

12. Ван дер Варден, Б. Л. Математическая статистика / Б. Л. Ван дер Варден. – М.: Изд-во. иностр. лит., 1960. – 434 с.

REFERENCES

1. Snezhkov, D. Yu., Leonovich, S. N., & Voznischik, A. V. (1993) Analysis of Methods for Non-Destructive Tests of Concrete Structures in Accordance with Existing State Standards and Norms of European Union. *Nauka i Tekhnika* [Science and Technology], 2, 33–39 (in Russian).

2. Lapchinsky, A. K. (2005) Operational Reliability of Reinforced Concrete Open-Frame Girders. *Arkhitektura i Stroitelstvo* [Architecture and Construction], 1, 114–116 (in Russian).

3. Bleschik, N. P., Tur, V. V., & Kravchenko, V. V. (2005) To Problem on Concrete Strength Control in View of the Requirements of GOST 18105–86 and European Common Standard EN 206-1: 2001. *Stroitel'naya Nauka i Tekhnika* [Construction Science and Equipment], 1, 53–61 (in Russian).

4. Brusser, M. I. (1984) New Standard System on Regulations for Concrete Strength Control. *Beton i Zhelozobeton* [Concrete and Reinforced Concrete], 2, 32–33 (in Russian).

5. Neville, A. M. (1977) *Wlasciwosci Betonu*. Warszawa, Wydanie Czwarte. 875 p.

6. Korzewka, S., & Mames, J. (1974) *Wztrzymalosc Gwarantowana Betonow Produkowanych w Zaklachs Prefabrykacji*. XX Konferencija Nankowa KJJIW PAH I KN PZJTБ. Krakow.

7. Heavy Structural Concrete. STB 1544–2005. Minsk, Minskstroyarkhitektury, 2005. 17 p. (in Russian).

8. Novitsky, P. V., & Zograf, I. A. (1985) *Evaluation of Errors in Measuring Results*. Leningrad, Energoatomizdat. 248 p. (in Russian).

9. Hastings, N., & Peacock, J. (1980) *Reference Book on Statistical Distributions*. Moscow, Statistika. 96 p. (in Russian).

10. Osipov, S.N., & Pilipenko, V. M. (2012) *Method for Determination of Minimum Number of Tests for Construction Material or Product*. Patent Republic of Belarus No 15735 (in Russian).

11. Brownlee, K. A. (1949) *Statistical Investigations in Production*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature. 228 p. (in Russian).

12. Van der Waerden, B. L. (1960) *Mathematical Statistics*. Moscow: Publishing House of Foreign Literature. 434 p. (in Russian).

Поступила 04.01.2014

УДК 624.9

## СТОХАСТИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОЦЕНКЕ НАДЕЖНОСТИ И ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ТРАНСПОРТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

РЯБЦЕВ В. Н.

Белорусский национальный технический университет

E-mail: grieves@yandex.ru

Для достижения обеспечения максимальной эффективности инвестирования в эксплуатацию транспортной сети необходимо как можно более точно оценить надежность и остаточный ресурс сооружений. Применяемые в настоящее время в Республике Беларусь критерии остаточного ресурса для транспортных сооружений не позволяют выполнить ее с достаточной степенью объективности.

В статье предлагается применить в качестве критерия оценки технического состояния транспортных сооружений и остаточного ресурса величину снижения их надежности в процессе эксплуатации. Нормативные документы, регламентирующие процедуру оценки технического состояния транспортных сооружений, предусматривают выполнение прочностных расчетов конструкций по проектным данным. Такой подход для эксплуатируемых сооружений является слишком оторванным от реальности, поскольку транспортные нагрузки имеют большой статистический разброс, характеризуются цикличностью, носят динамический характер, могут перемещаться вдоль и поперек сооружения, изменяются во времени как в краткосрочной, так и в долгосрочной перспективе.

С введением в действие на территории Беларуси СТБ ISO 2394–2007 «Надежность строительных конструкций» открылась техническая возможность для перехода от детерминистического подхода к оценке надежности и технического состояния эксплуатируемых сооружений (рассматривающего виртуальное воздействие на реальное сооружение условной проектной нагрузки) к вероятностному подходу (оперирующему с воздействиями реальных нагрузок в определенный период времени, которые могут быть определены экспериментально). Применение параметра надежности, определенного вероятностным методом, в качестве критерия остаточного ресурса транспортных сооружений позволит значительно

но повысить точность такой оценки благодаря математически выверенному учету особенностей реальных воздействий на конкретное транспортное сооружение и, таким образом, привести критерии оценки остаточного ресурса транспортных сооружений в соответствие с мировым уровнем развития строительной науки и техники.

**Ключевые слова:** надежность, остаточный ресурс, стохастический подход.

Ил. 2. Библиогр.: 10 назв

## STOCHASTIC APPROACH FOR EVALUATION OF RELIABILITY AND RESIDUAL LIFE OF TRANSPORT STRUCTURES

*RAB TSAU U. N.*

*Belarusian National Technical University*

In order to ensure maximum efficiency of investments in operation of transport network it is necessary exactly evaluate reliability and residual life of structures. The criteria of residual life which are presently applied for transport structures in the Republic of Belarus do not permit to execute evaluation with required sufficiency of objectiveness.

The paper proposes to use reduction value of structure reliability in the process of their operation as an evaluation criterion of their state and residual life. Specification documents regulating the evaluation procedure of transport structure technical state stipulate execution of structure strength calculations in accordance with design data. Such approach for operated structures looks rather ivory-towered because the actual transport loads have a large statistical dispersion, they are characterized by periodicity, dynamic character, they can criss-cross structures and change in time as in short- so in long term prospects as well.

Introduction of СТБ ISO 2394–2007 “Reliability of construction structures” on the territory of Belarus has provided an opportunity to pass from deterministic approach on evaluation of reliability and technical state of operated structures that considers virtual impact of substitute design loading on a real structure to probability approach that considers impacts of actual loadings in specific period of time and which can be determined with the help of experiments. Application of reliability parameter as a criterion of transport structure residual life which is determined with the help of probability method will make it possible to improve significantly the evaluation accuracy due mathematical precise accounting of peculiar features pertaining to actual impacts on specific transport structure and thus it will bring criteria for evaluation of transport structure residual life in accordance with the world development level of construction science and technology.

**Keywords:** reliability, residual life, probabilistic approach.

Fig. 2. Ref.: 10 titles.

**Введение.** Технический прогресс общества неизбежно приводит к увеличению нагрузок на транспортные сооружения. Этот рост выражается в виде как утяжеления действующих на сооружения транспортных средств, так и увеличения интенсивности их обращения. В этих условиях на первый план выходит необходимость поддержания транспортных сооружений в исправном состоянии. Это связано как с обеспечением безопасности движения, так и с планированием инвестиций на ремонт, реконструкцию и замену транспортных сооружений. В настоящее время критерием принятия решений по этим вопросам служат результаты периодической (один раз в пять или десять лет) оценки технического состояния транспортных сооружений [1] (их диагностика) либо результаты проведения сезонных осмотров.

Для повышения эффективности принятия решений требуются более оперативные и обоснованные данные о появлении дефектов и остаточном ресурсе сооружения, которые позволят сделать вывод о необходимости того или иного вида ремонта конструктивного элемента, или же о целесообразности его замены. Таким образом, основой планирования корректирующих действий в отношении технического состояния транспортных сооружений должны быть объективные и своевременно представленные данные об их надежности и остаточном ресурсе.

Нормативные документы рекомендуют при обследовании мостов, эксплуатирующихся более 25 лет, выполнять прогноз долговечности и эксплуатационной надежности сооружения на основе полученных при обследовании данных

о снижении прочности бетона, скорости его карбонизации, наличии и ширине раскрытия трещин, величине защитного слоя бетона и т. д. [1]. В конечном итоге, прогнозирование долговечности мостов предлагается выполнять на основании снижения класса их грузоподъемности [2]. Однако достоверность оценки такого прогноза нельзя считать достаточно объективной хотя бы потому, что проектный класс грузоподъемности не отражает реальную способность сооружения нести именно ту нагрузку, воздействию которой он подвергается в реальности.

Введение в действие на территории Беларуси международного стандарта [3] позволяет пересмотреть принципы оценки остаточного ресурса зданий и сооружений и привести их в соответствие с мировым уровнем развития строительной науки. Так, согласно [4], оценку технического состояния зданий и сооружений предписывается вести уже не по принципу соответствия эксплуатируемого сооружения проекту, а исходя из принципа надежности, т. е. на основании [3]. Исходя из этого критерием расчета остаточного ресурса должно служить условие, что вероятность разрушения конструкции  $P_f$  в определенный момент времени не превысит заданного значения  $P_{fs}$  после заданного периода времени [3]

$$P_f \leq P_{fs}.$$

Для определения запаса надежности конструкции фактически рассчитанный индекс надежности сравнивают с целевым индексом надежности, назначенным для данного сооружения исходя из серьезности возможных последствий отказа данного сооружения. Принимая за основу [3], следует отчетливо понимать, что стандарт определяет только общие принципы оценки надежности строительных конструкций, а применение специфических методов оценки надежности и остаточного ресурса на его основе оставляется на усмотрение экспертов, производящих оценку.

**Общие принципы стохастического подхода к оценке надежности и остаточного ресурса эксплуатируемых транспортных сооружений.** Главной принципиальной особенностью эксплуатируемых конструкций (в отличие от вновь проектируемых) является возмож-

ность оценить реально действующие на сооружение нагрузки путем соответствующих замеров, в то время как при проектировании конструкции такая возможность отсутствует и проектировщик вынужден использовать виртуальную модель предполагаемой реальной нагрузки. В отличие от проектируемых, для эксплуатируемых сооружений становится возможным оценить не только воздействия от реально действующих нагрузок, но и реальный физический износ конструкций от реальных нагрузок с учетом реальной деградации конструкций от воздействия природных факторов в конкретный момент времени в конкретных условиях. Другая отличительная особенность эксплуатируемых конструкций (в отличие от проектируемых) – возможность узнать полную стоимость сооружения на определенный момент времени с учетом уже реально сделанных капиталовложений на ее эксплуатацию и, таким образом, найти эффективность конкретной конструкции в конкретных условиях. Эти данные должны послужить критерием целесообразности дальнейшей эксплуатации конструкции, а также назначения режима ее эксплуатации.

Выполнение непосредственных аппаратных замеров на конструкции открывает возможности для статистически обоснованного определения базисных характеристик, используемых при оценке надежности сооружений в соответствии с [3], что позволяет определить вероятность разрушения конструкции  $P_f$  и безотказной работы  $P_s$  (очевидно, что  $P_s = 1 - P_f$ ). Если представить разность обобщенного сопротивления  $R$  и обобщенного воздействия  $S$  как запас прочности конструкции  $M$ , то вероятность ее разрушения (превышения границы области допустимых состояний)  $P_f$  определится интегралом

$$P_f = \int_{\infty}^0 p_s(M) dM,$$

где  $p_s(M)$  – плотность распределения вероятности резерва прочности конструкции [5].

Схема взаимодействия распределений вероятностей обобщенного сопротивления и обобщенного воздействия показана на рис. 1 [6]. При этом следует понимать, что вероятность

разрушения конструкции не определяется простым наложением этих двух кривых, а при помощи любого из существующих алгоритмов (FORM, SORM, Монте-Карло). Для практических расчетов принято оперировать индексом надежности  $\beta$ , который представляет собой аналог количества стандартных отклонений для функции плотности вероятностей разрушения конструкции [5].

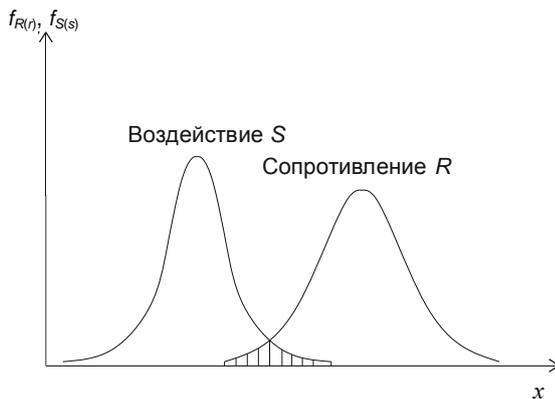


Рис. 1. Схема взаимодействия распределений вероятностей обобщенного сопротивления и обобщенного воздействия

Если учесть, что индекс надежности

$$\beta = \frac{\mu_M}{\sigma_M} = \frac{\mu_R - \mu_S}{\sqrt{\sigma_R^2 - \sigma_S^2}},$$

где  $\mu_M$ ,  $\mu_R$ ,  $\mu_S$  – математические ожидания соответственно обобщенных резерва прочности, сопротивления и воздействия на конструкцию;  $\sigma_M$ ,  $\sigma_R$ ,  $\sigma_S$  – стандартные отклонения этих переменных, то вероятность разрушения конструкции  $P_f$

$$P_f = 1/2 - \Phi(\beta),$$

где  $\Phi(\beta) = \frac{1}{2\pi} \int_0^{-\beta} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du$  – табличное значение интеграла Лапласа для вычисленного ранее  $\beta$  с заданной степенью вероятности [5].

Остаточным ресурсом сооружения принято считать время, оставшееся до момента исчерпания запаса надежности сооружения, т. е. до снижения реального индекса надежности  $\beta$  до своего целевого значения (последний предварительно определяется по методике [3], в зависимости от тяжести возможного физического

и экономического ущерба от отказа сооружения). В первом приближении можно оценивать остаточный ресурс как разницу в процентах первоначального и текущего резервов прочности. Переход от показателя в процентах к показателю в единицах времени потребует калибровки математической модели, т. е. определения вида зависимости времени (остаточного ресурса) от индекса надежности  $\beta$  [7].

Статистические характеристики обобщенного сопротивления и обобщенного воздействия получают исходя из статистических характеристик составляющих их переменных, которыми для эксплуатируемых конструкций являются геометрические размеры элементов конструкций, свойства материалов, характеристики нагрузок и погрешности модели. Поскольку для эксплуатируемых конструкций определение базисных переменных выполняется экспериментально, т. е. путем непосредственного аппаратного замера соответствующих характеристик на конструкции, появляется необходимость разработки специфических методик выполнения замеров для получения достоверных результатов. Если для замера реальных геометрических размеров конструкций (а они могут значительно отличаться от проектных) и размеров повреждений могут быть использованы широко распространенные измерительные приборы, то для определения физических характеристик материалов в различных местах в пределах конструкции уже необходимы более специфичные для данных целей неразрушающие или частично разрушающие приборы и соответствующие методики. Ввиду сложности моделирования нагрузок транспортных сооружений для эксплуатируемых сооружений более предпочтительным является непосредственный аппаратный замер напряжений, возникающих от воздействия этих нагрузок в сечениях конструктивных элементов, а не получение их расчетным методом.

**Особенности определения базисных переменных при оценке эксплуатируемых транспортных сооружений.** Описание воздействующих на транспортные сооружения нагрузок имеет чрезвычайно сложный вид. Транспортные нагрузки обладают большим статистическим разбросом, характеризуются цикличностью, носят динамический характер, могут пе-

ремещаться вдоль и поперек сооружения, изменяются во времени как в кратко-, так и в долгосрочной перспективе. Дополнительным неблагоприятным фактором воздействия нагрузок на транспортные сооружения является воздействие вибрации как транспортных средств, так и конструкций самого сооружения. Поэтому применение виртуальных проектных нагрузок для целей оценки остаточного ресурса транспортных сооружений – чрезмерно грубое упрощение и носит вынужденно условный характер.

Априорно недостаточная корреляция виртуальной модели, принятой при проектировании сооружения (с реально действующими на конкретное сооружение нагрузками), моделирование нагрузок на эксплуатируемые транспортные сооружения являются ахиллесовой пятой существующего в настоящее время подхода. Решением проблемы был бы учет результатов воздействия на конструкцию реально действующих на нее нагрузок. Схематическое представление процесса нагружения конструкции реальной нагрузкой и деградации конструкции во времени, согласно [4], показано на рис. 2. Учитывая непрерывность процесса деградации конструкций (а именно материала конструкции и ее геометрических характеристик) для эксплуатируемых сооружений, правильнее было бы оценивать непосредственно напряжения в материале конструкции от реальных нагрузок путем собственно измерений на конструкции, а не пытаться это делать теоретически.

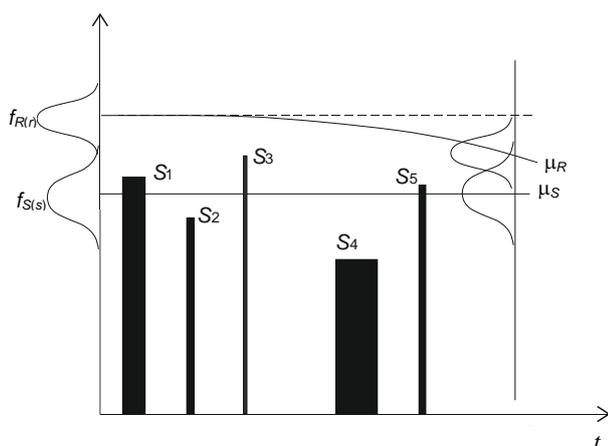


Рис. 2. Схема процесса нагружения конструкции реальной нагрузкой и ее деградации во времени

Другой особенностью в климатических условиях Беларуси для транспортных сооружений является их сильная подверженность воздействию неблагоприятных факторов окружающей среды как естественного (непосредственное действие воды в сочетании с циклическим замораживанием-оттаиванием), так и антропогенного характера (воздействие противогололедных веществ, вызывающих усиленную коррозию стали и бетона, агрессивное воздействие выхлопных газов транспортных средств). В сочетании со скрытыми дефектами строительства способность конструкции сопротивляться воздействию транспортных нагрузок подвергается серьезному испытанию. Особое влияние на долговечность конструкций оказывают трещины в железобетонных пролетных строениях сооружений мостового типа, поскольку их нелегко обнаружить при визуальном осмотре, но при этом они открывают путь для воздействия агрессивных факторов внешней среды. По данным СУСМ «Белмост», распространенность трещин в пролетных строениях составляла в 2006 г. для продольных трещин 22,6 %, для поперечных – 11,9 %, для наклонных – 2,3 %. Но это только для трещин, выявленных при визуальном осмотре, без учета периодически закрывающихся трещин и зарождающихся микротрещин. Их наличие и степень повреждения ими конструкции можно выявить только при помощи инструментальных методов неразрушающего контроля. При этом чем раньше будет обнаружен дефект и приняты меры по его устранению, тем большие средства удастся сэкономить на ремонтных и восстановительных работах. Существующая ныне система выявления дефектов и их влияния на работу сооружения имеет два основных недостатка: проводится только периодически с длительными перерывами «беспризорности» и носит преимущественно визуальный характер.

Учитывая сказанное выше, для своевременной и объективной оценки базисных переменных при определении надежности транспортных сооружений необходима надежная система перманентной оценки уровня напряжений в ее сечениях с учетом появляющихся дефектов в эксплуатируемой конструкции. В этой ситуации наиболее целесообразным представляется подход, реализуемый в системах обес-

печения безопасности [8], с дальнейшим переходом от осуществления неразрушающего контроля к мониторингу [9] и далее к прогностике и управлению техническим состоянием сооружений [10]. Вместе с тем следует иметь в виду, что на пути к переходу к современным методам управления техническим состоянием транспортных сооружений имеется целый ряд нерешенных проблем, начиная от обоснованных методик определения базисных переменных для расчета и заканчивая разработанной программной средой с базой данных и аналитическим модулем для оценки технического состояния и остаточного ресурса конструкций.

### ВЫВОД

В связи с введением в действие на территории Беларуси СТБ ISO 2394–2007 «Надежность строительных конструкций» назрела объективная необходимость пересмотра существующих критериев оценки технического состояния эксплуатируемых сооружений и их замены на более объективные, а также действующих нормативных документов в области оценки технического состояния и остаточного ресурса. Например, для эксплуатируемых мостов в качестве критерия долговечности вместо применяемого в настоящее время критерия снижения грузоподъемности [2] целесообразно использовать снижение их надежности, как это уже делается в ряде промышленно развитых стран [4].

### ЛИТЕРАТУРА

1. **Мосты** и трубы. Правила обследований и испытаний: ТКП 45-3.03-60–2009. – Введ. 01.01.2010. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2009. – 29 с.
2. **Николаевич, А. И.** Прогнозирование долговечности несущих конструкций автодорожных мостов по снижению классов их грузоподъемности во времени / А. И. Николаевич // *Автомобильные дороги и мосты*. – 2012. – № 2. – С. 52–57.
3. **Надежность** строительных конструкций: СТБ ISO 2394–2007. – Введ. 01.07.2008. – Минск: Министерство архитектуры и строительства Республики Беларусь, 2008. – 64 с.
4. **Bases** for Design of Structures – Assessment of Existing Structures: ISO 13822:2001. – Введ. 05.12.2001. – 35 p.
5. **Райзер, В. Д.** Методы теории надежности в задачах нормирования расчетных параметров строительных конструкций / В. Д. Райзер. – М.: Стройиздат, 1986. – 190 с.

6. **Faber, M. H.** Reliability Based Code Calibration / M. H. Faber, J. D. Sørensen // *Joint Committee on Structural Safety*. – 2002. – С. 1–17.

7. **Stepanovic-Oslakovic, I.** Evaluation of Service Life Design Models on Concrete Structures Exposed to Marine Environment / I. Stepanovic-Oslakovic, D. Bjegovic, D. Mikulic // *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*. – 2010. – Vol. 43, № 10. – P. 1397–1412.

8. **Венгринович, В. Л.** Научный анализ и оценка рисков в системах безопасности / В. Л. Венгринович // *Наука и инновации*. – 2013. – № 6. – С. 4–7.

9. **Health** Monitoring of Bridge Structures and Components Using Smart Structure Technology: Wisconsin Highway Research Program / Brent M. Phares, Terry J. Wipf, Lowell F. Greimann, Yoon-Si Lee. – Center for Transportation Research and Education. Iowa State University, 2005. – Vol. 1, 2.

10. **Neumann, T.** Intelligent Bridges – Adaptive Systems for Information and Holistic Evaluation in Real Time / T. Neumann, P. Haardt // *Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Workshop – Structural Health Monitoring 2012, EWSHM 2012*. – Dresden, 2012. – Vol. 1. – P. 455–461.

### REFERENCES

1. **Bridges and Pipes. Rules and Regulations for Investigations and Tests:** ТКП 45-3.03-60–2009. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2009. 29 p. (in Russian).
2. **Nikolaevich, A. I.** (2012) Life Prediction of Highway Bridge Bearing Structures for Reduction of Their Load Capacity Classes in Time. *Avtomobilnye Dorogi i Mosty* [Automobile Highways and Bridges], 2, 52–57 (in Russian).
3. **Reliability of Construction Structures:** СТБ ISO 2394–2007. Minsk: Ministry of Architecture and Construction of the Republic of Belarus, 2008. 64 p. (in Russian).
4. **Bases** for Design of Structures – Assessment of Existing Structures: ISO 13822:2001. Introduced on 05.12.2001. 35 p.
5. **Raizer, V. D.** (1986) *Reliability Theory Methods for Rate Setting of Calculated Parameters of Construction Structures*. Moscow, Stroyizdat. 190 p. (in Russian).
6. **Faber, M. N., & Sørensen J. D.** (2002) *Reliability Based Code Calibration*. Paper for JCSS. Aalborg University, 1–17.
7. **Stepanovic-Oslakovic, I., Bjegovic, D., & Mikulic, D.** (2010) Evaluation of Service Life Design Models on Concrete. *Materials and Structures / Materiaux et Constructions*, 43 (10), 1397–1412. doi: 10.1617/s11527-010-9590-z.
8. **Vengrinovich, V. L.** (2013) Scientific Analysis and Evaluation of Risks in Safety Systems. *Nauka i Innovatsii* [Science and Innovations], 6, 4–7 (in Russian).
9. **Brent M. Phares, Terry J. Wipf, Lowell F. Greimann & Yoon-Si Lee** (2005) Health Monitoring of Bridge Structures and Components Using Smart Structure Technology. Wisconsin Highway Research Program. Center for Transportation Research and Education. Iowa State University. Vol. 1, 2.
10. **Neumann, T., & Haardt, P.** (2012) Intelligent Bridges – Adaptive Systems for Information and Holistic Evaluation in Real Time. *Proceedings of the 6<sup>th</sup> European Workshop – Structural Health Monitoring 2012, EWSHM 2012*, 1, 455–461.

Поступила 05.03.2014