

Интернет-журнал «Наукоедение» ISSN 2223-5167 <http://naukovedenie.ru/>

Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/index.php?p=vol7-5>

URL статьи: <http://naukovedenie.ru/PDF/114TVN515.pdf>

DOI: 10.15862/114TVN515 (<http://dx.doi.org/10.15862/114TVN515>)

## УДК 693

### **Марсова Екатерина Вадимовна**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»  
Россия, г. Москва

Профессор кафедры «Автоматизация производственных процессов»

Доктор технических наук

Доцент

E-mail: [Evmarsova@rambler.ru](mailto:Evmarsova@rambler.ru)

### **Кочетков Андрей Викторович**

ФГБОУ ВПО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»  
Россия, г. Пермь

Профессор кафедры «Автомобили и технологические машины»

Доктор технических наук

E-mail: [soni.81@mail.ru](mailto:soni.81@mail.ru)

### **Буй Конг Тхань**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»  
Россия, г. Москва

Аспирант

E-mail: [madi-app@mail.ru](mailto:madi-app@mail.ru)

### **Толмачев Алексей Геннадьевич**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»  
Россия, г. Москва

Аспирант

E-mail: [alex081979@yandex.ru](mailto:alex081979@yandex.ru)

### **Ли Чжой**

ФГБОУ ВПО «Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет»  
Россия, г. Москва

Аспирант

E-mail: [madi-app@mail.ru](mailto:madi-app@mail.ru)

## **Линейные системы регулирования щековой дробилки по входной производительности**

**Аннотация.** В статье рассмотрены варианты линейного управления процессами дробления в головном агрегате линии дробления, используя принцип построения систем непрерывного регулирования от простого к сложному, когда любая структурная схема получается из упрощенной введением дополнительных динамических звеньев. При этом достигается изменение качественных показателей процесса регулирования в системе за счет усложнения ее исходной структуры. Сделан вывод о том, что линейное управление процессом дробления возможно только для небольших дробилок с малыми постоянными времени. Выражения для линейной и квадратичной интегральных оценок свидетельствуют о жесткой зависимости их оптимальных значений от параметров дробилки. Если отсутствует физическая возможность расширения области оптимизации, границы которой в предлагаемом варианте управления определяются в основном большими значениями постоянных времени дробилки, то добиться оптимального управления не удастся.

**Ключевые слова:** дробление; щековая дробилка; интегральные оценки; система регулирования; управление; система; исходная структура; проектирование.

**Ссылка для цитирования этой статьи:**

Марсова Е.В., Кочетков А.В., Буй Конг Тхань, Толмачев А.Г., Ли Чжой Линейные системы регулирования щековой дробилки по входной производительности // Интернет-журнал «НАУКОВЕДЕНИЕ» Том 7, №5 (2015) <http://naukovedenie.ru/PDF/114TVN515.pdf> (доступ свободный). Загл. с экрана. Яз. рус., англ. DOI: 10.15862/114TVN515

## Введение

В ряде исследований было показано, что не удастся получить высокие качественные показатели дробления у дробилок первичного дробления с использованием нелинейных систем регулирования [1-9].

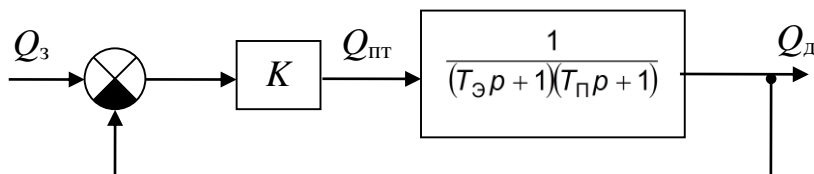
Поэтому необходимо рассмотреть варианты линейного управления, используя принцип построения систем непрерывного регулирования от простого к сложному, когда любая структурная схема получается из упрощенной введением дополнительных динамических звеньев. При этом достигается изменение качественных показателей процесса регулирования в системе за счет усложнения ее исходной структуры. Воспользуемся основным положением системотехнического проектирования, связанным с такими понятиями, как структурная сложность и эффективность управления, когда целью управления становится приведение в соответствие разнообразных возмущающих воздействий с разнообразием и сложностью ответных реакций управляющей части. Успешное управление той или иной системой возможно лишь в том случае, если управляющее устройство обладает разнообразием того же порядка, что и управляемый объект. Зависимость качественных характеристик системы от ее структурного и функционального разнообразия позволяет обосновать всевозможные способы управления. При этом варианты систем управления располагаются в виде последовательности в порядке возрастания структурной и функциональной сложности.

## Постановка задачи

Рассмотрим наиболее простую статическую систему регулирования производительности щековой дробилки с передаточной функцией, связывающей производительности дробилки  $Q_d$  и питателя  $Q_{пт}$  [1-3]:

$$W(p) = \frac{1}{(T_э p + 1)(T_п p + 1)},$$

(где  $T_э, T_п$  - постоянные времени эффективной и промежуточной зон камеры дробления) с пропорциональным регулятором, коэффициент усиления которого  $K$  (рис. 1а). Известны положительные свойства подобных систем прямого управления: высокое быстродействие и конструктивная простота.



**Рис. 1.** Система с пропорциональным регулятором производительности

Передаточная функция системы в замкнутом состоянии:

$$\Phi_d(p) = \frac{W(p)}{1+W(p)} = \frac{K}{T_э T_п p^2 + (T_э + T_п)p + 1 + K}, \quad (1)$$

### Метод решения

Для оценки качественных характеристик дробилки воспользуемся найти линейной  $J_1$  и  $J_2$  квадратичной интегральными оценками. Линейная квадратичная оценка является интегралом площади переходного процесса, изменения выходной производительности дробилки и определяет ее величину ошибки (массы) в переходном процессе:

$$J_1 = \frac{1}{K+1}. \quad (2)$$

Квадратичный интеграл косвенно определяет полную массу материала за время переходного процесса:

$$J_2 = \frac{K^2}{2(1+K)^2} \left( \frac{T_{II} + T_{Э}}{1+K} + \frac{T_{II}T_{Э}}{T_{II} + T_{Э}} \right). \quad (3)$$

Наилучшее качество процесса дробления определяется минимумом обеих интегральных оценок при изменении коэффициента усиления регулятора  $K$ .

Предел  $J_2 = \frac{T_{II}T_{Э}}{2T_{II}T_{Э}}$  при  $K \rightarrow \infty$ , т.к. система остается устойчивой при любом значении  $K$ .

На рис.2 показаны изменения интегральных оценок в функции коэффициента усиления системы с передаточной функцией в разомкнутом состоянии:

$$W(p) = \frac{K}{(T_{II}p + 1)(T_{Э}p + 1)}. \quad (4)$$

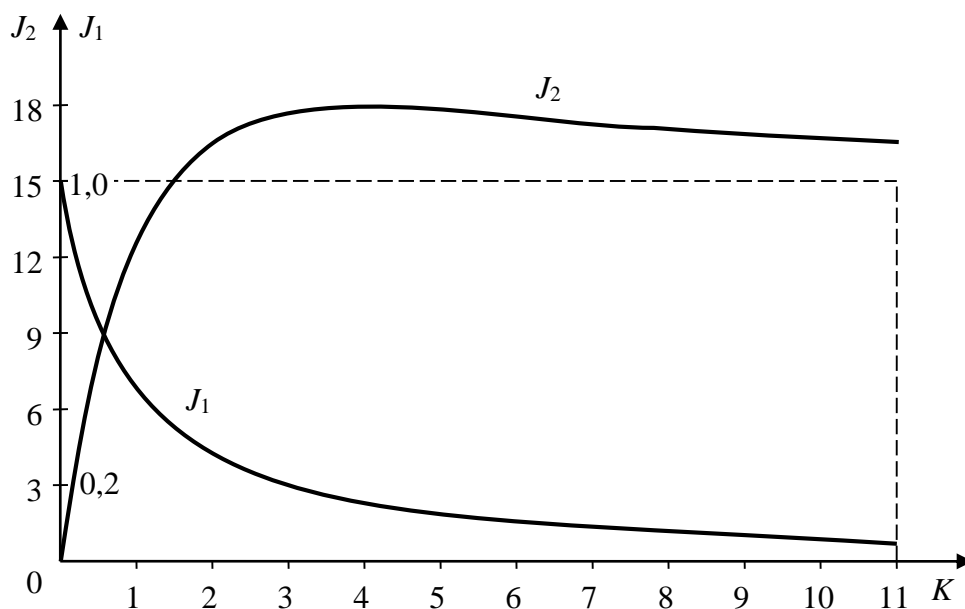


Рис. 2. Интегральные оценки статической системы

Судя по графикам, линейная интегральная оценка может быть уменьшена практически до нуля, что смогло бы в идеале гарантировать постоянный уровень заполнения камеры дробления. Однако квадратичный интеграл практически при  $K = 2$  достигает своего предельного значения, мало меняясь в дальнейшем с увеличением  $K$ . Это свидетельство того,

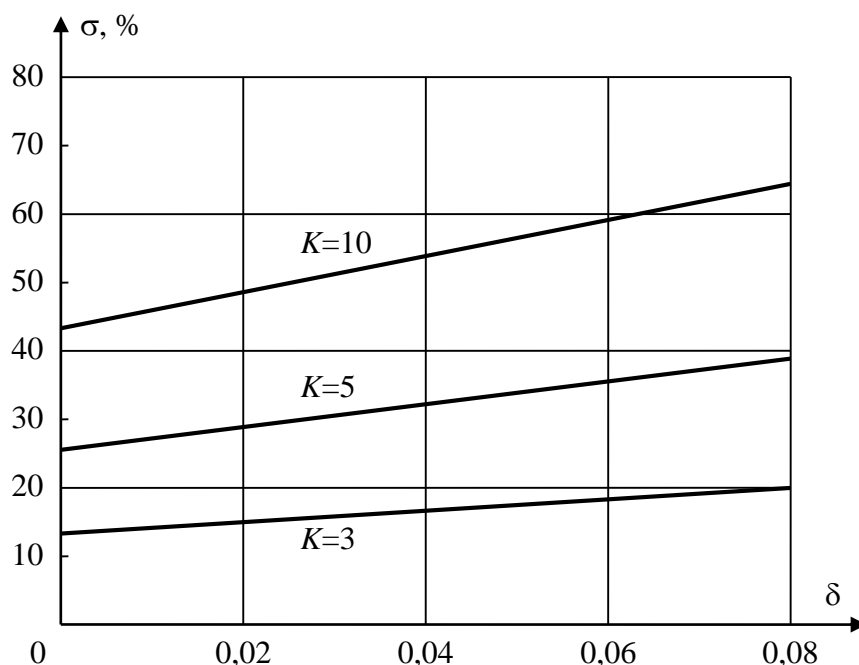
что амплитудные отклонения выходной производительности дробилки будут велики даже при малых коэффициентах усиления  $K$ .

Оценим реализуемость такой системы, исходя из обеспечения достаточного запаса устойчивости и соответствующего ему качества переходного процесса, по величине перерегулирования.

Перерегулирование при единичном воздействии на входе системы, может быть оценено по формуле:

$$\sigma = 1 - \sin \varphi(\omega_c). \quad (5)$$

Рассчитанные по этой формуле зависимости  $\sigma = f(\tau, T_{II}, T_3)$  для значений  $K = 3, 5, 10$  приведены на рис. 3 и свидетельствуют о том, что даже при отсутствии постоянного запаздывания качество процесса неудовлетворительно даже для столь низких коэффициентов усиления.



**Рис. 3.** Перерегулирование в пропорциональной системе регулирования

Для конкретных значений параметров дробилки ( $T_{II} = 45$  с.,  $T_3 = 90$  с.) реализация коэффициента усиления  $K = 10$  возможна лишь в случае, если допустить перерегулирование  $\sigma = 54\%$  и запас по фазе  $\Delta\varphi(\omega_c) = 28^\circ$ . К тому же не удастся существенно снизить статистическую ошибку системы:

$$\sigma = \frac{1}{K+1} f,$$

где  $f$  – внешнее возмущение в виде отклонения производительности дробилки  $\Delta Q$  от заданного значения.

Получим: 
$$\frac{\sigma}{\Delta Q} = \frac{1}{1+K}.$$

Для выдерживания заданного по техническим условиям максимального отклонения  $\Delta Q$  в 5% коэффициент усиления должен быть не меньше 20, что к тому же уменьшит, но не уничтожит статическую ошибку. Введение интегрального закона регулирования решает вопрос отсутствия статической ошибки. Структурная схема системы с интегральным регулятором приведена на рис. 4.

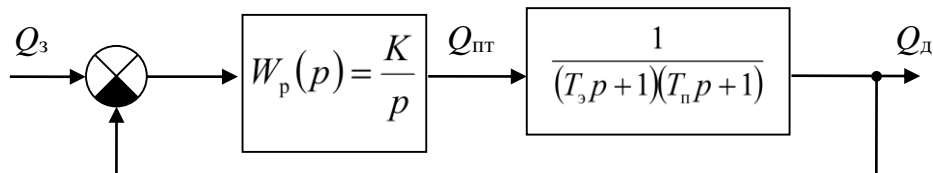


Рис. 4. Система с интегральным регулятором производительности

Передаточная функция разомкнутой системы будет:

$$W_d(p) = \frac{K}{p(T_{\Pi}p + 1)(T_{\Sigma}p + 1)}, \quad (6)$$

где  $K$  – коэффициент усиления.

При получении передаточной функции учитывались инерционные свойства только щековой дробилки. Инерционностью остальных элементов контура регулирования можно пренебречь, так как их постоянные времени на несколько порядков меньше  $T_{\Sigma}$  и  $T_{\Pi}$ .

Выражению (6), соответствует передаточная функция замкнутой системы:

$$\Phi_d(p) = \frac{K}{T_{\Sigma}T_{\Pi}p^3 + (T_{\Sigma} + T_{\Pi})p^2 + p + K} \quad (7)$$

и характеристическое уравнение:

$$T_{\Sigma}T_{\Pi}p^3 + (T_{\Sigma} + T_{\Pi})p^2 + p + K = 0. \quad (8)$$

Условие устойчивости Гурвица  $a_1a_2 - a_0a_3 > 0$  в данном случае сводится, при подстановке значений коэффициентов, к неравенству:

$$K < \frac{T_{\Sigma} + T_{\Pi}}{T_{\Sigma}T_{\Pi}}. \quad (9)$$

Из неравенства следует, что увеличение постоянных времени сказывается отрицательно на устойчивости системы, так как при этом снижается предельное значение общего коэффициента усиления  $K$ , при котором система еще остается устойчивой. Необходимость при этом уменьшать значение  $K$ , ухудшит качественные показатели системы в динамическом режиме и, в первую очередь, ее быстродействие.

Для определения оптимального значения  $K$  воспользуемся интегральными оценками. Этот метод исследования, наилучшим образом отражает особенности процессов накопления материала в камере дробления при изменении производительности загрузки и разгрузки дробилки.

Линейная интегральная оценка  $J_1 = 1/K$  фиксирует значение суммарной технологической ошибки отклонения  $Q_d$  от его номинального значения за время переходного процесса и может быть уменьшена только за счет увеличения  $K$ , однако при этом система

приблизится к границе колебательной устойчивости. Использование квадратичной интегральной оценки  $J_2$  позволяет оптимизировать систему по этому параметру.

Квадратичная интегральная оценка, рассчитанная по известным выражениям [3], будет иметь вид:

$$J_2 = \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{K} + \frac{(T_\varepsilon + T_\Pi)^2}{T_\Pi + T_\varepsilon - T_\Pi T_\varepsilon K} \right]. \quad (10)$$

Находим оптимальное значение  $K_{\text{оп}}$  из условия:

$$\frac{dJ_2}{dK} = 0.$$

Тогда:

$$\frac{dJ_2}{dK} = \frac{1}{2} \left[ -\frac{1}{K^2} + \frac{T_\Pi T_\varepsilon}{(T_\Pi + T_\varepsilon) - T_\Pi T_\varepsilon K} \right] = 0. \quad (11)$$

Отсюда получаем  $K_{\text{оп}}$ :

$$K_{\text{оп}} = \frac{T_\Pi + T_\varepsilon}{T_\Pi T_\varepsilon + (T_\Pi + T_\varepsilon) \sqrt{T_\Pi T_\varepsilon}}. \quad (12)$$

Сравнивая (12) и (9), можно констатировать, что коэффициент усиления  $K_{\text{оп}}$  должен быть взят много меньше его критического значения  $K_{\text{кр}}$ . Например, при  $T_\Pi = T_\varepsilon = T$ :

$$K_{\text{кр}} = 2/T, \quad K_{\text{оп}} = 2/3T, \quad (13)$$

что существенно уменьшит быстродействие системы и ухудшит остальные показатели качества в переходном процессе.

Учитывая, что линейная интегральная оценка  $J_1 = 1/K$ , то из (12), получим:

$$J_1 = \frac{T_\Pi T_\varepsilon + (T_\Pi + T_\varepsilon) \sqrt{T_\Pi T_\varepsilon}}{T_\Pi + T_\varepsilon} = \frac{T_\Pi T_\varepsilon}{T_\Pi + T_\varepsilon} + \sqrt{T_\Pi T_\varepsilon}. \quad (14)$$

Линейная интегральная оценка при  $K$ , близком  $K_{\text{кр}}$ , будет:

$$J_1^K = \frac{1}{K_{\text{кр}}} = \frac{T_\Pi T_\varepsilon}{T_\Pi + T_\varepsilon}; \quad (15)$$

и, например, при  $T_\Pi = T_\varepsilon = T$ :

$$J_1^K = T/2; \quad J_1 = 3T/2, \quad (16)$$

то есть частота переходного процесса упадет в 3 раза, если  $K = K_{\text{оп}}$ , что поведет к недопустимой разгрузке и наполнению камеры дробления в режиме управления.

### Обсуждение результатов

Выражения для линейной и квадратичной интегральных оценок (10, 14) свидетельствуют о жесткой зависимости их оптимальных значений от параметров дробилки. Если отсутствует физическая возможность расширения области оптимизации, границы которой в предлагаемом варианте управления определяются в основном большими значениями постоянных времени дробилки, то добиться оптимального управления не удастся.

Можно сделать вывод, что линейное управление процессом дробления возможно только для небольших дробилок с малыми постоянными времени.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Камалетдинов А.В. Автоматизация процесса дробления твердых строительных материалов: Дисс. на соиск. уч. степ. канд. техн. наук // МАДИ. - М., 2002. – 187.
2. Марсов В.И., Славуцкий В.А. Автоматическое управление технологическими процессами на предприятиях строительной индустрии. - Л.: Стройиздат. 1975. 287.
3. Попов Е.П. Теория линейных САР и управления. - М.: Наука. 1989. 301 с.
4. Проблемы долговечности цементных бетонов / Рапопорт П.Б., Рапопорт Н.В., Кочетков А.В., Васильев Ю.Э., Каменев В.В. // Строительные материалы. 2011. №5. С. 38-41.
5. Статистические методы контроля качества при производстве цементобетона и цементобетонных смесей / Васильев Ю.Э., Полянский В.Г., Соколова Е.Р., Гарибов Р.Б., Кочетков А.В., Янковский Л.В. // Современные проблемы науки и образования. 2012. №4. С. 101.
6. Диагностика и паспортизация элементов улично-дорожной сети системой идеокомпьютерного сканирования / Васильев Ю.Э., Беляков А.Б., Кочетков А.В., Беляев Д.С. // Интернет-журнал Науковедение. 2013. №3 (16). С. 55.
7. Состояние нормативного обеспечения инновационной деятельности дорожного хозяйства / Аржанухина С.П., Сухов А.А., Кочетков А.В., Карпеев С.В. // Качество. Инновации. Образование. 2010. №9. С. 40.
8. Нормативное и технологическое развитие инновационной деятельности дорожного хозяйства / Аржанухина С.П., Кочетков А.В., Козин А.С., Стрижевский Д.А. // Интернет-журнал Науковедение. 2012. №4 (13). С. 69.
9. Статистические методы организации контроля качества при производстве дорожно-строительных материалов / Кочетков А.В., Васильев Ю.Э., Каменев В.В., Шляфер В.Л. // Качество. Инновации. Образование. 2011. №5 (72). С. 46-51.

**Рецензент:** Кокодеева Наталия Евсегнеевна, доктор технических наук, профессор, ФГОУ ВПО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.».



**Marsova Ekaterina Vadimovna**

Moscow state automobile and road technical university  
Russia, Moscow  
E-mail: [Evmarsova@rambler.ru](mailto:Evmarsova@rambler.ru)

**Kochetkov Andrej Viktorovich**

Perm national research polytechnical university  
Russia, Perm  
E-mail: [soni.81@mail.ru](mailto:soni.81@mail.ru)

**Buoy Kong Tkhan**

Moscow state automobile and road technical university  
Russia, Moscow  
E-mail: [madi-app@mail.ru](mailto:madi-app@mail.ru)

**Tolmachev Alexey Gennadevich**

Moscow state automobile and road technical university  
Russia, Moscow  
E-mail: [madi-app@mail.ru](mailto:madi-app@mail.ru)

**Li Chzhoy**

Moscow state automobile and road technical university  
Russia, Moscow  
E-mail: [madi-app@mail.ru](mailto:madi-app@mail.ru)

## **Linear systems of regulation of a shchekovy crusher on entrance productivity**

**Abstract.** In article options of linear management of processes of crushing in the head unit of the line of crushing are considered, using the principle of creation of systems of continuous regulation from simple to difficult when any block diagram turns out from simplified by introduction of additional dynamic links. Thus change of quality indicators of process of regulation in system due to complication of its initial structure is reached. The conclusion that linear management of process of crushing is possible only for small crushers with small constants of time is drawn. Expressions for linear and square integrated estimates testify to rigid dependence of their optimum values on crusher parameters. If there is no physical capacity of expansion of area of optimization, which border in the offered option of management are defined by generally great values of constants of time of a crusher, it won't be possible to achieve optimum control.

**Keywords:** crushing; shchekovy crusher; integrated estimates; system of regulation; management; system; initial structure; design.

## REFERENCES

1. Kamaletdinov A.V. Avtomatizatsiya protsessa drobleniya tverdykh stroitel'nykh materialov: Diss. na soisk. uch. step. kand. tekhn. nauk // MADI. - M., 2002. – 187.
2. Marsov V.I., Slavutskiy V.A. Avtomaticheskoe upravlenie tekhnologicheskimi protsessami na predpriyatiyakh stroitel'noy industrii. - L.: Stroyizdat. 1975. 287.
3. Popov E.P. Teoriya lineynykh SAR i upravleniya. - M.: Nauka. 1989. 301 s.
4. Problemy dolgovechnosti tsementnykh betonov / Rapoport P.B., Rapoport N.V., Kochetkov A.V., Vasil'ev Yu.E., Kamenev V.V. // Stroitel'nye materialy. 2011. №5. S. 38-41.
5. Statisticheskie metody kontrolya kachestva pri proizvodstve tsementobetona i tsementobetonnykh smesey / Vasil'ev Yu.E., Polyanskiy V.G., Sokolova E.R., Garibov R.B., Kochetkov A.V., Yankovskiy L.V. // Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya. 2012. №4. S. 101.
6. Diagnostika i pasportizatsiya elementov ulichno-dorozhnoy seti sistemoy ideokomp'yuternogo skanirovaniya / Vasil'ev Yu.E., Belyakov A.B., Kochetkov A.V., Belyaev D.S. // Internet-zhurnal Naukovedenie. 2013. №3 (16). S. 55.
7. Sostoyanie normativnogo obespecheniya innovatsionnoy deyatel'nosti dorozhnogo khozyaystva / Arzhanukhina S.P., Sukhov A.A., Kochetkov A.V., Karpeev S.V. // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie. 2010. №9. S. 40.
8. Normativnoe i tekhnologicheskoe razvitie innovatsionnoy deyatel'nosti dorozhnogo khozyaystva / Arzhanukhina S.P., Kochetkov A.V., Kozin A.S., Strizhevskiy D.A. // Internet-zhurnal Naukovedenie. 2012. №4 (13). S. 69.
9. Statisticheskie metody organizatsii kontrolya kachestva pri proizvodstve dorozhno-stroitel'nykh materialov / Kochetkov A.V., Vasil'ev Yu.E., Kamenev V.V., Shlyafner V.L. // Kachestvo. Innovatsii. Obrazovanie. 2011. №5 (72). S. 46-51.