

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЦЕССА СУШКИ ЗЕРНА ПРИ КОНТАКТНОМ ПОДВОДЕ ТЕПЛОТЫ

Сутягин Сергей Алексеевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Агеев Пётр Сергеевич, аспирант кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Курдюмов Владимир Иванович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Павлушин Андрей Александрович, доктор технических наук, профессор кафедры «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности»

Исаев Юрий Михайлович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Математика и физика»

ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ

432017, г. Ульяновск, бульвар Новый Венец, дом 1; тел.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Ключевые слова: сушка, зерно, транспортирующий рабочий орган, контактный нагрев, длина спирали, греющая поверхность.

Рассмотрен вопрос повышения эффективности сушки зерна в контактных зерносушилках. Результат достигается путём применения транспортирующего рабочего органа, выполненного в форме спирали Архимеда. Благодаря запатентованным конструктивным особенностям достигается более качественное распределение зерна единичным слоем по греющей поверхности, что, в свою очередь, обеспечивает эффективный, равномерный нагрев обрабатываемого продукта. Теоретически обосновано, что выполнение транспортирующего рабочего органа в виде Архимедовой спирали позволяет обеспечить качественный прогрев зерна в строго заданном временном интервале. Это объясняется тем, что при вращении спирали каждая зерновка будет двигаться по греющей поверхности от ее периферии к центру, имея равную длину пути. Данное явление определяет одинаковое время прохождения заданной траектории каждой зерновкой и обеспечивает их равномерный нагрев вследствие многократного оборота вокруг своих осей при движении. Таким образом достигаются требуемые показатели качества контактной сушки зерна. Проверка теоретических предпосылок была проведена на созданной физической модели. При этом разработанная экспериментальная модель позволяет проводить научные исследования по определению характеристик процесса сушки зерна, применяя различные вариации следующих технологических параметров: температура нагрева контактной поверхности, скорости движения зерна (время нахождения зерна в сушильной камере). Выявленные результаты подтвердили высокую эффективность разработанного средства механизации для контактной сушки зерна с ТРО, выполненного в виде спирали Архимеда. При средней температуре 75 °С и частоте вращения транспортирующего рабочего органа 87 мин⁻¹ затраты теплоты на испарение из зерна влаги составляют 4,5 МДж/кг, что значительно меньше, чем у используемых в настоящее время в аграрном секторе установок, выпускаемых промышленностью.

«Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и Ульяновской области в рамках научного проекта № 18-48-730039»

Введение

Сушка зерна - сложный и ответственный технологический процесс. При его реализации важно обеспечить сохранность качественных показателей зерновой массы. Технические характеристики используемого оборудования для сушки зерна во многом определяют конечное качество продукта. В последнее время актуальными направлениями развития аграрного производства становятся селекция и возделывание зерновых культур на семена, поэтому параллельно появляется необходимость в разработке и внедрении соответствующих средств механи-

зации, способных качественно обеспечить выполнение всех требований к технологическому процессу тепловой обработки семян.

Сохранить семенные свойства зерна при его послеуборочной сушке возможно, используя специализированные конструкции зерносушильной техники [1 - 4], которые обеспечат равномерный нагрев каждого отдельного зерна с отсутствием локальных перегревов обрабатываемого продукта сверх критической температуры.

Существующие зерносушильные комплексы, в основном, спроектированы для обработки

продовольственного зерна. Использование существующих зерносушилок для сушки семенного зерна, с учетом применения более бережных режимов работы, требует внесения в сушилки значительных конструктивных изменений, а также сложной перенастройки технологических параметров процесса тепловой обработки. При этом даже реализация указанных трудоёмких этапов модернизации зерносушилок зачастую не приводит к требуемой цели: равномерность нагрева зернового слоя не обеспечивается, происходят локальные перегревы обрабатываемого продукта - всё это существенно снижает качество обработки семенного зерна.

Таким образом, разработка и внедрение зерносушилок, обеспечивающих высокое качество теплового воздействия на зерно, в том числе семенного назначения, является актуальной и важной научной задачей.

Объекты и методы исследований

Для решения указанной задачи на кафедре «Агротехнологии, машины и безопасность жизнедеятельности» ФГБОУ ВО Ульяновский ГАУ на протяжении многих лет выполняются научные исследования. Результатом проводимых научно-исследовательских работ стало изобретение перспективного способа сушки зерна и реализация данного способа в различных технических устройствах [5, 6].

Так, одним из перспективных конструктивных решений является использование в качестве транспортирующего рабочего органа (ТРО) спирального винта [7 - 11].

Следует отметить, что спиральные линии и поверхности имеют большое применение в различных отраслях техники. Спиральные и спирально-винтовые транспортеры широко применяются в металлообработке и деревообработке, кроме того, гребные и воздушные винты также содержат элементы спиральных и винтовых линий.

Применяемую в разработанном техническом устройстве для сушки зерна Архимедову спираль можно визуализировать как путь, который совершает некоторая точка. Причём, рассматриваемая точка движется по лучу, совершающему вращательные движения относительно полюса O . При этом линейная и угловая скорости этой точки есть величины постоянные – $u = const$; $\omega = const$

Уравнение движения точки в полярной системе координат имеет следующий вид:

$$r = a\varphi;$$

где $a = v/\omega$; – линейная скорость движения

точки, м/с; ω – угловая скорость движения точки, рад/с; φ – угол между полярной осью и текущим положением точки, рад. Угол φ положителен в направлении, противоположном направлению движения часовой стрелки.

При этом длина спирали зависит от ее шага и внешнего радиуса r :

$$l = \int_0^{2\pi} \sqrt{r^2 + \left(\frac{dr}{d\varphi}\right)^2} d\varphi = \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2\varphi^2 + a^2} d\varphi = a \int_0^{2\pi} \sqrt{1 + \varphi^2} d\varphi = \frac{1}{2} a \left[\varphi\sqrt{1 + \varphi^2} + \ln(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2}) \right]_0^{2\pi} = \frac{a}{2} \left[2\pi\sqrt{1 + 4\pi^2} + \ln(2\pi + \sqrt{1 + 4\pi^2}) \right].$$

Или

$$l = \frac{a}{2} \left[\varphi\sqrt{\varphi^2 + 1} + \ln(\varphi + \sqrt{\varphi^2 + 1}) \right]. \quad (1)$$

Полученное выражение (1) характеризует зависимость длины спирали от угла φ . Так как на одном конкретном диске определенного радиуса можно разместить различное число витков спирали i , то, задаваясь различными значениями угла ($\varphi = 2\pi$ при $i = 1$, $\varphi = 4\pi$ при $i = 2$ и т.д.), можно определить соответствующую длину спирали L (рис. 1).

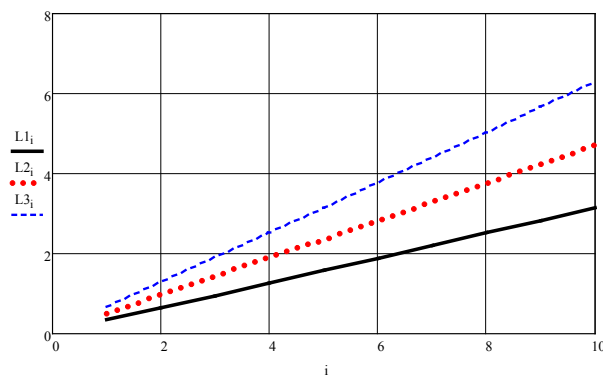


Рис. 1 – Зависимость длины спирали L , м от количества витков i , шт. при различных радиусах греющей поверхности: L_{1i} при $r = 0,1$ м; L_{2i} при $r = 0,15$ м; L_{3i} при $r = 0,2$ м

Из полученного графика следует, что, используя в качестве ТРО спираль Архимеда, мы можем достичь при значительно меньших габаритах устройства сравнительно большую рабочую длину спирали. Так, при диаметре греющей поверхности 0,3 м, применяя спираль с числом витков $i = 6$, получаем общую длину пути, по которому будет двигаться обрабатываемое зерно, 2,837 м. Это на 11,9 % превышает соответствующую



Рис. 2 – Транспортирующий рабочий орган контактной зерносушилки



Рис. 3 – Физическая экспериментальная модель установки для лабораторных исследований процесса сушки зерна

щий параметр исследованных ранее устройств для тепловой обработки зерна УТОЗ 2 и УТОЗ 3, в которых использовался транспортирующий рабочий орган, выполненный в виде шнека [5]. Следовательно, применяя установку для сушки зерна контактного типа с ТРО в виде расположенной на греющем диске спирали Архимеда, можно достичь лучших энергетических показателей при значительно меньших массо-размерных параметрах.

Поисковые эксперименты подтвердили

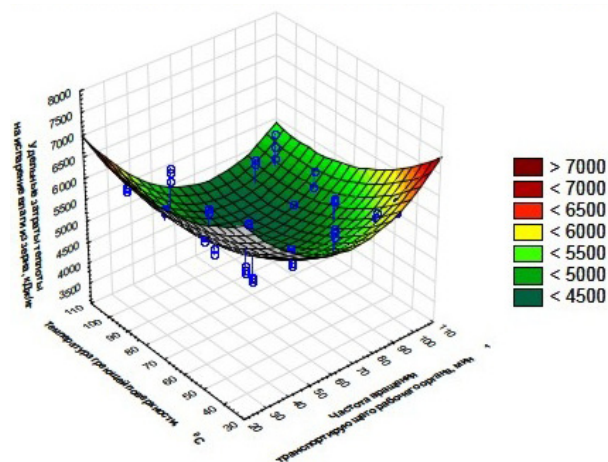


Рис. 4 – Трёхмерный график, визуализирующий интегральное действие на удельные затраты энергии скорости движения зерна и средней температуры контактной поверхности

изложенные выше теоретические предпосылки. В частности, было выявлено, что выполнение ТРО в виде Архимедовой спирали позволяет обеспечить качественный прогрев зерна в строго заданном временном интервале. Данное явление можно объяснить тем, что при вращении спирали каждая зерновка будет двигаться по греющей поверхности от ее периферии к центру, имея равную длину пути (рис. 2). Это определяет одинаковое время прохождения заданной траектории каждой зерновкой и обеспечивает их равномерный нагрев вследствие многократного оборота вокруг своих осей при движении. Таким образом достигаются требуемые показатели качества контактной сушки зерна [12, 13].

Для подтверждения рабочих гипотез и выявления оптимальных режимных параметров созданного средства механизации нами был проведен лабораторный многофакторный эксперимент. В качестве оптимизационного критерия были приняты суммарные затраты энергии, которые необходимы на весь процесс тепловой сушки зерна (нагрев зерна, удаление из него влаги, удаление парообразной влаги из зоны сушки, привод ТРО).

Результаты исследований

Разработанная экспериментальная физическая модель установки со спиральным ТРО для сушки зерна, в которой реализован запатентованный контактный способ подвода тепловой энергии к обрабатываемому продукту, приведена на рис. 3.

На созданной физической модели можно проводить научные исследования по определению характеристик процесса сушки зерна при различных вариациях следующих технологиче-

ских параметров: температура нагрева кантатной поверхности, скорости движения зерна (время нахождения зерна в сушильной камере). Для определения и фиксации текущих значений контролируемых параметров нами были применены специализированные измерительные комплексы, которые прошли предварительную поверку.

В качестве объекта сушки были выбраны семена рыжика сорта «Пензяк» селекции Пензенского НИИСХ.

После обработки данных, полученных по итогам проведенных исследований процесса тепловой сушки семян рыжика в разработанном устройстве, была получена следующая математическая модель процесса:

$$q = 10413,64 - 89,42n - 59,063t + 0,681n^2 - 0,152nt + 0,41t^2,$$

где q – суммарные удельные затраты энергии на испарение влаги, кДж/кг; n – частота вращения ТРО, мин⁻¹; t – температура контактной поверхности сушилки, °С.

Корреляционное отношение для полученной регрессионной зависимости составило 0,868.

Визуализация влияния независимых факторов на оптимизационный критерий приведена на рис. 4.

После обработки полученных результатов эксперимента были выявлены оптимальные значения независимых факторов процесса контактной сушки в предложенной установке: средняя температура греющей поверхности $t_{\text{н опт}} = 75$ °С, частота вращения ТРО – 87 мин⁻¹, суммарные затраты энергии на нагрев зерна и удаления испарившейся влаги из зоны сушки составили 4,5 МДж/кг.

Пропускная способность разработанного средства механизации при указанных режимах (рис. 5) составила 60 кг/ч, что вполне достаточно для сушки мелких семян.

Из рисунка 5 следует, что при необходимости пропускную способность предложенной установки можно без заметного снижения качественных показателей довести до 100 кг/ч. Лабораторные анализы показали, что снижение всхожести семян на всех режимах контактной

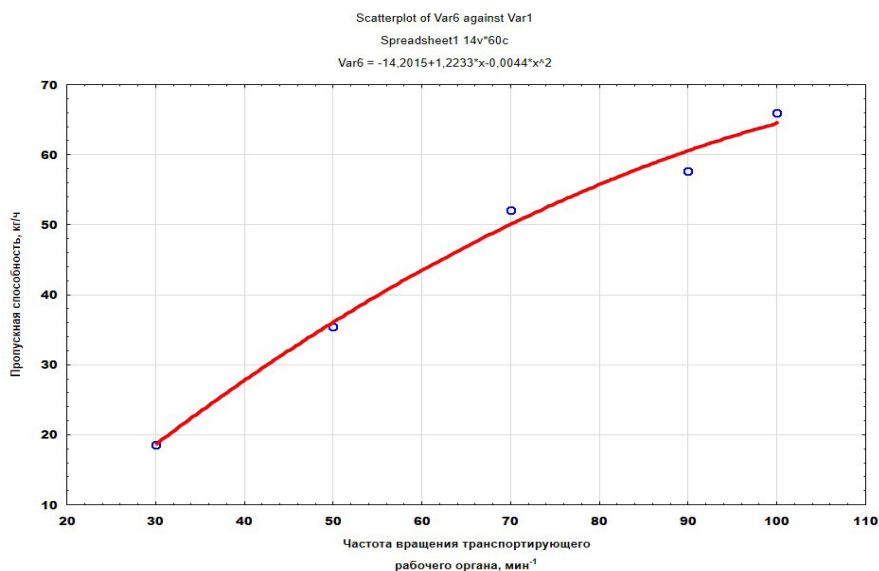


Рис. 5 – Зависимость пропускной способности установки от режима работы ТРО

тепловой обработки в предложенной установке не превышает 2 % [14]. Это полностью соответствует требованиям действующего ГОСТа [15].

Выводы

Указанные выше результаты подтверждают высокую эффективность разработанного средства механизации для контактной сушки зерна с ТРО, выполненного в виде спирали Архимеда. При средней температуре 75 °С и частоте вращения ТРО 87 мин⁻¹ суммарные затраты энергии на нагрев зерна и удаления испарившейся влаги из зоны сушки составляют 4,5 МДж/кг, что значительно меньше, чем у используемых в настоящее время в аграрном секторе установок, выпускаемых промышленностью.

Библиографический список

1. Трисвятский, Л.А. Технология приема, обработки, хранения зерна и продуктов его переработки / Л.А. Трисвятский, Б.Е. Мельник. - М.: Колос, 1983. – 351 с.
2. Некрашевич, В.Ф. Установка для микронизации зерна / В.Ф. Некрашевич, С.В. Корнилов, Н.Г. Кипарисов, Р.А. Мамонов // Сборник трудов Международной научно - практической конференции «Инновационные технологии и средства механизации в растениеводстве и животноводстве». - Рязань: РГАТУ им. П.А. Костычева, 2011. – С. 155-159.
3. Баум, А.Е. Сушка зерна / А.Е. Баум, В.А. Резчиков. - М.: Колос, 1983. – 223 с.
4. Allen I.R. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. - J. Agr. Engng Res., 2005. - v. 5, - № 4, PP. 69-72.

5. Пат. 96639 Российская Федерация, МПК F26B 3/00. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, И.А. Постников; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА. – № 2010106454/22; заявл. 24.02.10; опубл. 10.08.10, Бюл. № 22. (1 стр.).

6. Пат. 167410 Российская Федерация, МПК A23B 9/08. Устройство для сушки зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко; С.А. Сутягин; П.С. Агеев; В.И. Долгов; патентообладатель ФГОУ ВО Ульяновская ГСХА им. П.А. Столыпина. – № 2016130462; заявл 25.07. 16; опубл. 10.01.17, Бюл. № 1. (1 стр.).

7. Курдюмов, В.И. Теоретические аспекты распределения теплоты в установке контактного типа при сушке зерна / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, С.А. Сутягин // Инновации в сельском хозяйстве. - 2015. – № 2 (12). - С.159-161.

8. Результаты контактной сушки зерна различных культур при тонкослойном перемещении высушиваемого материала / В.И. Курдюмов, А.А. Павлушин, Г.В. Карпенко, М.А. Карпенко // Вестник Алтайского государственного аграрного университета. - 2013. – № 10 (108). - С.106-110.

9. Голубкович, А.В. Сушка высоковлажных семян и зерна / А.В. Голубкович, А.Г. Чижиков. – М.: Агропромиздат, 1991. – 174 с.

10. Курочкин, А.А. Оборудование и авто-

матизация перерабатывающих производств / А.А. Курочкин, Г.В. Шабурова, А.С. Гордеев. – М.: КолосС, 2007. – 560 с.

11. Vargas, W.L. Heat conduction in granular materials / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // AIChE Journal. – 2001. – № 47. - P. 1052-1059.

12. Yadollahinia, A.R. Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // Int. J. Agri. Biol. - 2008. - № 10. - P. 61-65.

13. Wang, L.J. Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology / L.J. Wang, D.W. Sun // Trends in Food Science Technology. – 2001. – № 12. - P. 174-184.

14. Рудобашта, С.П. Энциклопедия «Машиностроение» / С.П. Рудобашта / Раздел IV. Расчет и конструирование машин. Т. 12 «Машины и аппараты химических производств». Раздел 5. Машины и аппараты для массообменных процессов (с. 468-482, 486-487, 504-510). - М.: Машиностроение, 2004. – 832 с.

15. ГОСТ Р 52325-2005. Национальный стандарт Российской Федерации. Семена сельскохозяйственных растений. Сортовые и посевные качества. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2005. – 19 с.

IMPROVEMENT OF THE EFFICIENCY OF DRYING PROCESS OF GRAIN DURING CONTACT HEAT SUPPLY

Sutyagin S. A., Ageev P. S., Kurdyumov V. I., Pavlushin A. A., Isayev Y.M.
FSBEI HE Ulyanovsk State Agrarian University

432017, Ulyanovsk, Novy Venets boulevard, building 1; tel.: 89050359200; e-mail: andrejpavlu@yandex.ru.

Key words: drying, grain, transporting working tool, contact heat, helix length, warming surface.

The question of improvement of the efficiency of drying process of grain in contact grain drier is considered. The result is achieved by using of transporting working tool in the shape of Archimedes helix. As a result of patent constructional features more qualitative spreading of grains by unit fibers onto heating surface supply with the effective, uniform heating of cultivated product. Theory-based, that fulfillment of transporting working tool in the shape of Archimedes helix allows to supply qualitative grain heating in strictly fixed time duration. It is explained that during helix rotation each bruchid will move on the heating surface from periphery to the centre, having the same way length. This phenomenon determines the same time of transmission of given trajectory of each bruchid and supply them with uniform heating as the result of multiple rotation around its radial axis during the action. Through this process target figures of quality of contact drying of grains are achieved. Control of theoretical suppositions is carried on created physical model. In this case developed experimental model allows to conduct research in determination of characteristics of drying grain process using different characteristics of determination of different variations of the following technological parameters: temperature of cantata surface. speed of grain movement, residence time in dryer camera). Findings confirm high effectiveness of developed mechanic means for contact grain drying with SRW, made in the shape of Archimedes helix. At average temperature of 75 °C and rate speed of SRW 87 min⁻¹ outgoings of heat on exhalation of moistness from grains are 4,5 mJ/kg, it is much less than commercial units used at present time in agricultural sector.

Bibliography

- 1. Trisvyatsky, L.A. Technology of receiving, processing, storage of grain and its products / L.A. Trisvyatsky, B.E. Melnik. - M.: Kolos, 1983. - 351 p.*
- 2. Nekrashevich, V. F. Installation for grain micronization / V. F. Nekrashevich, S. V. Kornilov, N. G. Kiparisov, R. A. Mamonov // Proceedings of the International scientific - practical conference "Innovative technologies and means of mechanization in crop and livestock", - Ryazan: RGATU. P. A. Kostycheva, - 2011. – P. 155-159.*
- 3. Baum, A.E. Drying grain / A.E. Baum, V.A. Rezchikov. - M.: Kolos, 1983. - 223 p.*
- 4. Allen I.R. Application of grain drying theory to the drying of maize and rice. - J. Agr. Engng Res., 2005. - v. 5, - № 4, pp. 69-72.*
- 5. Pat. 96639 Russian Federation, IPC F26B 3/00. A device for drying grain / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, I.A. Postnikov; Applicant and patent holder Ulyanovsk State Agricultural Academy, Federal State Educational Institution of Higher Education. - Application No. 2010106454/22 dated 24.02.2010; publ. 10.08.10, Bul. No. 22*
- 6. Pat. 167410 Russian Federation IPC A23B 9/08. A device for drying grain / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko, S.A. Sutyagin, P.S. Ageev, V.I. Dolgov patent owner FSBEI HE Ulyanovsk State Agricultural Academy*
- 7. Kurdyumov, V. I. Theoretical aspects of heat distribution in a contact-type installation during grain drying / V. I. Kurdyumov, A. A. Pavlushin, S. A. Sutyagin // Innovations in agriculture. - 2015. – № 2 (12). - P. 159-161.*
- 8. Results of contact drying of grain of different crops by thin layer movement of material being dried / V.I. Kurdyumov, A.A. Pavlushin, G.V. Karpenko, M.A. Karpenko // Bulletin of Altai State agricultural university. - 2013. – № 10 (108). - P.106-110.*
- 9. Golubkovich, A. V. Drying high moisture seed and grain / A. V. Golubovich, A. G. Chizhikov. - M.: Agropromizdat, 1991. – 174 p.*

10. Kurochkin, A. A. *Equipment and automation of processing industries* / A. A. Kurochkin, G. V. Shaburova, A. S. Gordeev. – M.: Koloss, 2007. – 560 p/
11. Vargas, W.L. *Heat conduction in granular materials* / W.L. Vargas, J.J. McCarthy // *AIChE Journal*. – 2001. – № 47. - P. 1052-1059.
12. Yadollahinia, A.R. *Design and fabrication of experimental dryer for studying agricultural products* / A.R. Yadollahinia, M. Omid, S. Rafie // *Int. J. Agri. Biol.* - 2008. - № 10. - P. 61-65.
13. Wang, L.J. *Rapid cooling of porous and moisture foods by using vacuum cooling technology* / L.J. Wang, D.W. Sun // *Trends in Food Science Technology*. – 2001. – № 12. - P. 174-184.
14. Rudobashta, S. P. *Encyclopedia "Mechanical engineering"* / S.P. Rudobashta / Section IV. *Calculation and design of machines*. Vol. 12 "Machines and apparatus of chemical production". Section 5. *Machines and apparatus for mass transfer processes* (pp. 468-482, 486-487, 504-510). - Moscow: Mashinostroenie, 2004. 832 p.
15. *State Standart R 52325-2005. National standard of the Russian Federation. Seeds of agricultural plants. Varietal and sowing qualities. General specifications*. - Moscow: STANDARTINFORM, 2005. – 19 p.