

# ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ УПАКОВОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

---

УДК 655.3

**Н. С. Голуб**

Белорусский государственный технологический университет

## **ПРОГНОЗИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ УПАКОВОЧНОГО ОБОРУДОВАНИЯ НА ЭТАПАХ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА**

Выполнено исследование влияния срока эксплуатации оборудования на комплексные показатели надежности и производительности. Представлены графические материалы изменения комплексных показателей надежности и относительной производительности во времени.

В работе рассматривалось полное время эксплуатации оборудования, так как для решения задачи оценки характеристик надежности в первую очередь может быть использована информация, получаемая на этапе реальной эксплуатации оборудования. Проведенный анализ основных и наиболее часто используемых в теории надежности моделей безотказной работы оборудования показывает, что ни одна из них не описывает все периоды его эксплуатации. Поэтому актуальной является задача построения модели безотказности, описывающей полное эксплуатационное время работы оборудования. Для целей построения данной функции в работе предложено использовать функцию жизненного цикла эксплуатации оборудования (ЖЦЭО).

К комплексным показателям надежности относятся коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент общего использования. Основные комплексные показатели надежности позволяют оценить влияние различных факторов на производительность технической системы.

Различают следующие виды производительности: номинальную, фактическую собственную, фактическую техническую и среднюю фактическую. Более детально влияние потерь времени отражает относительная производительность.

**Ключевые слова:** надежность, комплексные показатели надежности, производительность оборудования, относительная производительность.

**N. S. Golub**

Belarusian State Technological University

## **PREDICTION OF PACKAGING EQUIPMENT RELIABILITY AND PERFORMANCE LIFE-CYCLE STAGES**

The article investigates equipment service life concerning versatility indicator of performance and reliability index. The paper present diagrams of changes in versatility indicator of reliability and relative performance in time.

The paper deals with a full time of the equipment service life as primarily the information obtained at the stage of real equipment service life can be used for solving the problem of estimating the reliability characteristics. The analysis of the basic and most frequently used in the theory of reliability models safe operation of the equipment shows that none of them does not cover all periods of operation. Therefore, the actual task of constructing a safe operation model describing the complete operating time of the equipment. For the purposes of this function in the work we proposed to use the life-cycle of equipment operation (LCESL).

Versatility indicators of reliability include availability factor, operating efficiency, the ratio of general use. The main versatility indicator of reliability allow us to estimate the impact of various factors on the performance of the technical system.

There are the following types of performance such as nominal productivity, the factual own, actual technical and actual average. In detail, the influence of time loss of time reflects the relative performance ratio.

**Key words:** reliability, complete reliability, productivity of equipment, relative performance.

**Введение.** Полное время эксплуатации оборудования, как правило, разбивается на 3 периода: 1) приработки и опытной эксплуатации; 2) нор-

мальной эксплуатации в соответствии с требованиями нормативной документации; 3) физического старения — период, характеризующийся ростом

интенсивности отказов, проявлением накопления различных дефектов вследствие старения элементов оборудования. Количественный анализ информации об отказах дает возможность выявлять закономерности формирования отказов и на этой основе разрабатывать меры по устранению их причин.

Для решения задачи оценки характеристик надежности в первую очередь может быть использована информация, получаемая на этапе реальной эксплуатации оборудования. Негативной стороной эксплуатационных наблюдений является малый объем статистических данных.

Надежность оборудования отражают ее основные показатели, которые принято называть комплексными показателями надежности. Основные комплексные показатели надежности позволяют оценить влияние различных факторов на производительность технической системы. Надежность же в свою очередь влияет на производительность оборудования и при частых простоях значительно снижает ее.

К комплексным показателям надежности относятся коэффициент готовности, коэффициент технического использования, коэффициент общего использования [1].

В статье рассматривается влияние срока эксплуатации оборудования на производительность системы. Для рассмотрения взяты годы с момента установки оборудования на предприятии до теоретической стадии выведения оборудования из эксплуатации.

**Основная часть.** Проведенный анализ основных и наиболее часто используемых в теории надежности моделей безотказной работы оборудования показывает, что ни одна из них не описывает все периоды его эксплуатации. Поэтому актуальной является задача построения модели безотказности, описывающей полное эксплуатационное время работы оборудования. Для целей построения данной функции в литературе [2] предложено использовать функцию жизненного цикла эксплуатации оборудования (ЖЦЭО).

Поскольку при отказах оборудование простаивает и не эксплуатируется, то для построения аналитической функции интенсивности отказов предполагалось, что эта функция обратно пропорциональна производной от функции ЖЦЭО  $y(t)$ :

$$\lambda(t) = \frac{C}{\left| \frac{dy(t)}{dt} \right|}, \quad (1)$$

где  $C$  — коэффициент пропорциональности.

В настоящее время построено достаточно много разнообразных функций жизненного цикла (ЖЦ). Наиболее простой и часто используемой является S-образная логистическая функция ЖЦ.

Уравнение для этой функции имеет вид

$$y(t) = \frac{A}{1 + 10^{a-bt}}, \quad (2)$$

где  $A$  — асимптота функции;  $a$  и  $b$  — параметры функции.

Коэффициент пропорциональности  $C$  и параметры функции  $a$  и  $b$  определяются по экспериментальным статистическим данным об интенсивности отказов с помощью метода наименьших квадратов (МНК).

В табл. 1 приведены коэффициент пропорциональности  $C$  и параметры функции  $a$ ,  $b$  для отказов упаковочного оборудования.

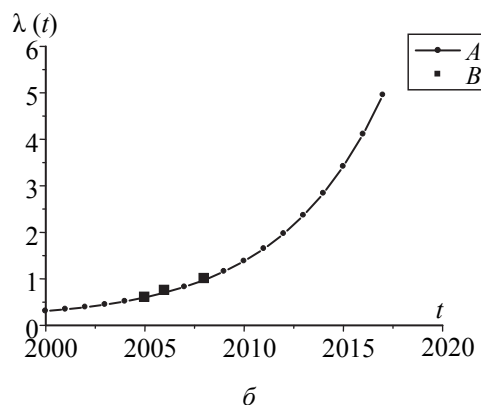
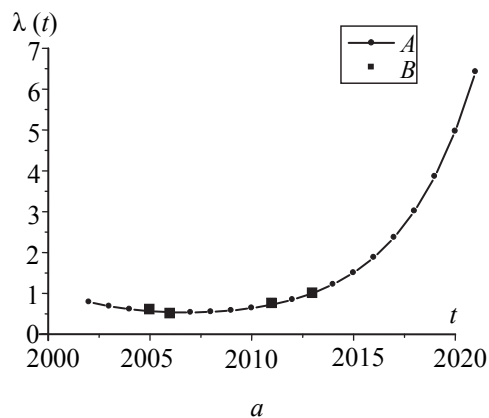
Таблица 1

**Параметры данных для построения аналитической функции интенсивности отказов**

Вид оборудования	$C$	$a$	$b$
Шаровая мельница «UNICON»	0,036	0,560	0,117
Машина «Линепак» для упаковки конфет	0,010	0,556	0,083
Линия для упаковки шоколада	0,015	0,238	0,088

Результаты вычисления аналитической функции интенсивности отказов для упаковочных машин приведены на рис. 1.

В табл. 2 показаны коэффициент пропорциональности  $C$  и параметры функции  $a$ ,  $b$  для времени нахождения в ремонте оборудования.



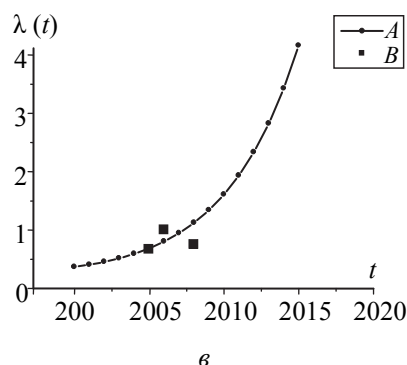


Рис. 1. Аналитическая функция интенсивности отказов:

- a* — шаровая мельница «UNICON»;
- б* — машина «Линепак» для упаковки конфет;
- в* — линия для упаковки шоколада;
- A* — теоретическая зависимость;
- B* — экспериментальные данные

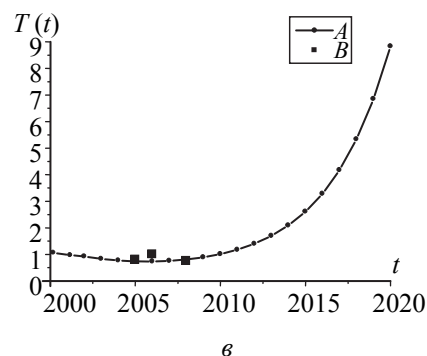


Рис. 2. Аналитическая функция интенсивности ремонтов:

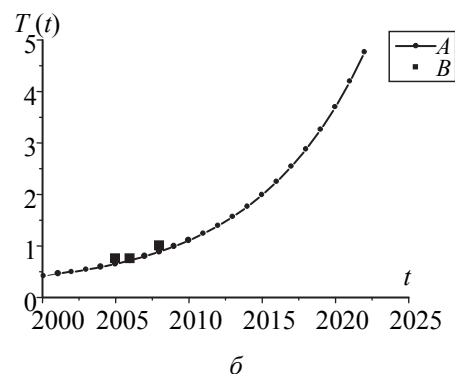
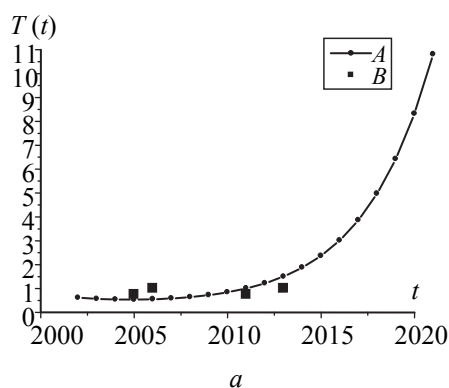
- a* — шаровая мельница «UNICON»;
- б* — машина «Линепак» для упаковки конфет;
- в* — линия для упаковки шоколада;
- A* — теоретическая зависимость;
- B* — экспериментальные данные

Таблица 2

#### Параметры данных для построения аналитической функции интенсивности ремонтов

Вид оборудования	<i>C</i>	<i>a</i>	<i>b</i>
Шаровая мельница «UNICON»	0,036	0,326	0,117
Машина «Линепак» для упаковки конфет	0,030	0,326	0,080
Линия для упаковки шоколада	0,049	0,424	0,116

Результаты вычисления аналитической функции интенсивности ремонтов для упаковочных машин приведены на рис. 2.



После построения аналитических функций можно найти непосредственно все комплексные показатели надежности и проанализировать их изменение в соответствии со сроком эксплуатации оборудования.

Коэффициент готовности  $K_r$  представляет собой вероятность событий, состоящую в том, что система работоспособна в произвольно выбранный момент  $t$ :

$$K_r(t) = \frac{1}{1 + \rho(t)}, \quad (3)$$

где  $\rho$  — интенсивность потерь времени (ИПВ) на восстановление, которая определяется по формуле

$$\rho(t) = \lambda(t)T = \omega(t)T(t), \quad (4)$$

где  $\omega$  — средняя частота потока простоя;  $T$  — среднее время простоя в течение года. Время  $t$  представляет собой время эксплуатации оборудования.

Коэффициент технического использования

$$K_{ти}(t) = \frac{1}{1 + \rho(t) + \rho_{то} + \rho_{ппр}}, \quad (5)$$

где  $\rho_{то}$  — ИПВ на техническое обслуживание (ТО);  $\rho_{ппр}$  — ИПВ на планово-предупредительные ремонтные работы (ППР).

Коэффициент общего использования:

$$K_{ои}(t) = \frac{1}{1 + \rho(t) + \rho_{то} + \rho_{ппр} + \rho_n + \rho_{отп}}, \quad (6)$$

где  $\rho_n$  — ИПВ на наладки;  $\rho_{отп}$  — ИПВ по организационно-техническим причинам (ОТП).

Коэффициент общего использования можно найти с учетом потерь времени на планово-предупредительные ремонты и техническое об-

служивание. Коэффициент ремонтов  $K_p$  определяется по формуле

$$K_p = \frac{1}{\rho_{ппр} + (1 - \rho_{ппр})\rho_{то}}. \quad (7)$$

Интенсивность потерь времени на ППР

$$\rho_{ппр} = \frac{t_{ппр}}{T_3}, \quad (8)$$

где  $t_{ппр}$  — годовое время на ППР;  $T_3$  — годового фонд времени эксплуатации машины.

Интенсивность потерь времени по причине ежесменной подготовки рабочего места и технического обслуживания:

$$\rho_{то} = \frac{T_{то}}{T_{см}}, \quad (9)$$

где  $T_{то}$  — среднее время на ежесменную подготовку рабочего места и техническое обслуживание [3];  $T_{см}$  — время смены.

Следует отметить, что предприятие работает в 2 смены по 8 часов.

Таким образом, подставив (5) в (4), получим коэффициент общего использования:

$$K_{ои}(t) = \frac{K_p}{1 + \rho(t) + \rho_n + \rho_{отп}}. \quad (10)$$

Все необходимые значения нормированных интенсивностей для расчетов, годовые фонды работы оборудования приведены в литературе [4].

На рис. 3 представлены комплексные показатели по годам эксплуатации упаковочного оборудования.

Как видно из графиков, все коэффициенты надежности со временем уменьшаются. Менее резкое уменьшение наблюдается у коэффициента готовности, самое резкое — у коэффициента технологической готовности. С точки зрения коэффициентов готовности, технического использования и общей готовности, все 3 упаковочные единицы еще пригодны для работы. Однако если рассматривать коэффициент технологической готовности, то использование данного вида оборудования на предприятии не целесообразно. Эти единицы подлежат замене, так как коэффициент технологической готовности резко уходит в минусовые значения в 2010-х годах, что говорит о неэффективном использовании оборудования.

Основные комплексные показатели надежности позволяют оценить влияние различных факторов на производительность технической системы. Различают следующие виды производительности: номинальную, фактическую собственную, фактическую техническую и среднюю фактическую.

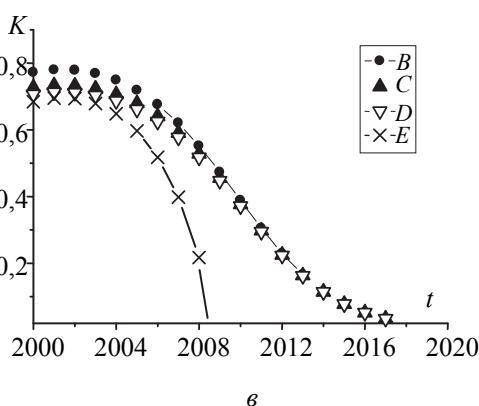
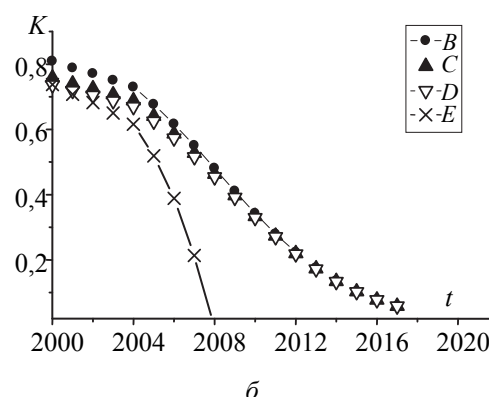
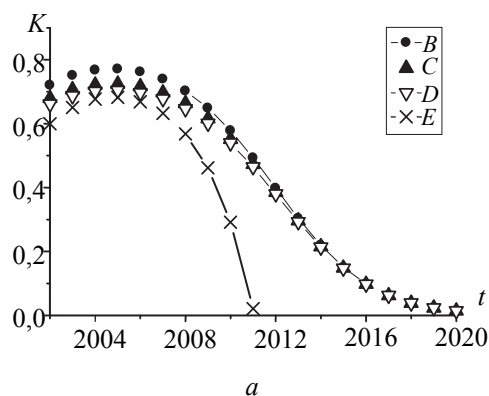


Рис. 3. Комплексные коэффициенты надежности:

а — шаровая мельница «UNICON»;

б — машина «Линепак» для упаковки конфет;

в — линия для упаковки шоколада;

B — готовности; C — технического использования;

D — общего использования;

E — технологической готовности

Фактическая собственная производительность технической системы в периоде между ТО и ППР определяется как

$$Q_{сп}(t) = Q_n K_r(t) K_{тг}(t), \quad (11)$$

где  $Q_n$  — номинальная производительность системы, т. е. производительность, которой обладала бы система, при бесперебойной работе;  $K_{тг}$  — коэффициент технологической готовности, который определяется по формуле

$$K_{\text{тр}}(t) = K_{\text{тр1}}K_{\text{тр2}} = \left[ 1 - \left( \frac{\omega(t)\chi}{Q_{\text{н}}} \right) \right] K_{\text{тр2}}, \quad (12)$$

где  $K_{\text{тр1}}$  — коэффициент выхода годной продукции с учетом потерь времени на брак из-за отказов;  $K_{\text{тр2}}$  — коэффициент выхода годной продукции с учетом брака;  $\chi$  — среднее количество бракованных изделий за один технологический отказ.

Количество изделий  $N$ , изготовленных за время  $t$ :

$$N(t) = tQ_{\text{н}}. \quad (13)$$

Исходя из этого, можно найти количество бракованных изделий за один технологический отказ:

$$\chi(t) = K_{\text{тр2}}N(t). \quad (14)$$

Подставив  $\chi$  в формулу (10), найдем коэффициент технологической готовности:

$$K_{\text{тр}}(t) = \left[ 1 - \left( \frac{\omega(t)K_{\text{тр2}}Q_{\text{н}}t}{Q_{\text{н}}} \right) \right] K_{\text{тр2}} = \\ = [1 - (\omega(t)K_{\text{тр2}}t)] K_{\text{тр2}}. \quad (15)$$

Фактическая техническая производительность машины с учетом ТО и ППР определяется по формуле

$$Q_{\text{тп}}(t) = Q_{\text{н}}K_{\text{тп}}(t)K_{\text{тр}}(t). \quad (16)$$

Средняя фактическая производительность системы с учетом всех потерь времени рассчитывается как

$$Q_{\text{срп}}(t) = Q_{\text{н}}K_{\text{он}}(t)K_{\text{тр}}(t). \quad (17)$$

Частота отказов и время нахождения в ремонте непосредственно влияют на коэффициент общего использования, который влияет на фактическую производительность. Если коэффициент общего использования падает, то уменьшается и фактическая производительность, что увеличивает время на изготовление изделий.

Более детально влияние потерь времени по рассматриваемым причинам отражает относительная производительность. Как видно из формул (11), (16) и (17), относительные производительности определяются через произведение коэффициентов. Можно ввести следующие относительные производительности.

Фактическая собственная производительность относительно номинальной находится по формуле

$$\tilde{Q}_{\text{сп}}(t) = \frac{Q_{\text{сп}}(t)}{Q_{\text{н}}} = K_{\text{тп}}(t)K_{\text{тр}}(t). \quad (18)$$

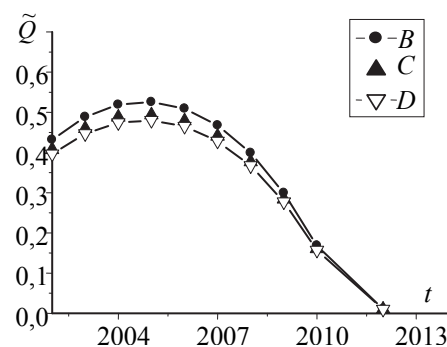
Фактическая техническая производительность относительно номинальной определяется по формуле

$$\tilde{Q}_{\text{тп}}(t) = \frac{Q_{\text{тп}}(t)}{Q_{\text{н}}} = K_{\text{тп}}(t)K_{\text{тр}}(t). \quad (19)$$

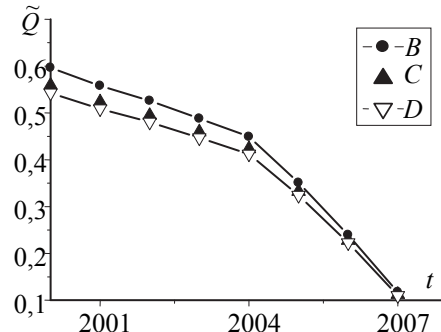
Средняя фактическая производительность относительно номинальной находится по формуле

$$\tilde{Q}_{\text{он}}(t) = \frac{Q_{\text{он}}(t)}{Q_{\text{н}}} = K_{\text{он}}(t)K_{\text{тр}}(t). \quad (20)$$

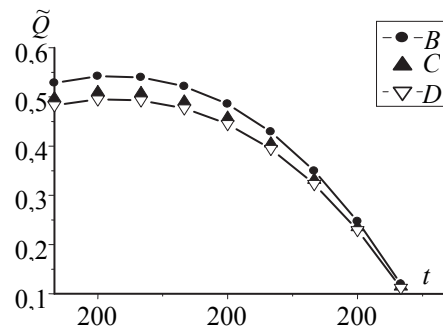
На рис. 4 показано влияние срока эксплуатации упаковочного оборудования на относительную производительность.



а



б



в

Рис. 4. Относительные фактические производительности:

а — шаровая мельница «UNICON»;

б — машина «Линепак» для упаковки конфет;

в — линия для упаковки шоколада;

B — собственная; C — техническая; D — средняя

Из графиков можно сделать вывод, что все 3 единицы упаковочного оборудования к 2015 году являются непригодными для работы. Данные машины устарели и нуждаются в модернизации или замене на новые. В связи с этим в 2014 году линия по производству шоколада и машина «Линепак» для упаковки конфет были заменены на новые упаковочные единицы.

**Вывод.** Таким образом, установлено влияние срока эксплуатации оборудования на производительность. С резким уменьшением комплексных показателей надежности резко уменьшается и производительность оборудования, в том числе и относительная производительность. Отказы оборудования на коэффициенты готовности, технического использования и общего

использования влияют не так резко, как на коэффициент технологической готовности. Данный показатель в связи с частыми и продолжительными ремонтами и отказами резко падает, что значительно снижает производительность упаковочного оборудования.

Для более продолжительной и постоянной бесперебойной работы оборудования следует выполнять все необходимые правила по его эксплуатации, проводить планово-предупредительные ремонты, заменять устаревшие и неисправные узлы на новые. Постоянная и точная работа оборудования позволяет поддерживать производительность с отклонением от номинальной на 3–5%, что является хорошим показателем для работы упаковочного оборудования кондитерских предприятий.

### Литература

1. Бобров В. И. Надежность технических систем. М.: МГУП, 2004. 236 с.
2. Теоретическая оценка надежности печатного оборудования на стадиях его жизненного цикла / М. И. Кулак [и др.] // Труды БГТУ. 2013. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 27–32.
3. Могинов Р. Г. Проектирование полиграфического производства. Современные подходы к решению задач проектирования. М.: МГУП, 2008. 374 с.
4. Голуб Н. С., Кулак М. И. Взаимосвязь комплексных показателей надежности и производительности упаковочного оборудования // Труды БГТУ. 2014. № 9: Издат. дело и полиграфия. С. 48–51.

### References

1. Bobrov V. I. *Nadezhnost' tekhnicheskikh sistem* [Reliability of Technical Systems]. Moscow, MGYP Publ., 2004. 236 p.
2. Kulak M. I., Trusevich N. E., Sakulevich T. A., Haritonchik I. V. A theoretical estimate of the reliability of printing equipment in the stages of its life cycle. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2013, no. 9: Publishing and Printing, pp. 27–32 (In Russian).
3. Moginov R. G. *Proektirovanie poligraficheskogo proizvodstva. Sovremenyie podkhody k resheniyu zadach proektirovaniya* [Design of printing production. Modern approaches to solving design problems]. Moscow, MGYP Publ., 2008. 374 p.
4. Golub N. S., Kulak M. I. The relationship of comprehensive reliability and performance packaging equipment. *Trudy BGTU* [Proceedings of BSTU], 2014, no. 9: Publishing and Printing, pp. 48–51 (In Russian).

### Информация об авторе

**Голуб Надежда Сергеевна** – магистр технических наук, мастер кафедры полиграфических производств, Белорусский государственный технологический университет (220006, г. Минск, ул. Сverdlova 13а, Республика Беларусь). E-mail: golubok.358-01@mail.ru

### Information about the authors

**Golub Nadejda Sergeevna** – M. Sc. Engineering, foreman of the Department of Printing Technologies. Belarusian State Technological University (13a, Sverdlova str., 220006, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: golubok.358-01@mail.ru

Поступила 20.05.2015