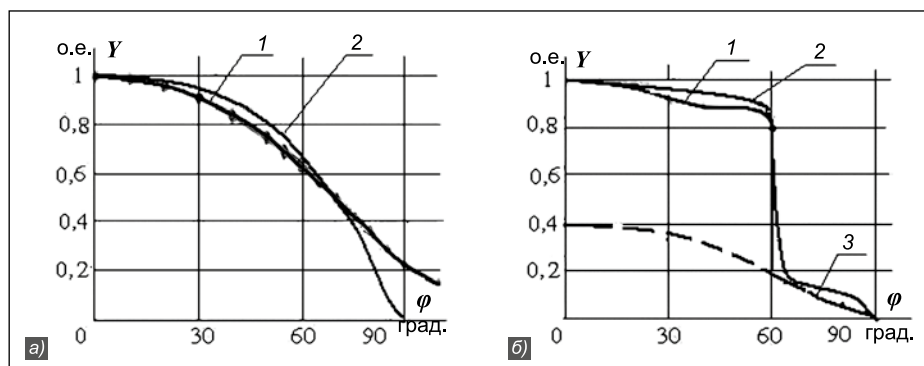


Рис. 1. Экспериментальные КСС 1 и аппроксимирующие зависимости 2 и 3 для светодиодов КИПД140А-120-1Б-1,2 (а) и КИПД140А-120-1Л-1,2 (б)

- СТ СД типа КИПД140А-120-1Б-1,2 («белый» с рассеивающей первичной оптикой) симметрично и имеет близкую к полусферической форму, что позволяет принять в качестве модели СТ СД этого типа полушар (рис. 3, б) диаметром 4 мм.

- Распределение яркости  $L$  в меридиональном сечении изображения СТ неравномерно (кривая 1 на рис. 3, а) и может быть аппроксимировано экспоненциально:

$$L(y) = L_0 \cdot \exp[-2(y / y_{0,1})^2], \quad (5)$$

где  $L_0$  – осевая яркость,  $y_{0,1}$  – координата точки по оси  $Y$ , соответствующей равенству  $L = 0,1 \cdot L_0$ .

- При оценке  $I_0$  распределение яркости по СТ можно аппроксимировать ломаной линией (кривая 2 на рис. 3, а). Такая аппроксимация позволяет заменить фактически неравнояркое СТ условными (например, 3 равнояркими) СТ, размеры и яркость которых находятся из условия равенства фактической  $I_0$  сумме сил света, формируемых условными СТ:

$$I_0 = \sum (L_k \cdot A_{ст,k}), \quad (6)$$

где  $L_k$  – яркость  $k$ -го условного СТ;  $A_{ст,k}$  – площадь проекции этого СТ на плоскость, перпендикулярную направлению  $\varphi = 0$ .

- Анализируя структуру пучков физических лучей, опирающихся на бесконечно малые элементы светящей поверхности, например, по направлению  $\varphi = 0$  (рис. 3, б), можно найти функцию, описывающую распределение яркости в этих элементарных пучках.

Действительно, варьируя координату  $y_k$ , можно по формуле (5) вычислить яркость выходящего из т.  $M_k$  луча  $L_k(y)$ , и его угловую координату (относительно нормали к поверхности)  $\varepsilon_k$  по формуле

$$\varepsilon_k = \arcsin(y_k / r_c), \quad (7)$$

где  $r_c$  – радиус (полурадиус) модели СТ СД.

Получаемую таким образом зависимость можно аппроксимировать экспоненциально:

$$L(\varepsilon) = L_{0,\varphi} \cdot \exp[-2(\varepsilon / \varepsilon_{0,1})^2], \quad (8)$$

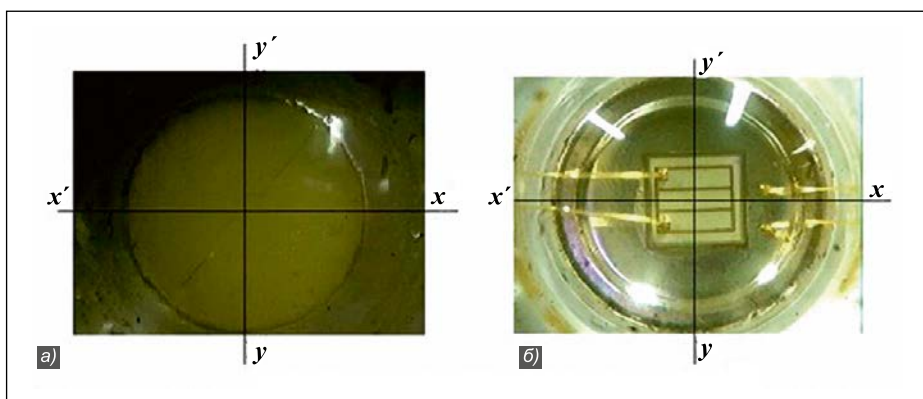


Рис. 2. Вид под микроскопом светящего тела светодиодов КИПД140А-120-1Б-1,2 (а) и КИПД140А-120-1Л-1,2 (б)

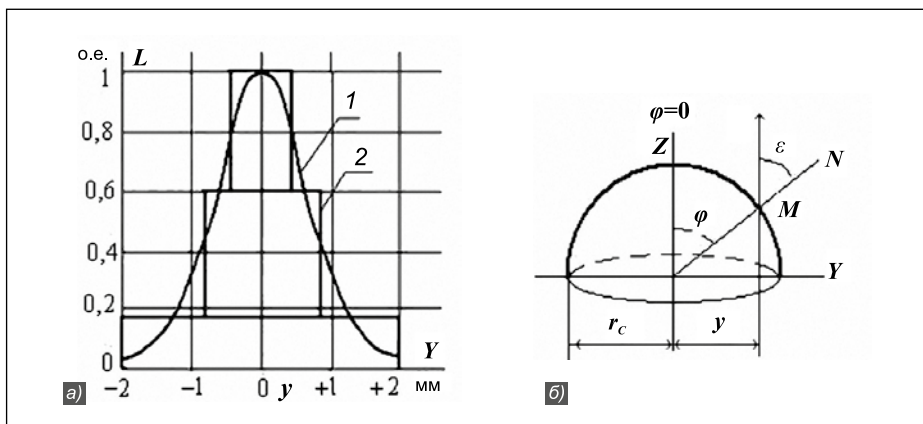


Рис. 3. Распределение яркости в изображении (а) и сечение модели (б) светящего тела светодиода КИПД140А-120-1Б-1,2

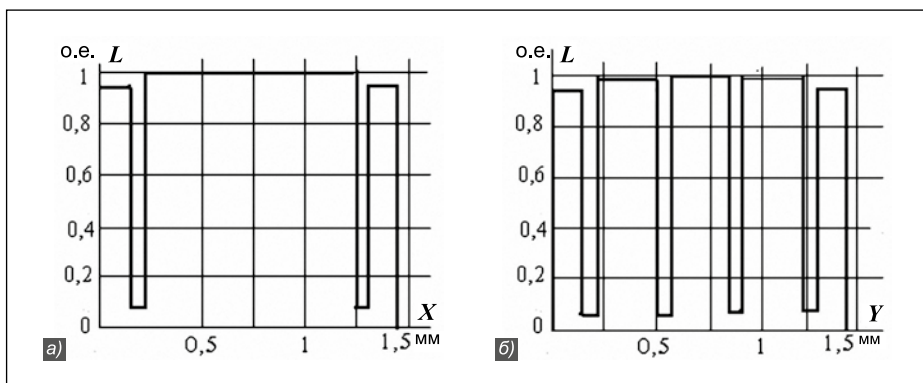


Рис. 4. Распределение яркости в изображении светящего тела светодиода КИПД140А-120-1Л-1,2 в сечениях  $x-x'$  (а) и  $y-y'$  (б)

где  $\varepsilon_{0,1}$  – координата луча, соответствующая равенству  $L(\varepsilon) = L_{0,\varphi}$ .

Из рис. 3 согласно сформулированному условию следует, что  $\varepsilon_{0,1} \approx 49^\circ$ .

- Вид СТ СД типа КИПД140А-120-1Л-1,2 под микроскопом имеет сложную структуру (рис. 2, б) с первичным СТ, вписывающимся в прямоугольник (квадрат) со сторонами  $2h_c = 2l_c = 1,4$  мм, и систему вторичных СТ, образование которых объяснимо оптическим дейст-

вием сферической линзы – элемента конструкции СД.

Аналитическое описание вторичных СТ, форма и размеры которых меняются при изменении направления наблюдения  $\varphi$ , – задача сложная, и потому, учитывая их намного меньшие размеры и яркость, чем у первичного СТ, представляется целесообразным заменить всю систему реальных СТ моделью – прямоугольным СТ, равным по площади первичному СТ. Сила света модели берётся той же,

Общий вид и характеристики светодиодов КИПД140А-120–1Б-1,2

Тип	Цвет излучения (рабочий диапазон длин волн)	Рабочий ток, мА	Мощность, Вт	Световой поток $\Phi_v$ , лм	Общий вид светодиода
КИПД140А-120–1Б-1,2	Белый	350	1	80	
КИПД140А-120–1С-1,2	Синий (460–480 нм)			15	
КИПД140А-120–1К-1,2	Красный (615–635 нм)			35	
КИПД140А-120–1Ж-1,2	Жёлтый (585–595 нм)				
КИПД140А-120–1Л-1,2	Зелёный (515–535 нм)			60	

Таблица 2

Параметры и характеристики моделей светящихся тел светодиодов

Тип светодиода	$\Phi_v$ , лм	$I_0$ , кд	$L_{ср}$ , кд/м <sup>2</sup>	$L_{макс}$ , кд/м <sup>2</sup>	Форма и уравнение поверхности расчётного светящего тела
КИПД140А-120–1Б-1,2	80	21	$1,67 \cdot 10^6$	$5,97 \cdot 10^6$	полушар: $x_c^2 + y_c^2 + z_c^2 = (r_c)^2; z_c < r_c$
КИПД140А-120–1Л-1,2	60	12	$6,1 \cdot 10^6$	$7,65 \cdot 10^6$	прямоугольник: $-a_c/2 \leq y_c \leq a_c/2; -b_c/2 \leq x_c \leq b_c/2; z_c = 0$
КИПД140А-120–1С-1,2	15	3	$1,52 \cdot 10^6$	$1,91 \cdot 10^6$	То же
КИПД140А-120–1К-1,2	35	6,96	$3,54 \cdot 10^6$	$7,65 \cdot 10^6$	" – "

Примечание:  $r_c, a_c, b_c$  – геометрические параметры светящихся тел

что у реального СТ СД типа КИПД 140А-120–1Л-1,2. Распределение яркости по поверхности модели принимается постоянным, а – в пространстве вычисляется по формуле

$$L(\varphi) = I(\varphi) / A_{сд}(\varphi), \quad (9)$$

где  $I(\varphi)$  – сила света СД в исследуемом направлении  $\varphi$ ,  $A_{сд}(\varphi)$  – площадь проекции СТ  $A_{сд}$  на перпендикулярную направлению  $\varphi$  плоскость.

Формулы (1), (3)–(6) и (9) выражают взаимосвязь светотехнических и геометрических характеристик модели СТ СД и позволяют по известным геометрическим характеристикам и одной из светотехнических характеристик ( $\Phi_v, L_\varphi$  или  $I_0$ ) вычислять две другие из них.

Формулы (1), (7)–(9) позволяют также вычислять яркость лучей в исследуемом направлении.

Параметры и характеристики моделей СТ СД, найденные в результате обработки результатов измерений, приведены в табл. 2.

Предлагаемые модели СТ СД серии «КИПД140А» с рассеивающей и прозрачной первичной оптикой применимы в разработке автоматизированных методов проектирования зеркальных, линзовых и зеркально-линзовых оптических систем СП с такими СД.

Ниже приведены некоторые примеры использования моделей СТ СД в решении практических задач.

• **Примеры вычисления светотехнических характеристик моделей СТ СД**  
– Светодиод типа КИПД140А-120–1Б-1,2

1. Согласно рис. 1,  $a$  принимаем угол  $\varphi_{0,5}$ , равным  $70^\circ$ , и по формуле (2) находим:  $m \approx 0,64$ .

2. Принимаем  $\Phi_v = 80$  лм (табл. 1) и по формуле (3) находим:  $I_0 \approx 21$  кд.

По формуле (5) вычисляем среднюю яркость СТ  $L_{ср}$ :  $L_{ср} = 21 / (12,76 \cdot 10^{-6}) \approx 1,65 \cdot 10^{-6}$  кд/м<sup>2</sup>.

3. Согласно формуле (6)

$$L_{макс} = I_0 / \sum (l_k \cdot A_{ст,k}),$$

где  $l_k$  – относительное значение яркости  $k$ -го элементарного СТ.

Подставляя известные значения  $I_0, l_k$  и  $A_{ст,k}$ , находим:  $L_{макс} = 21/3,44 \approx 6 \cdot 10^{-6}$  кд/м<sup>2</sup>.

– Светодиод типа КИПД140А-120–1Л-1,2

1. Принимаем согласно рис. 1,  $b$ : при  $0 \leq \varphi < 60^\circ m_1 = 0,25$  и  $I_{0,1} = 1$ , а при  $60 \leq \varphi \leq 90^\circ m_2 = 0,65$  и  $I_{0,2} = 0,3$ ;

2. По формуле (4), после преобразований, находим:  $I_0 = \Phi_v / 3,28 = 60/3,28 \approx 18,3$  кд.

• **Пример алгоритма расчёта яркости луча, опирающегося на бесконечно малый элемент поверхности СТ СД**

1. Задаётся во внешней области пространства обратный луч  $\mathbf{a}'$  ( $a'_x, a'_y, a'_z$ ), проходящий через бесконечно малый элемент выходного зрачка (светового отверстия) оптической системы СП.

2. Рассчитывается (например, по формулам Федера) ход луча через оптическую систему и находятся координаты ( $a_x, a_y, a_z$ ) сопряжённого с лучом  $\mathbf{a}'$  луча  $\mathbf{a}$ , лежащего во внутренней области СП (в пространстве источника света).

3. Находятся координаты ( $x_c, y_c, z_c$ ) т.  $M_c$  — точки пересечения луча  $\mathbf{a}$  с СТ СД.

4. Находятся координаты ( $x_q, y_q, z_q$ ) вектора нормали  $\mathbf{q}$  к поверхности СТ СД в т.  $M_c$  и угловая координата  $\epsilon$  луча  $\mathbf{a}$  относительно нормали.

5. По формулам (1), (7)–(9), вычисляется яркость исследуемого луча.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. *Трембач В.В.* Световые приборы: Учеб. для вузов по спец. «Светотехника и источники света». — 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Высш. шк., 1990. — 463 с.

2. URL: <http://radio-hobby.org/uploads/datasheets/kipd/kipd140.pdf> (дата обращения: 20.08.2016).

3. *Гавриленков В.А.* Измерение кривых силы света светодиодов типа КИПД140А-120-1Б-1,2 / Энергетика, информатика, инновации — 2015. Сборник трудов V международной научно-технической конференции: В 2 томах. — Смоленск: Универсум, 2015. — С. 281–285.

4. *Гавриленков В.А., Петроченков И.А., Логинов О.А.* Оптическая система микроскопа-яркомера / Сборник тезисов докладов на научно-технической конференции «Молодые светотехники России». — М.: Вигма, 2014. — С. 15–17.

Состоявшаяся 10 ноября 2016 года Открытая дискуссия Светотехнической торговой Ассоциации (СТА) «Светотехника: курс на качество» стала одним из наиболее интересных и запомнившихся мероприятий выставки *Interlight Moscow powered by light+building 2016*. В настоящее время российский светотехнический рынок претерпевает изменения, связанные с новым уровнем понимания интересов и потребностей заказчика и, как следствие, новыми задачами, стоящими перед производством и бизнесом.

Модераторами дискуссии выступили первый вице-президент СТА С.В. Койнов и президент «Лайтинг Бизнес Консалтинг» В.Г. Габриелян, построившие мероприятие таким образом, чтобы была возможность услышать мнения и позиции как потребителей и заказчиков светотехнической продукции, так и её производителей, промоутеров и дистрибьюторов. В ходе дискуссии большое значение имела также позиция общественных организаций в области светотехники, в частности, ассоциации «Честная позиция» и СТА.

По итогам заседания и всестороннего анализа докладов и их обсуждения участники дискуссии, среди которых были наиболее заметные игроки светотехнического рынка — компании «БЛ Трейд», «Световые технологии», «ЭТМ», ВНИСИ им. С.И. Вавилова, «Лайтинг Бизнес Консалтинг», а также ассоциации СТА и «Честная позиция», и др. — выступили с совместной резолюцией, в которой большинством голосов признали следующее:

- Проблема качества светотехнических изделий, их технического соответствия заявленным характеристикам и требованиям технических регламентов является существенной для светотехнического рынка РФ.

- Нерешенность данной проблемы на светотехническом рынке РФ создает условия для роста недобросовестных участников рынка, которые вводят в заблуждение конечных потребителей, получая при этом незаконное преимущество, и создает проблемы для добросовестных, продукция которых предлагается по более высоким ценам, соответствующим ее качеству и заявленным техническим данным.

- Проблемы качества и соответствия светотехнических изделий приводят к неэффективному использованию государственных средств, выделяемых на закупку светотехнического оборудования и их прямым потерям.

- Проблемы качества и соответствия светотехнических изделий создают барьер для продвижения инновативных осветительных технологий. Разочарование конечных потребителей в качестве светодиодной продукции как в профессиональном так и в бытовом сегментах приводит к отторжению этих технологий в пользу менее эффективных.

- Существующее законодательное поле не позволяет поставить эффективный барьер недобросовестным участникам рынка и ограничить распространение некачественной продукции.

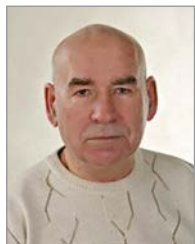
- Для решения данной проблемы необходимо ее понимание всеми участниками рынка — производителями, импортерами, дистрибьюторами, конечными потребителями доведение проблем до всех структур и лиц, ответственных за закупки светотехнического оборудования и объединение усилий добросовестных участников светотехнического рынка в продвижении

- Решению проблем качества и соответствия будет способствовать внедрение добровольной сертификации. Успех внедрения добровольной сертификации зависит от ряда условий: 1) потребитель должен знать о существовании такой сертификации и быть уверен в надёжности знака добровольной сертификации; 2) ФОИВ должны признать знак сертификации как инструмент дифференциации качественной продукции для госзакупок; 3) дистрибьюторы должны отдавать предпочтение продукции, прошедшей добровольную сертификацию. В таких условиях производители будут сами стремиться получить знак добровольной сертификации.

- Российский рынок светотехники в настоящее время перенасыщен светодиодной продукцией, но при этом качество многих светодиодных приборов не отвечает установленным нормами требованиям. Для предотвращения негативных последствий замены традиционного освещения на светодиодное освещение ненадлежащего качества рекомендуется использовать при проектировании осветительной установки только реальные светотехнические характеристики осветительных приборов, а также удостовериться в успешном прохождении их эксплуатационных испытаний.

Подробнее с докладами и стенограммой дискуссии можно ознакомиться на сайте СТА.

[www.lta.ru](http://www.lta.ru)  
13.02.2017



**Гавриленков Владимир Андреевич**, канд. техн. наук, доцент. Окончил в 1968 г. МЭИ по специальности «Светотехника и источники света». Доцент кафедры «Оптико-электронные системы» филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске

«Оптико-электронные системы» филиала ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ» в г. Смоленске