

## РЕШЕНИЕ ОБРАТНОЙ ЗАДАЧИ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ НАПЛАВКЕ

© 2023 г. Д.Н. Трушников<sup>1,\*</sup>, Е.Л. Кротова<sup>1,\*\*</sup>, С.С. Стариков<sup>1,\*\*\*</sup>, Н.А. Мусихин<sup>1,\*\*\*\*</sup>,  
С.В. Варушкин<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>, Е.В. Матвеев<sup>1,\*\*\*\*\*</sup>

<sup>1</sup>Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Россия 614990 Пермь, Комсомольский пр-т, 29

E-mail: \*trdimitr@yandex.ru; \*\*lenkakrotova@yandex.ru; \*\*\*StarikovSS@pnppk.ru;  
\*\*\*\*musikhin.nikolay@yandex.ru; \*\*\*\*\*stepan.varushkin@mail.ru; \*\*\*\*\*zhenyamatveev@yandex.ru

Поступила в редакцию 15.11.2022; после доработки 26.12.2022

Принята к публикации 29.12.2022

Поставлена обратная задача восстановления поверхности по сигналу тормозного рентгеновского излучения применительно к процессу наплавки валика при аддитивном производстве, а также приведено ее решение с использованием итерационного метода восстановления. Численная реализация осуществлена на примере восстановления трех типов симметричных объектов: гауссова поверхность, полусфера, цилиндр. Сравнение показало хорошее соответствие восстановленных поверхностей с заданными.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая наплавка, аддитивные технологии, осцилляция, обратная задача, математическое моделирование, рентгеновское излучение.

DOI: 10.31857/S0130308223020069, EDN: BWTWVJ

### ВВЕДЕНИЕ

Электронно-лучевая наплавка является одним из перспективных методов аддитивного производства (3D-печати), реализующего послойное формирование изделия путем добавления материала к основе. Однако важной проблемой при разработке бездефектных изделий является обеспечение воспроизводимости качества наплавляемых участков. Аддитивное производство наплавкой проволочного материала представляет собой последовательное наложение километров сварных швов при постоянно меняющихся условиях теплоотвода, наложенных на колебательную природу поведения ванны расплавленного металла. Даже незначительные отклонения режима от требуемого могут приводить к формированию критических дефектов в виде несплавлений, подрезов, крупных пор, отклонения от требуемой геометрии. Решением может быть осуществление оперативного контроля процесса на основе анализа сигналов сопутствующих процессу излучений, таких как световое, тепловое, рентгеновское излучение, потоки заряженных частиц из области взаимодействия электронного луча с металлом. Такого рода сигналы называют вторично-эмиссионными и широко используются при построении систем автоматизации процесса сварки и наплавки [1—3]. Перспективными являются системы контроля процесса наплавки, основанные на регистрации сигнала рентгеновского излучения с помощью специальных датчиков [4]. Рентгеновские лучи распространяются точно по прямым траекториям, не отклоняются под действием электрических и магнитных полей и практически не поглощаются парами металлов и плазмой над областью взаимодействия электронного луча с металлом. Перечисленные аспекты обуславливают высокую помехозащищенность датчиков рентгеновского излучения в сравнении с датчиками вторичных и отраженных электронов, ионов и др. [5].

В литературе описаны устройства, реализующие контроль параметров процесса при взаимодействии электронного луча с обрабатываемыми материалами [6, 7]. В работе [7] применяются методы компьютерной томографии для определения распределения плотности тока луча. Известны системы управления процессом наплавки посредством контроля вводимой мощности [8], точного позиционирования электронного луча относительно присадочной проволоки [9], контроля траектории движения луча относительно детали [1, 10] и др.

Перспективными являются методы, позволяющие получать информацию о ванне наплавленного металла и о формируемом наплавляемом валике непосредственно во время наплавки [11]. Ранее авторами [12] была осуществлена постановка обратной задачи, а также сформулированы требования условной корректности, гарантирующие единственность решения задачи в ограничениях области условной корректности для задачи реконструкции формы области взаимодействия электронного луча с металлом. Однако результатом решения является дифференциальное уравнение,

которое не берется в квадратурах стандартными способами, и нахождение разрешающей функции осуществляется с помощью приближенных численных методов. В данной работе представлена постановка обратной задачи восстановления поверхности по сигналу тормозного рентгеновского излучения применительно к процессу наплавки валика при аддитивном производстве, а также приведено ее решение с использованием итерационного метода восстановления ART.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Обработка материала электронным лучом в вакуумной камере представляет собой сложный процесс с большим количеством влияющих параметров, при этом важнейшими являются энергетические характеристики самого электронного пучка: ток электронного пучка, ускоряющее напряжение и плотность распределения энергии по сечению электронного пучка. Экспериментальные данные показывают, что распределение плотности тока по сечению электронного пучка с достаточной степенью точности можно описать нормальным законом распределения [13]. При построении математической модели распределение мощности электронного пучка описывалось законом двухмерного нормального распределения Гаусса:

$$j(x, y) = \frac{I}{2\pi\sigma_x\sigma_y \cdot \sqrt{1-\rho^2}} \cdot \exp \left\{ -\frac{1}{2(1-\rho^2)} \cdot \left[ \frac{(x-\Delta x)^2}{\sigma_x^2} - \rho \frac{2(x-\Delta x)(y-\Delta y)}{\sigma_x\sigma_y} + \frac{(y-\Delta y)^2}{\sigma_y^2} \right] \right\}, \quad (1)$$

где  $x$  — координата по оси абсцисс;  $y$  — координата по оси ординат;  $\sigma_x$  — стандартное квадратичное отклонение вдоль оси абсцисс;  $\sigma_y$  — стандартное квадратичное отклонение вдоль оси ординат;  $\rho$  — коэффициент корреляции (в нашем случае принимался за 0);  $\Delta x$  — смещение электронного луча относительно проволоки по  $x$ ;  $\Delta y$  — смещение электронного луча относительно проволоки по  $y$ .

При взаимодействии электронного пучка с материалом электроны в результате торможения теряют свою энергию. В результате возникает рентгеновское излучение, локализованное в месте взаимодействия электронного пучка с обрабатываемым материалом. В зависимости от величины энергии электронов, бомбардирующих поверхность, возникает два типа рентгеновского излучения: тормозное и характеристическое. Если энергия электронов меньше некоторой определенной величины, то возникает только тормозное излучение.

На тормозной спектр сильное влияние оказывает начальная кинетическая энергия электронов  $K$ , величина которой связана с ускоряющим напряжением  $U_0$ :

$$K = e \cdot U_0. \quad (2)$$

Зависимость интенсивности спектральной плотности  $I_\lambda$  от длины волны в тормозном спектре соответствует гладкой кривой с максимумом. Интенсивность уменьшается от максимума в сторону длинных волн, асимптотически приближаясь к нулю. Наоборот, в сторону коротких волн интенсивность спадает быстро, и спектр резко обрывается при определенной граничной длине волны  $\lambda_0$ , которая называется коротковолновой (квантовой) границей спектра. Экспериментальные исследования показали, что спектр тормозного излучения является непрерывным в диапазоне частот от нуля до некоторой граничной частоты  $\nu_0$ , которая прямо пропорциональна ускоряющему напряжению [14]:

$$\nu_0 = 2,42 \cdot 10^{14} U_0. \quad (3)$$

С увеличением  $U_0$  граничная частота  $\nu_0$  увеличивается, а граничная длина волны  $\lambda_0$  убывает, при этом спектральная плотность  $I_\lambda$  возрастает.

Важно, что общий вид тормозного спектра не зависит от вещества, в котором электроны испытывают торможение, а полностью определяется ускоряющим напряжением  $U_0$ . Однако интенсивность излучения при постоянном  $U_0$  возрастает при переходе к веществам с большим порядковым номером  $Z$ . Эта зависимость обусловлена природой тормозного излучения.

При обработке поверхности материала электронным пучком, направленным перпендикулярно этой поверхности, мощность (поток) рентгеновского излучения определяется следующим выражением [15]:

$$\Phi = \oint J ds = k_0 I Z U_0^2, \quad (4)$$

где  $J$  — плотность потока рентгеновского излучения;  $s$  — поверхность, через которую проходит поток;  $k_0$  — коэффициент пропорциональности;  $U_0$  — ускоряющее напряжение;  $I$  — ток электронного пучка;  $Z$  — атомный номер обрабатываемого материала.

На рис. 1 схематически представлен процесс обработки материала электронным пучком. Электронный пучок осциллирует по поверхности изделия, при взаимодействии электронов с поверхностью изделия возникает рентгеновское излучение, которое регистрируется датчиком рентгеновского излучения.

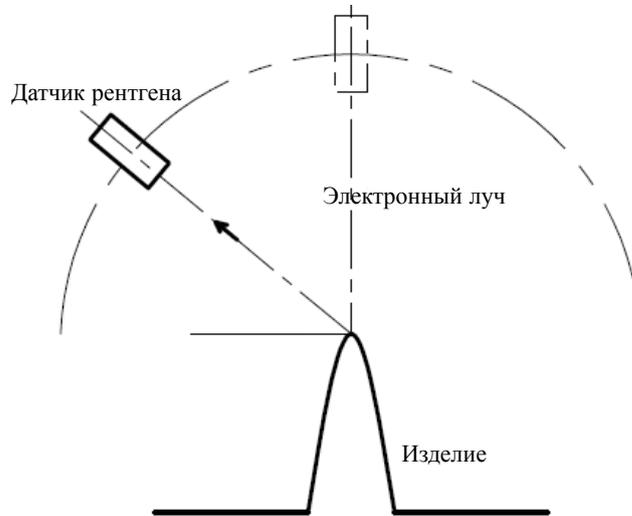


Рис. 1. Схематическое изображение процесса обработки материала.

Зависимость относительных значений потока энергии рентгеновского излучения от угла между направлением электронного луча и нормалью к поверхности обрабатываемого материала в работе [4] предложено аппроксимировать следующим выражением:

$$J_\varphi(\varphi) = \frac{J(\varphi)}{J_0} = \left[ 1 - \left( \frac{|\varphi^3|}{90^3} \right) \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (5)$$

Результат аппроксимации при изменении угла падения луча  $\varphi$  от 0 до  $\pm 90^\circ$  представлен на рис. 2.

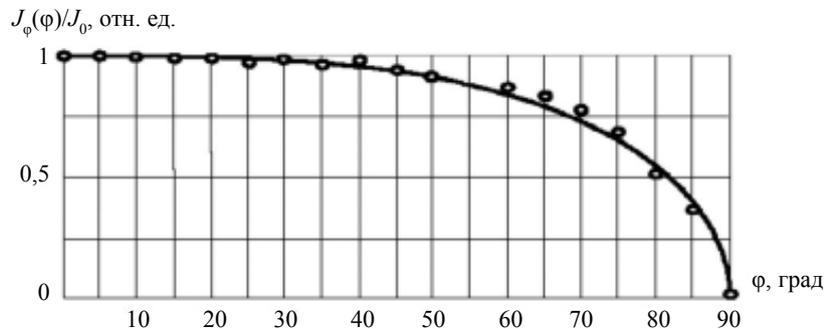


Рис. 2. Зависимость  $J_\varphi(\varphi)$  — изменение плотности потока энергии рентгеновского излучения в зависимости от угла между направлением электронного луча и нормалью к поверхности [4].

Пусть наплавка ведется с осциллирующей пучка с небольшой амплитудой по траектории с координатами  $x, y$ . Форма поверхности, по которой осциллирует луч, описывается функцией  $z(x, y)$ ;  $\tau_x, \tau_y$  — смещения электронного пучка от его равновесного положения относительно центра поверхности;  $j(x, y)$  — распределение плотности тока электронного пучка.

Выделим на поверхности элементарную площадку  $dS$ . Пусть излучение от элемента  $dS$  — сферическое. Величина потока энергии рентгеновского излучения от элемента  $dS$  определяется выражением:

$$d\Phi_e(\varphi) = k_0 Z U_0^2 j(x, y) J_\varphi(\varphi) dS = k_0 Z U_0^2 j(x, y) \left[ 1 - \left( \frac{\varphi}{90} \right)^3 \right]^{1/2} dS, \quad (6)$$

где  $k_0$  — коэффициент пропорциональности [9];  $Z$  — атомный номер обрабатываемого материала.

Правую часть выражения можно аппроксимировать функцией  $\cos^{1/3}(\varphi)$  [5, 16]. Тогда:

$$d\Phi_e(\varphi) = k_0 Z U_0^2 j(x, y) \cos^{1/3}(\varphi) dS. \quad (7)$$

Проведя элементарные тригонометрические преобразования и учитывая, что угол  $\varphi \leq \frac{\pi}{2}$ , получим:

$$d\Phi_e(\varphi) = k_0 Z U_0^2 j(x, y) \cdot [1 + \operatorname{tg}^2 \varphi]^{-1/6} dS. \quad (8)$$

Заменив тангенс угла через частные производные по  $x$  и  $y$ , мы приходим к дифференциальному уравнению с учетом искомой поверхности  $z(x, y)$ :

$$d\Phi_e(x, y) = k_0 Z U_0^2 j(x, y) \left[ 1 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right]^{-1/6} dx dy. \quad (9)$$

Доля потока энергии рентгеновского излучения, регистрируемого датчиком:

$$d\Phi = \frac{d\Phi_e \cdot S_d}{4\pi R^2}, \quad (10)$$

где  $S_d$  — площадь активной поверхности датчика рентгеновского излучения;  $R$  — расстояние до датчика излучения ( $S_d \ll 4\pi R^2$ ).

Объединив все постоянные величины в общую константу  $K = \frac{k_0 Z U_0^2 S_d}{4\pi R^2}$ , получим для излучения со всей поверхности обрабатываемого материала:

$$S(\tau_x, \tau_y) = \iint_a^b K \cdot j(x - \tau_x, y - \tau_y) \cdot \left[ 1 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right]^{-1/6} dx dy. \quad (11)$$

Цель данной работы заключается в решении обратной задачи восстановления первоначальной (заданной) поверхности  $z(x, y)$  по известному распределению тормозного рентгеновского излучения.

### МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Восстановление заданной поверхности проводили по итерационному методу восстановления (ART — Algebraic Reconstruction Technique) [17]. Для численной реализации итерационного метода ART был реализован алгоритм в среде программирования MATLAB. Блок-схема алгоритма представлена на рис. 3.

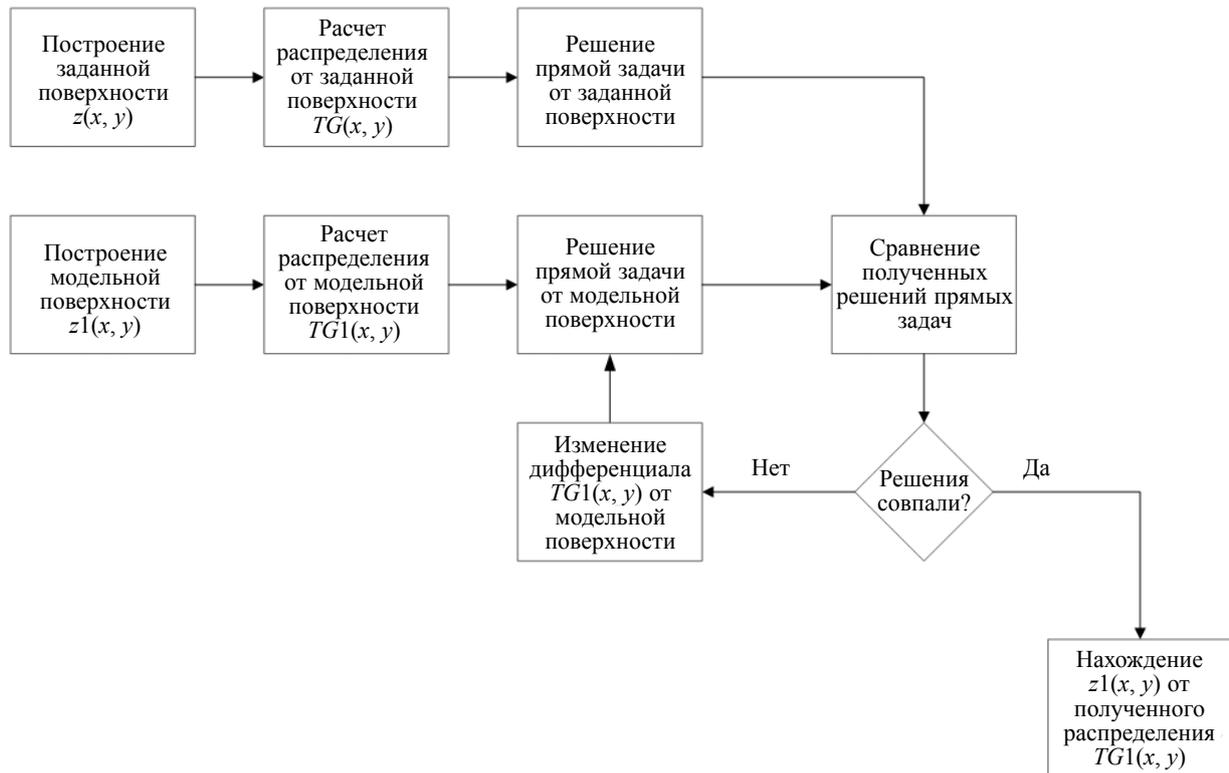


Рис. 3. Блок-схема алгоритма восстановления поверхности.

В качестве первоначального приближения в качестве «модельной поверхности» понималась поверхность в виде двумерного распределения Гаусса. В ходе решения обратной задачи восстановления именно модельная поверхность, а точнее ее дифференциал, будет претерпевать изменения в алгоритме восстановления.

### ЧИСЛЕННЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ

При численной реализации алгоритма решения обратной задачи восстановление заданной поверхности изделия  $z(x, y)$  осуществлялось для заданных объектов трех симметричных форм, представляющих двумерное гауссово распределение, полусферу, цилиндр.

Для решения численными методами представим дифференциальное уравнение в выражении (11) как функцию  $TG(x, y)$ :

$$TG(x, y) = \left[ 1 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right]^2 + \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} \right]^2 \right]^{-1/6}. \quad (12)$$

Интеграл в выражении (14) заменим суммой:

$$S(\tau_x, \tau_y) = \sum_{x=1}^n \sum_{y=1}^n K \cdot j(x - \tau_x, y - \tau_y) \cdot TG(x, y). \quad (13)$$

Решая стандартными численными методами [18] выражение (12), получаем распределение функции  $TG(x, y)$ , которое является функцией от вторых частных пространственных производных (рис. 4б). Далее, проведя расчет по выражению (13), получаем распределение тормозного рентгеновского излучения с учетом осцилляции электронным лучом поверхности изделия (рис. 4в).

Для моделирования решения обратной задачи было построено первоначальное приближение модельной поверхности, с которой проводились те же самые операции. Для моделирования реального сигнала первоначальное приближение было дополнительно зашумлено (рис. 5).

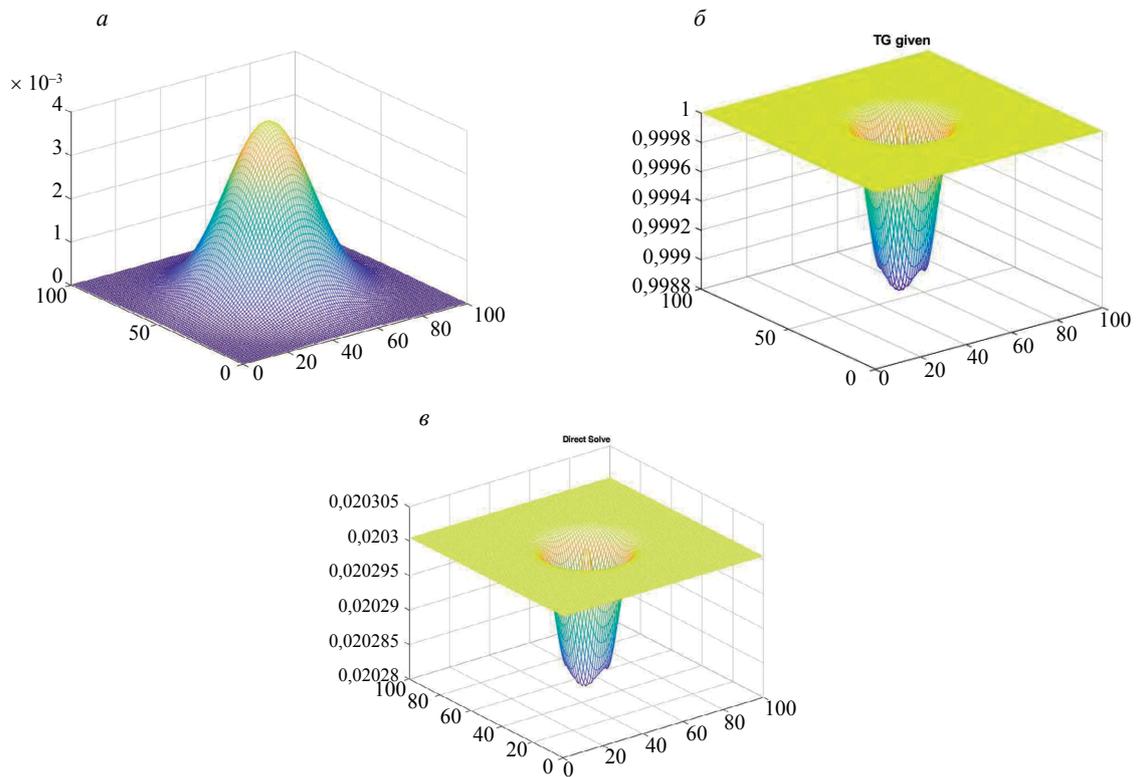


Рис. 4. Заданная поверхность  $z(x, y)$  в виде распределения Гаусса (а); дифференциал заданной поверхности  $TG(x, y)$  (б); решение прямой задачи  $S(\tau_x, \tau_y)$  (в).

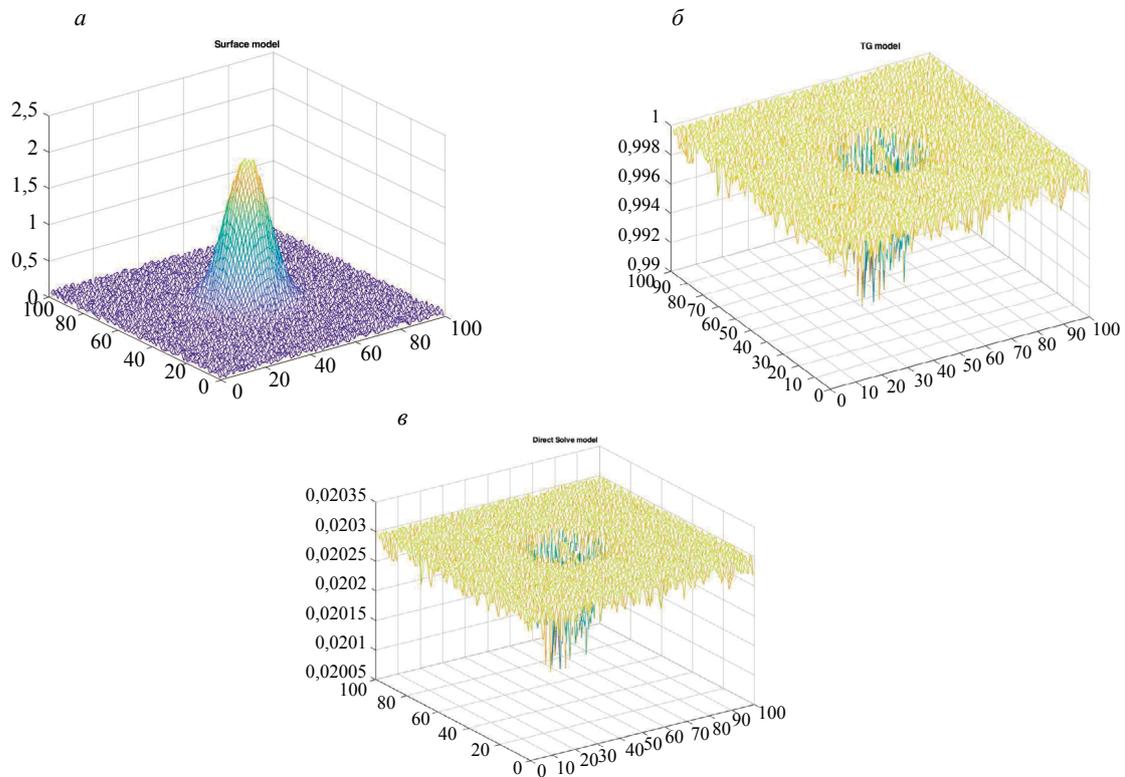


Рис. 5. Первоначальное приближение модельной поверхности  $z_1(x, y)$  (а); дифференциал модельной поверхности  $TG_1(x, y)$  (б); решение прямой задачи  $S_1(\tau_x, \tau_y)$  (в).

Таким образом, мы имеем результаты численного моделирования решения прямых задач формирования рентгеновского излучения от заданной поверхности  $z(x, y)$  и модельной  $z1(x, y)$ . Предполагается, что решение прямой задачи от заданной поверхности  $S1(\tau_x, \tau_y)$  представляет собой полученное в реальном эксперименте распределение рентгеновского излучения от неизвестной поверхности.

Далее  $S(\tau_x, \tau_y)$  и  $S1(\tau_x, \tau_y)$  сравнивают между собой с нахождением средней абсолютной погрешности в процентах (МАРЕ) [19]. Если средняя абсолютная погрешность превышает 1 %, будем считать, что прямые задачи не совпадают, значит необходимо изменить  $z1(x, y)$  и заново решить прямую задачу по выражению (13). Однако ввиду отсутствия аналитического решения для  $z(x, y)$  в выражении (12) мы не можем сразу получить первоначальную поверхность из решения прямой задачи. Но в то же время присутствует явная зависимость между дифференциалом  $TG(x, y)$  и решением прямой задачи  $S(\tau_x, \tau_y)$ . Таким образом, мы можем применять итерационный способ восстановления в отношении дифференциала  $TG(x, y)$  и решения прямой задачи  $S(\tau_x, \tau_y)$ .

Изменение дифференциала модельной поверхности  $TG1(x, y)$  осуществляется следующим образом. В каждой точке заданного диапазона расчетов прямых задач находится натуральный логарифм отношения  $S1(\tau_x, \tau_y)$  и  $S(\tau_x, \tau_y)$ . Полученный массив логарифмов умножается на текущее значение  $TG1(x, y)$  и вычитается из него. Этот процесс можно описать выражением (14):

$$TG1_{i,j} = TG1_{i,j} - \left( \ln \left( \frac{S1_{i,j}}{S_{i,j}} \right) \right) \cdot TG1_{i,j}. \quad (14)$$

Таким образом, при равенстве единице отношения  $\frac{S1_{i,j}}{S_{i,j}}$  правая часть отношения становится равной нулю, в таком случае текущий элемент массива  $TG1(x, y)$  остается неизменным.

Если же отношение отклоняется от единицы, тогда элемент массива  $TG1(x, y)$  соответственно изменяется. Далее снова строится решение прямой задачи  $S1(\tau_x, \tau_y)$  и проводится сравнение.

На рис. 6 представлен конечный результат работы алгоритма. Видно, что  $S1(\tau_x, \tau_y)$  и  $S(\tau_x, \tau_y)$  совпадают, следовательно,  $TG1(x, y)$  и  $TG(x, y)$  также должны совпадать.

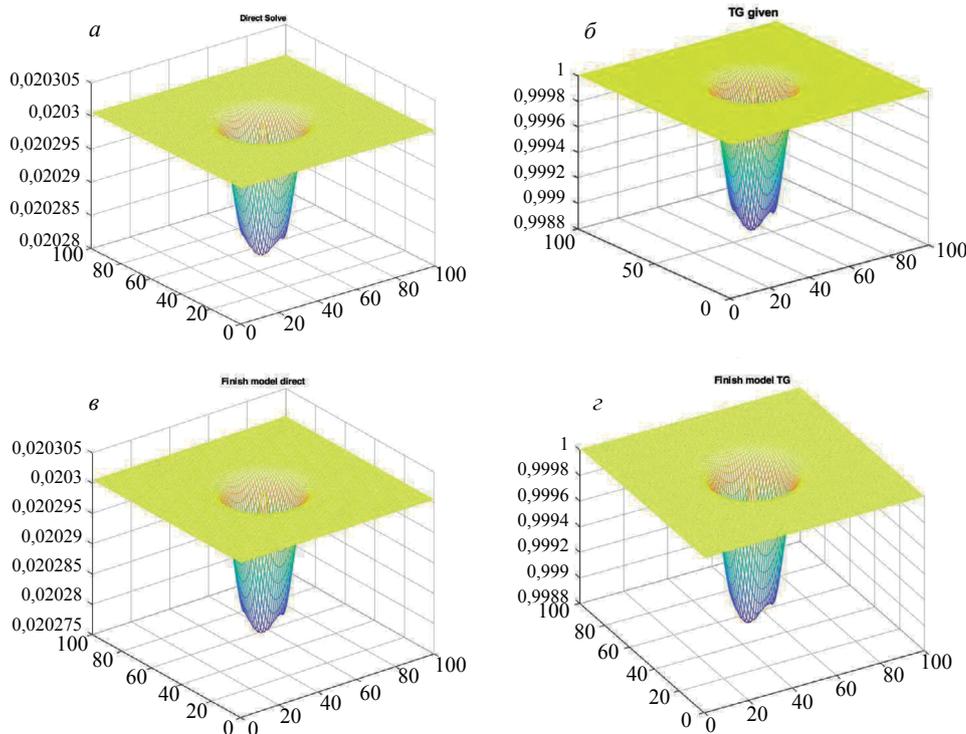


Рис. 6. Решение прямой задачи от заданной поверхности  $S(\tau_x, \tau_y)$  (а); дифференциал от заданной поверхности  $TG(x, y)$  (б); решение обратной задачи в результате работы алгоритма  $S1(\tau_x, \tau_y)$  (в); дифференциал, от которого образован конечный результат  $TG1(x, y)$  (г).

## НАХОЖДЕНИЕ НАЧАЛЬНОЙ МОДЕЛЬНОЙ ПОВЕРХНОСТИ

Далее необходимо получить непосредственно решение обратной задачи в виде модельной поверхности  $z_1(x, y)$ . Ввиду отсутствия аналитического решения для  $z_1(x, y)$  будем считать, что данная задача является некорректной по Адамару, так как решение задачи не непрерывно зависит от исходных данных. Для решения необходимо ввести условную корректность задачи. Так, если предполагается, что распределение  $TG_1(x, y)$  представляет собой симметричную функцию, то частные производные выражения (12) равны:

$$TG(x, y) = \left[ 1 + 2 \left[ \frac{\partial z(x, y)}{\partial x} \right]^2 \right]^{-1/6}. \quad (15)$$

Сделав преобразование, получим:

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} = \pm \sqrt{\frac{TG(x, y)^{-6} - 1}{2}}. \quad (16)$$

Восстановление  $z_1(x, y)$  проводили с помощью численного интегрирования. На рис. 7—9 приведены результаты сравнения заданных поверхностей с численным решением обратной задачи, полученным в результате работы алгоритма на нескольких итерациях для разных типов поверхностей. Корреляция между заданной поверхностью и поверхностью, полученной в результате восстановления, определялась нахождением критерия Колмогорова—Смирнова, который менялся в зависимости от итерации. Минимальное значение составило: для полусферы  $D_n = 0,0908$ ; для распределения Гаусса  $D_n = 0,094$ ; для цилиндра  $D_n = 1$ .

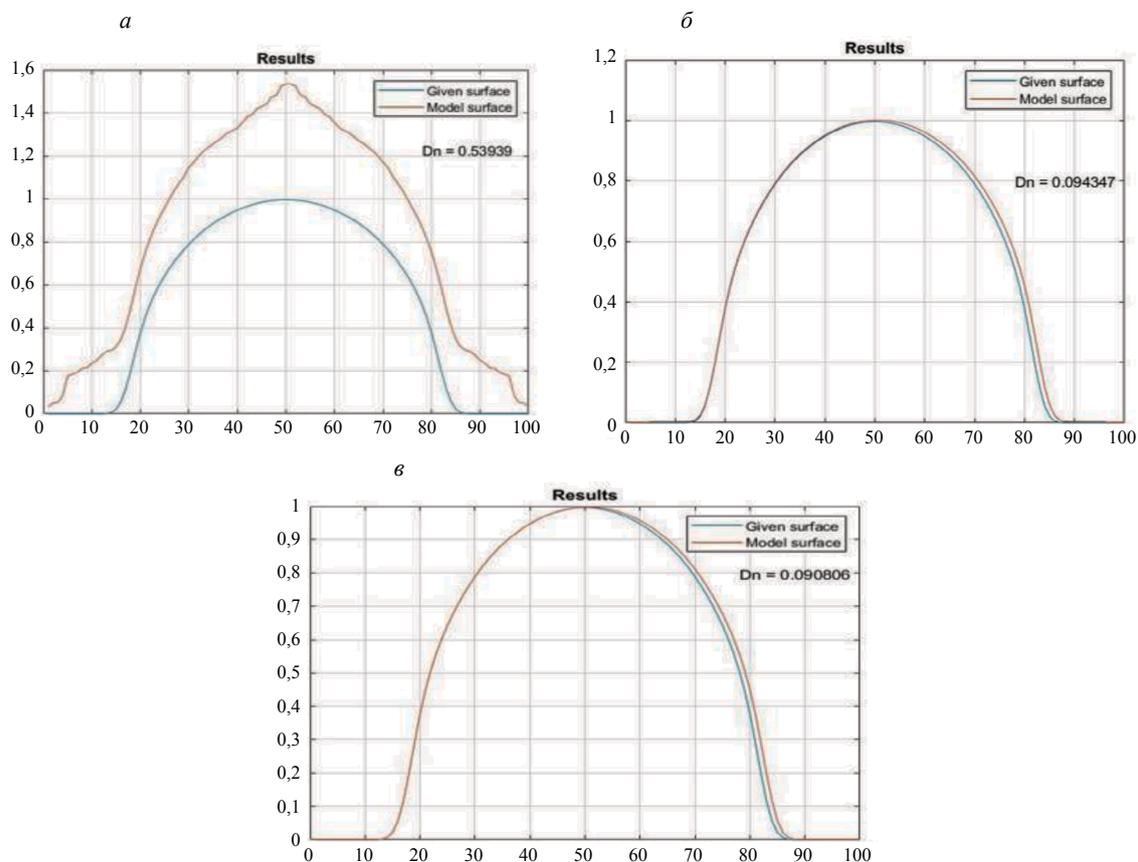


Рис. 7. Результаты восстановления поверхности в виде полусферы: первая итерация (а); вторая итерация (б); третья итерация (в). Наименьший  $D_n = 0,09$  — третья итерация.

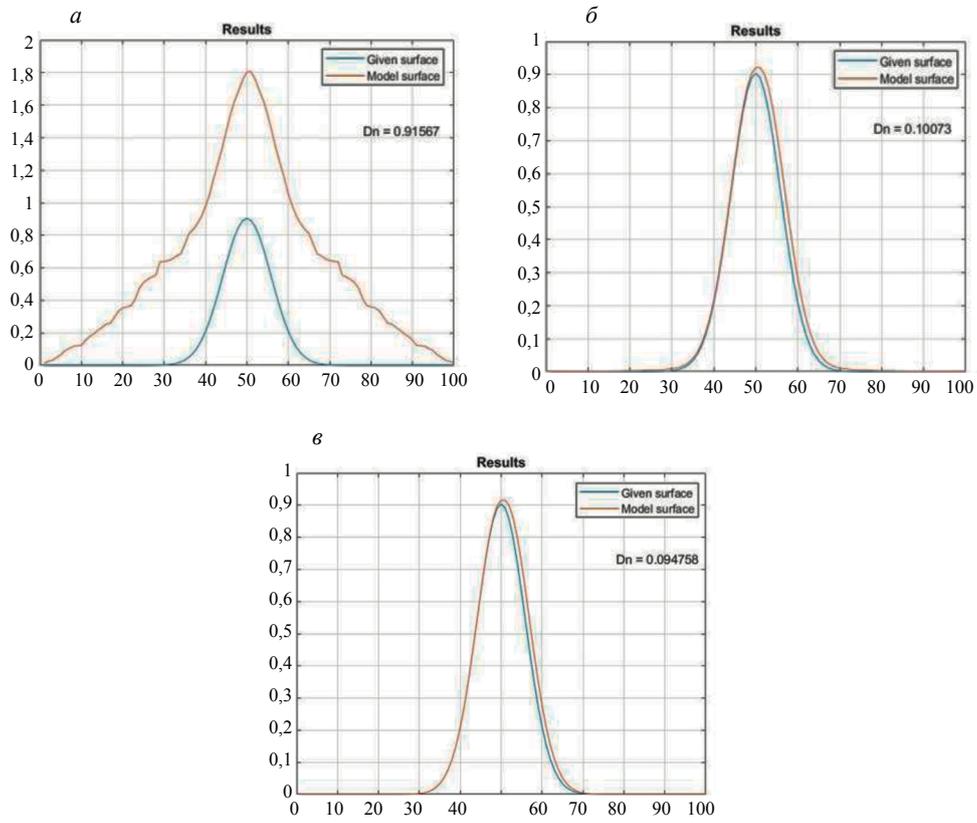


Рис. 8. Результаты восстановления распределения Гаусса: первая итерация (а); вторая итерация (б); третья итерация (в). Наименьший  $Dn = 0,09$  — третья итерация.

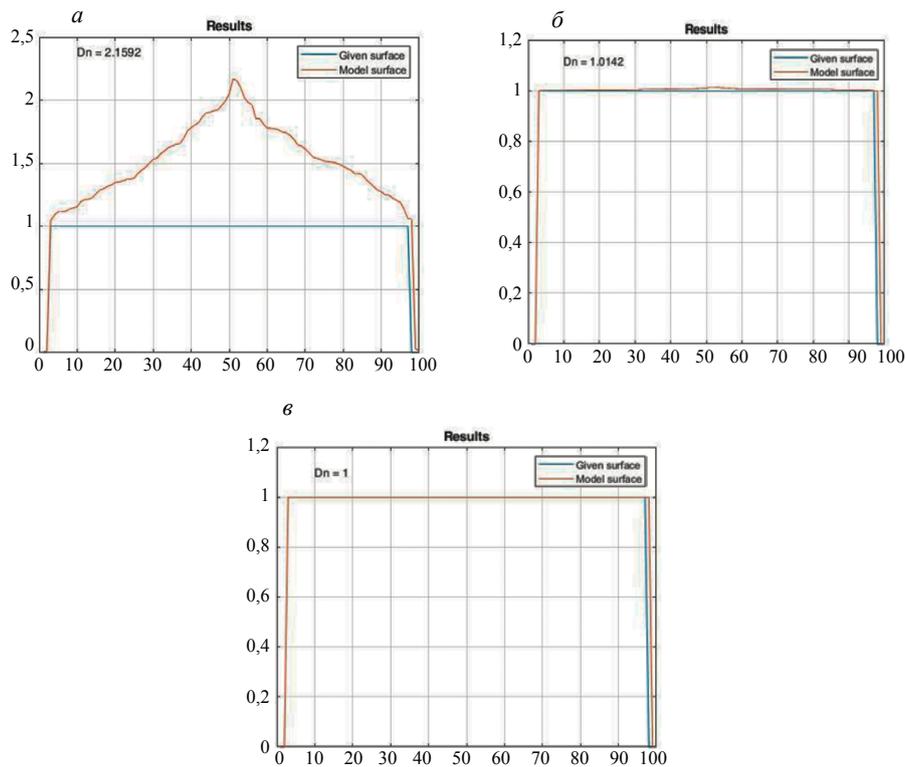


Рис. 9. Результаты восстановления поверхности в виде цилиндра: первая итерация (а); вторая итерация (б); третья итерация (в). Наименьший  $Dn = 1,00$  — третья итерация.

Коэффициенты Колмогорова—Смирнова на разных итерациях

Вид поверхности	Коэффициент Колмогорова—Смирнова		
	Итерация 1	Итерация 2	Итерация 3
Полусфера	0,539	0,093	0,090
Гаусс	0,915	0,100	0,094
Цилиндр	2,159	1,014	1,000

Рассчитанные коэффициенты Колмогорова—Смирнова для разных поверхностей на всех итерациях представлены в табл. 1.

## ВЫВОДЫ

Разработан алгоритм решения обратной задачи восстановления поверхности мишени, бомбардируемой электронами на основе анализа распределения возникающего тормозного рентгеновского излучения. Используется осцилляция электронного луча, каждому положению которого относительно поверхности мишени сопоставляется значение сигнала возникшего рентгеновского излучения. Далее решается обратная задача на основе итерационного алгоритма. Численная реализация осуществлена на примере восстановления трех типов симметричных объектов: гауссова поверхность, полусфера, цилиндр. Сравнение показало хорошее соответствие восстановленных поверхностей с заданными. Полученные результаты могут использоваться для разработки систем оперативного контроля за процессом электронно-лучевой наплавки по известному распределению тормозного рентгеновского излучения, полученному из технологической зоны.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований совместно с Пермским краем (проект № 20-48-596006 р\_НОЦ\_Пермский край) и Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» в рамках выполнения государственного задания «Разработка научно-технологических основ формирования системы материал-конструкция со специальными свойствами на основе гибридных аддитивных технологий»-FSNM-2021-0011.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Браверман В.Я. Анализ зависимости вторично-эмиссионного тока и рентгеновского излучения от положения луча относительно стыка при электронно-лучевой сварке // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2016. Т. 18. № 2, 3. С. 853—857.
2. Купер Э.А., Логачев П.В., Репков В.В., Селиванов А.Н., Селиванов П.А., Семенов Ю.И., Трибендис А.Г., Федотов М.Г., Чертовских А.С. Автоматизированная система для задания координат шва в установках электронно-лучевой сварки // Автотметрия. 2015. Т. 51. № 1. С. 55—61.
3. Varushkin S.V., Belenkiy V.Y., Trushnikov D.N. Researching signals from workpiece backside during electron beam welding in full penetration mode // Key Engineering Materials. 2017. № 743 KEM. С. 231—235.
4. Браверман В.Я., Белоzerцев В.С., Успенский А.Н. Экспериментальные исследования рентгеновского излучения при электронно-лучевой сварке // Вестник Сибирского аэрокосмического университета имени академика М.Ф. Решетнева. 2005. № 2. С. 196—200.
5. Браверман В.Я. Тормозное рентгеновское излучение при электронно-лучевой сварке и его взаимосвязь с параметрами процесса // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2008. № 3 (20). С. 117—121.
6. Трушников Д.Н., Беленький В.Я., Кротова Е.Л., Пермяков Г.Л., Мусихин Н.А., Ольшанская Т.В., Саломатова Е.С., Колева Е.Г. Пат. № 2580266 Российская Федерация, МПК В23К 15/02. Устройство для определения распределения плотности энергии и контроля фокусировки электронного пучка / № 2015100016/02; заявл. 12.01.2015; опубл. 10.04.2016. Бюл. № 10. 13 с.
7. Терещенко С.А. Методы вычислительной томографии. М.: Физматлит, 2004. 320 с.
8. Sliva A.P., Kharitonov I., Goncharov A., Dragunov V., Gudenko A., Terentyev E. Investigation of the characteristics of ion saturation current in plasma over the keyhole in the process of electron beam welding // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. 2077. 012019.
9. Trushnikov D.N. Wire position sensor for controlling the process of electron beam layer-by-layer deposition: Modeling and Verification // IEEE. 2020. С. 3134—3142.

10. *Shcherbakov A.V., Gaponova D.A., Rodyakina R.V.* Control of Weld Bead Position in Additive Manufacturing Process with Using Backscattered Electrons Collector Signal // Russian Internet Journal of Industrial Engineering. 2020. V. 7.2. P. 3—8.
11. *Wong H., Neary D., Jones E., Fox P., Sutcliffe C.* Pilot capability evaluation of a feedback electronic imaging system prototype for in-process monitoring in electron beam additive manufacturing // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2019. Jan. V. 100 (1). P. 707—20.
12. *Трушников Д.Н., Кротов Л.Н., Кротова Е.Л., Мусихин Н.А.* Реконструкция формы канала проплавления при электронно-лучевой сварке по параметрам проникающего рентгеновского излучения // Дефектоскопия. 2016. № 10. С. 34—41.
13. *Рыкалин Н.Н., Зуев И.В., Углов А.А.* Основы электронно-лучевой обработки материалов. М.: Машиностроение, 1978. 239 с.
14. *Блохина М.А.* Рентгеновские лучи / Пер. с нем. и англ. М.: Изд-во иностр. лит., 1960.
15. *Лаптенко В.Д., Мурыгин А.В., Серегин Ю.Н., Браверман В.Я.* Управление электронно-лучевой сваркой. Красноярск: Сиб. аэрокосмич. акад., 2000. 234 с. ISBN 5-86433-121-X.
16. *Krotova E.L., Varushkin S.V., Trushnikov D.N.* Dependence of Signal from Continuous X-ray Sensor on Values of Technological Parameters in Hybrid Additive Process of Electron Beam Surfacing by Wire // Russian Journal of Nondestructive Testing. 2022. V. 58. No. 7. P. 574—582. [*Кротова Е.Л., Варушкин С.В., Мусихин Н.А., Рожков К.А., Трушников Д.Н.* Зависимость сигнала с датчика тормозного рентгеновского излучения от значений технологических параметров в гибридном аддитивном процессе электронно-лучевой проволочной наплавки // Дефектоскопия. 2022. № 7. С. 29—38.]
17. *Gordon R., Bender R., Herman G.T.* Algebraic reconstruction techniques (ART) for three-dimensional electron microscopy and X-ray photography // J. Theoretical Biology. 1970. V. 29. P. 471—481.
18. *Волков Е.А.* Численные методы / Под ред. Викторенковой И.В. 2-е изд., испр. М.: Наука. Гл. ред. Физ-мат. Лит., 1987. 248 с.
19. *Васильев А.А.* Критерии селекции моделей прогноза (обзор) // Вестник ТвГУ. 2012. Сер.: Экономика и управление. Вып. 13. С. 133—148.