

УДК 621.396.13:621.391.814

**РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕЛЕСИСТЕМЫ  
ДЛЯ ПЕРЕДАЧИ ДАННЫХ ПО РАДИОКАНАЛУ  
В ПРОЦЕССЕ БУРЕНИЯ СКВАЖИН**

О.В. Стукач, А.Б. Мирманов\*, А.С. Гопоненко, В.А. Кочумеев

Томский политехнический университет  
\*Казахский агротехнический университет  
им. С. Сейфуллина, г. Астана  
E-mail: tomsk@ieee.org

**Стукач Олег Владимирович**, д-р техн. наук, профессор кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tomsk@ieee.org

Область научных интересов: теория и техника СВЧ, приборы и методы измерения

**Мирманов Арман Барлыкович**, ст. преподаватель кафедры «Радиотехника, электроника и телекоммуникации» Казахского агротехнического университета им. С. Сейфуллина, г. Астана.

E-mail: amwitgeo@gmail.com

Область научных интересов: технология цифровой связи.

**Гопоненко Андрей Сергеевич**, студент кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail:

andreigoponenko@gmail.com

Область научных интересов: приборы и методы измерения.

**Кочумеев Владислав Андреевич**, аспирант кафедры компьютерных измерительных систем и метрологии Института кибернетики ТПУ.

E-mail: tomsk@ieee.org

Область научных интересов: теория и техника СВЧ, приборы и методы измерения.

Исследуется передача и обработка данных в сверхвысокочастотном диапазоне по новому каналу связи – бурильной трубе – как волноводу с заперделными по распространению волн параметрами. Рассмотрены методы передачи и обработки телеметрической информации. Создается новая модель канала связи. Разрабатывается опытный образец системы «измерения в процессе бурения» на основе новой концепции создания телеметрической аппаратуры. Ведется разработка приемно-передающего устройства и экспериментального стенда для электрофизических исследований различных сред в бурильных трубах. Экспериментальный стенд позволяет проводить измерения мощности, резонансной частоты, получить осциллограммы модулированного и выходного СВЧ-сигналов. Разработан мощный передающий излучатель на диоде Ганна, приведены его технические характеристики. Проведено предварительное проектирование новой телесистемы для геофизических исследований.

**Ключевые слова:**

Измерения в процессе бурения, каротаж в процессе бурения, видеоимпульсный СВЧ-передатчик, заперделный волновод, затухание в среде.

**Введение**

Наклонно-направленное бурение давно стало основным видом бурения как на суше, так и на море с платформ. Для измерений физических параметров, позволяющих определять геологические характеристики пород и контролировать процесс бурения скважин, созданы различные приборы, спускаемые в скважины на каротажном кабеле, по которому осуществляется питание, управление и

передача информации на поверхность, где данные регистрируются и обрабатываются. Однако такая методика проведения геофизических измерений не всегда обеспечивает получение необходимых данных.

В связи с необходимостью обеспечения эффективного контроля пространственного положения ствола скважины, соблюдения проектного профиля скважины решается задача постоянного контроля за положением оси ствола скважины в пространстве. Эта задача, в свою очередь, связана с проведением большого числа измерений как параметров направления ствола скважины, так и профиля скважины. Спуск приборов на кабеле в скважину возможен лишь через некоторое время после извлечения бурильных труб. За это время свойства пласта могут значительно измениться. При определенных условиях бурения и эксплуатации скважин спуск приборов на кабеле вообще невозможен или сопряжен с тяжелыми авариями в добывающих

скважинах с высоким давлением на устье. Эти ограничения стандартной методики геофизических исследований сказываются на геологической и экономической эффективности разведки.

Необходимость расширения геофизического комплекса методов на различной физической основе обусловила создание цифровой комплексной скважинной аппаратуры, когда за один спуск-подъем измеряется до 20 различных параметров, передаваемых по геофизическому кабелю к наземной обрабатывающей и регистрирующей аппаратуре. Для получения информации без остановки бурения используют телеметрические системы measurement while drilling (MWD) [1].

До недавнего времени для проведения этих измерений бурение приходилось останавливать. Теперь измерения возможно осуществить с помощью бескабельных измерительных систем, отличающихся способом регистрации информации. Первая предполагает непрерывную передачу информации на поверхность по колонне бурильных труб в виде электромагнитных, акустических или гидравлических сигналов, а вторая – ее автономную регистрацию в глубинном блоке.

Основное преимущество систем с дистанционной передачей заключается в возможности немедленного поступления глубинной информации к оператору. В общем случае телеметрические системы осуществляют измерение первичной скважинной информации, ее передачу по каналу связи забой–устье, прием наземным устройством, обработку и представление оператору результатов обработки. По мнению большинства специалистов, данное направление – одно из самых актуальных и перспективных, в которых должна развиваться технология передачи параметров бурения [2].

Создание телеметрических систем контроля за забойными параметрами ствола скважины в процессе бурения придало значительный импульс научно-техническому прогрессу в области бурения скважин. Стали повышаться требования к точности попадания забоя скважин в заданную точку, что напрямую связано со скоростью и точностью передачи телеметрической информации. В настоящее время телеметрические системы контроля в сочетании с методикоматематическим и программным обеспечением дали технологам небывалые возможности, серьезно изменив методы их работы.

### **Состав телеметрической системы**

Существующие телеметрические системы включают следующие основные части:

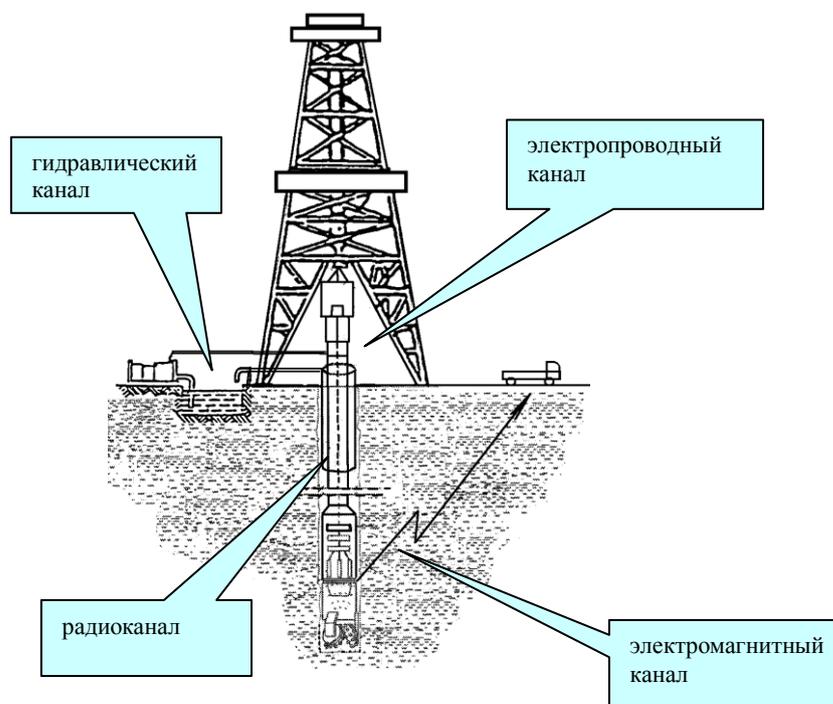
- забойную аппаратуру;
- наземную аппаратуру;
- канал связи;
- технологическую оснастку;
- антенну для электромагнитной линии связи;
- источник электрической энергии для телесистем с беспроводной линией связи.

Забойная часть телесистемы включает первичные преобразователи измеряемых параметров направления бурения, геофизических параметров, технологических параметров бурения. Данные от первичных преобразователей через коммутатор поступают на аналогоцифровой преобразователь, затем через кодирующее устройство и передатчик поступают в канал связи. На поверхности закодированная различными способами информация расшифровывается и поступает на системы отображения и обработки для принятия решений по технологическому режиму.

### **Каналы связи**

Канал связи является основным и решающим фактором, так как именно от него зависит конструкция телесистем, компоновка, информативность, надежность, удобство работы, а также условия прохождения сигналов. Именно канал связи на протяжении многих лет является основным препятствием для измерений в процессе бурения на практике из-за физических условий передачи сигнала.

В настоящее время существуют гидравлический, электромагнитный, акустический, электропроводный и комбинированные типы каналов связи. У каждого из этих каналов связи имеются свои преимущества и недостатки. Разнообразие условий бурения, а также экономическая целесообразность определяют каждому каналу связи свою область применения. Остановимся подробнее на преимуществах и недостатках каждого из рассматриваемых каналов связи (рис. 1).



**Рис. 1.** Каналы связи телеметрических систем

Широкое применение нашел электропроводной канал связи [3]. Он не требует затрат гидравлической энергии и обладает рядом преимуществ перед всеми другими: максимально возможной надежностью связи, информативностью, быстродействием, помехоустойчивостью, многоканальностью, отсутствием забойного источника электрической энергии и мощного передатчика, возможностью двусторонней связи. К недостаткам электропроводного канала связи относятся: наличие кабеля в бурительной колонне, что создает трудности при бурении; затраты времени на его прокладку; необходимость защиты кабеля от механических повреждений; практическая невозможность вращения колонны; необходимость продавливания забойного модуля до места стыковки при углах бурения более  $60^\circ$  с помощью продавочного устройства.

Высокая энергоемкость аппаратуры, длина и вес кабеля являются мощным ограничением для производительности буровых работ. Техническое совершенствование существующей аппаратуры не может решить главных проблем снижения ресурсоемкости, поскольку ограничением является способ передачи данных.

Системы с электромагнитным каналом связи используют электромагнитные волны между изолированным участком колонны бурительных труб и породой [4]. На поверхности земли сигнал принимается как разность потенциалов от растекания тока по горной породе между бурительной колонной и приемной антенной, устанавливаемой в грунт на определенном расстоянии от буровой установки [5]. К недостаткам электромагнитного канала относятся слабая помехоустойчивость, сложность установки антенны, зависимость дальности связи от проводимости и чередования слоев горных пород.

Системы с акустическим каналом связи используют звуковые колебания, распространяющиеся в скважине по промысловочной жидкости, колонне бурительных труб или окружающей породе. Сложность и многообразие свойств гидроакустического канала в скважине обусловили его слабую изученность. Одной из центральных проблем в создании гидроакустического

канала является разработка низкочастотного излучателя, способного эффективно возбуждать колебания внутри колонны бурильных труб в скважине. До настоящего времени телесистемы с гидроакустическим каналом связи на практике не использовались, хотя предложено много вариантов таких систем [6, 7].

Телеметрические системы с гидравлическим каналом связи отличаются от других наличием в них устройства, создающего в потоке бурового раствора импульсы давления [8]. Для генерирования импульсов давления в буровом растворе используются мощные генераторы, работающие по принципу кратковременного частичного перекрытия потока бурового раствора. Гидравлические сигналы, близкие к гармоническим, создаются с помощью электродвигателя, который вращает клапан пульсатора. Гидравлические импульсы поступают по столбу бурового раствора на поверхность, где закодированная различными способами информация декодируется и отображается в виде, приемлемом для восприятия оператором.

Телесистемы с гидравлическим каналом относительно просты для осуществления связи. По сравнению с электромагнитным каналом он не нарушает технологию бурения и не зависит от геологического разреза. Недостатки данного канала связи – низкая информативность из-за малой скорости передачи данных, низкая помехоустойчивость, последовательный код в передаче информации, необходимость в источнике электрической энергии (батарея, турбогенератор), отбор гидравлической энергии для работы передатчика и турбогенератора [9].

Гидравлический канал связи сейчас практически не имеет конкурентов среди остальных по дальности передачи и приема забойной информации. Тем не менее, системы MWD с гидравлическим каналом связи, бесспорно, являются наиболее сложными и дорогими, требуют применения сложных алгоритмов при выделении полезного сигнала на фоне различного рода помех, причем помехи от буровых насосов иногда не являются самыми большими и опасными. Именно наличие таких помех сужает полосу рабочих частот и делает гидравлический канал самым медленнодействующим. Дополнительные сложности в создании систем с гидравлическим каналом связи обусловлены необходимостью учета широкого диапазона расхода и параметров буровых растворов.

### **Необходимость в исследовании новых каналов связи**

Учитывая недостатки применяемых каналов связи, необходимо не столько их совершенствовать, сколько разрабатывать новые каналы, так как разнообразные горно-геологические условия, различные технико-технологические аспекты проводки скважин и экономические факторы предъявляют более высокие требования к информативности процесса бурения. Разработчики вынуждены идти по пути усложнения систем по двум основным причинам.

Первая связана с экономической затратностью бурения. Необходимо уменьшение стоимости работ и проведение комплекса геофизических исследований без остановки процесса бурения (технология *logging while drilling* (LWD) – геофизические исследования в процессе бурения).

Вторая причина связана с тем, что при современном уровне развития техники и технологий бурения информация о характеристиках пласта, получаемая в процессе бурения, является недостаточной. Необходимо иметь данные о кровле и подошве пласта, информацию о разрезе впереди долота, а также о приближении к соседним скважинам, что особенно важно при разбуривании морских месторождений, где количество скважин, построенных относительно близко друг от друга, достигает нескольких десятков.

Усложнение процесса бурения стимулирует дальнейшее развитие разработок телеметрических систем. Основными направлениями совершенствования являются: увеличение количества измеряемых и передаваемых на поверхность параметров бурения, скорости передачи информации, создание в забойных устройствах автоматов, самостоятельно управляющих процессом проводки скважин, использование двухсторонней связи забой–устье. Создание новых телеметрических систем на основе новых принципов передачи данных является одним из приоритетных направлений зарубежных и отечественных производителей бурового оборудования.

### Методы и подходы

Логическим продолжением исследований каналов связи является использование радиолинки. Однако в настоящее время он используется только на наземной части телесистемы [10, 11]. Перспективным является изучение распространения радиоволн по бурильной трубе как новому каналу связи. Проблема передачи информации через такой канал связи ранее не изучалась. Для рассмотренного канала связи наилучшее решение – работа в УВЧ- и СВЧ-диапазонах, поскольку затухание низкочастотных сигналов в тракте будет очень высоким, а размеры антенн не позволят разместить приемник и передатчик в бурильной трубе. Учитывая, что канал связи неоднородно заполнен средами с разной диэлектрической проницаемостью, приемопередатчики должны работать в достаточно широкой полосе рабочих частот. Кроме того, размеры антенны передатчика должны быть раза в полтора меньше диаметра бурильной трубы, чтобы передатчик свободно размещался внутри трубы и оставалось место для протока промывочной жидкости.

Данное исследование проводится в Национальном исследовательском Томском политехническом университете. Проект “Borehole Microwave” связан с решением следующих задач:

1. Исследование нового канала связи и способов передачи сигнала по нему.
2. Создание приемо-передающей системы с целью выявления наиболее перспективных вариантов по передаче и обработке сигнала.
3. Развитие методов модуляции сигнала и разработка устройств для их осуществления.

Способ передачи данных по буровой трубе принципиально отличается от передачи сигнала по кабелю и через горные породы. Это связано, главным образом, с большим затуханием сигнала и изменчивостью свойств пород и напряженности электромагнитного поля в канале. Учитывая высокую вероятность неоднородностей в канале связи, влияющих на форму и амплитуду сигнала, необходимо проведение исследований по формированию и кодированию сигнала. В заполняющей среде напрямую невозможно использование обычных систем передачи, так как целостность сигнала нарушается при прохождении видеоимпульсов по каналу. Отношение сигнал–шум для сигналов разной формы в заполняющей среде существенно изменяется.

Несмотря на большое количество разработок в данной области, дальность действия систем, использующих беспроводной канал связи забой–устье, в значительной мере определяется свойствами геологического разреза скважины. Исследования канала такого типа [12–14] показали, что расчет канала в первом приближении можно свести к расчету неоднородной длинной линии с распределенными параметрами. Расчет практически заключается в определении уровня полезного сигнала, который может быть зафиксирован на поверхности при соответствующих условиях его передачи с забоя и выделения его на фоне помех. Остальные параметры канала в нашем случае не играют особой роли. Величина сигнала  $U$  определяется зависимостью

$$U = U_v e^{-\beta l},$$

где  $U_v$  – напряжение на входе линии передачи;  $\beta$  – коэффициент затухания сигнала в канале связи забой–устье;  $l$  – глубина скважины.

Коэффициент затухания  $\beta$  для стальных труб с достаточной точностью определяется зависимостью

$$\beta \approx 10^{-3} \sqrt{\frac{5,2\sqrt{f}}{D\rho} + \frac{4f}{\rho}},$$

где  $f$  – частота передаваемого сигнала;  $\bar{\rho}$  – средневзвешенное электрическое сопротивление среды;  $D$  – диаметр труб. Эта зависимость соблюдается в УВЧ- и СВЧ-диапазонах.

Наиболее эффективными средствами повышения дальности действия беспроводного канала являются применение бурильных труб с улучшенными электрическими характеристиками и согласование забойного передатчика с нагрузкой, а также снижение частоты сигнала передачи [15]. Техническое противоречие между рабочей полосой частот и затуханием разрешимо выбором несущей частоты исходя из требования обеспечения необходимых размеров антенны, а не минимальности затухания тракта. Значительный резерв увеличения дальности

действия телесистем – снижение уровня помех, что достигается применением узкополосных систем передачи, компенсацией помех и снижением скорости передачи данных измерений [16–17].

Для исследования характеристик приемно-передающих устройств в неоднородных длинных линиях с распределенными параметрами была собрана экспериментальная установка (рис. 2). Она позволяет проводить измерения мощности, резонансной частоты, получить осциллограммы модулированного и выходного СВЧ-сигналов, исследовать параметры спектра.

В состав экспериментальной установки входят:

- генераторный модуль на диоде Ганна;
- осциллограф Agilent DSO 1022A;
- источник питания постоянного напряжения АИП Б5.120/0.75;
- генератор импульсов Agilent 33250A;
- ответвитель направленный;
- частотомер CNT-90XL Pendulum;
- преобразователь измерительный первичный (термисторная головка М5-42);
- измеритель мощности термисторный М3-22А;
- вольтамперметры М2018;
- волноводно-коаксиальный переход;
- анализатор спектра Agilent E4408В.



**Рис. 2.** Экспериментальная установка

В проекте создается принципиально новое приемно-передающее устройство [18–20]. Исследованы принципы построения антенн, генераторов видеоимпульсов, апробированы схемы приема и обработки сигналов. Разработаны и реализованы варианты логарифмических усилителей, устройств цифровой обработки. Имеется большой теоретический и практический научный задел по сверхширокополосным системам исследования электродинамических характеристик природных и техногенных сред в широком частотном диапазоне электромагнитных излучений. Проведены предварительные исследования СВЧ-передатчика большой мощности на диоде Ганна. Достигнуты следующие технические характеристики передатчика: рабочая частота – 9,3...9,5 ГГц; выходная импульсная мощность – не менее 15 Вт; длительность импульсов запуска – 1000 нс; ток диода Ганна – 0,9...1,2 А; время установления и спада СВЧ-импульса – 6 нс; амплитуда импульса запуска – 5 В; напряжение источника питания – 60 В; потребляемый ток – 30 мА. Передатчик был разработан и используется в системах ближней радиолокации, но его технические характеристики позволяют использовать передатчик в системах MWD.

### Заключение

Таким образом, исследование дает обзор существующих каналов связи для систем MWD и показывает необходимость разработки нового канала, основанного на использовании СВЧ диапазона волн. Рассмотрены проблемы проектирования систем MWD на СВЧ. Обоснованы основные характеристики новой телекоммуникационной системы для геофизических исследований. Разработан мощный приемно-передающий модуль на диоде Ганна. Данный модуль позволяет проводить исследования по передаче информации через различные среды (вода, буро-

вой раствор) и проектировать систему передачи данных на новой элементной и технологической базе.

Поскольку работа выполняется на стыке многих специальных дисциплин – радиоэлектроника, СВЧ-техника, геофизика, теория и техника электросвязи, обработка сигналов и т. д., – требуется вовлечение в проект широкого круга специалистов в этих областях. Авторы надеются, что статья вызвала интерес к рассматриваемым в ней вопросам. Они сочтут себя вполне удовлетворенными, если хотя бы некоторые читатели, получившие представление о проблеме проектирования систем MWD, захотят ознакомиться с работами, указанными в списке литературы, и также приложить свои знания, опыт и техническое образование к рассматриваемым проблемам.

*Авторы благодарят Национальный исследовательский Томский политехнический университет и Российский фонд фундаментальных исследований за финансирование проекта 13-02-98002.*

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Stephen Prensky. Recent advances in LWD/MWD and formation evaluation // World Oil. – March 2006. – P. 69–75.
2. D.V. Ellis, J.M. Singer. Well Logging for Earth Scientists. – Springer, 2008.
3. Measurement-while-drilling system // European patent no. EP 0539240B1. Publ. 06.08.1997, Bulletin 1997/32.
4. Adjacent well telemetry system and method for use of the same // European patent no. EP 0918136A1. Publ. 26.05.1999, Bulletin 1999/21.
5. J. Petrovic, V. Petrovic, M.R. White, N.P. Beaulac. System and method for downhole telemetry // US patent no. US 2012/0256759A1. Publ. 11.10.2012.
6. Acoustic telemetry system with drilling noise cancellation // European patent no. EP 1185761B1. Publ. 25.01.2006, Bulletin 2006/04.
7. High data rate acoustic telemetry system // European patent no. EP 1230464B1. Publ. 17.10.2007, Bulletin 2007/42.
8. Measurement-while-drilling tool // European patent no. EP 0588389B1. Publ. 13.08.1997, Bulletin 1997/33.
9. Hiroshi Nakajima, Toshihiro Kinoshita, Hiroshi Hori, Alain Dumont, Hiroshi Nomura. Apparatus for logging while drilling acoustic measurement // US patent no. US 2012/0218862A1. Publ. 30.08.2012.
10. Wireless telemetry system integrated with a broadband network // European patent no. EP 1124211A2. Publ. 16.08.2001, Bulletin 2001/33.
11. Ce Richard Liu, Jing Li. Measurement-while-drilling (MWD) telemetry by wireless MEMS radio units // US patent no. US 2008/0007421A1. Publ. 10.01.2008.
12. Poh Kheong Vong, Rodger D., Marshall A. Modeling an electromagnetic telemetry system for signal transmission in oil fields // IEEE Transactions on Magnetics. Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2005.846272. – V. 41, Iss. 5. – 2005. – P. 2008–2011.
13. Whitacre T., Xiao-Hua Yu. A neural network receiver for EM-MWD baseband communication systems // IJCNN 2009. International Joint Conference on Neural Networks, 2009. Digital Object Identifier: 10.1109/IJCNN.2009.5178838. – 2009. – P. 3360–3364.
14. Yik-Kiong Hue, Teixeira F.L. FDTD simulation of MWD electromagnetic tools in large-contrast geophysical formations // IEEE Transactions on Magnetics. – V. 40, Iss. 2, Part 2. Digital Object Identifier: 10.1109/TMAG.2004.825465. – 2004. – P. 1456–1459.
15. Результаты изучения затухания сигнала в электромагнитном канале связи / В.П. Чупров, А.В. Бельков, Ю.С. Мишин и др. // НТВ “Каротажник”. – Тверь: АИС, 2011. – Вып. 203. – С. 11–16.
16. Рыжанов Ю.В., Ковалев А.Е. Способ формирования пакетов данных измерений бескабельной телеметрической системы в процессе бурения скважины разделитель скважинного прибора телеметрической системы // Патент РФ № 2394257. – Оpubл. 10.07.2010. Бюл. № 19.

17. Аронстам Питер С., Финчер Роджер У., Уоткинс Ларри А. Система и способ связи по зашумленным каналам связи // Патент РФ № 2419996. – Оpubл. 20.05.2009. Бюл. № 14.
18. Kochumeev V.A., Mirmanov A.B., Pushkarev V.P., Stukach O.V. Problems in design of the new microwave geophysical measuring system // 19-th International Conference on Microwave Radar and Wireless Communications (MIKON), 21–23 May 2012. – V. 2. – P. 516–518.
19. A.B. Mirmanov, O.V. Stukach. The Receiver-Transmitter for the Measurement Information Transfer by the Inhomogeneous Media // In Proceedings of IFOST2012 – The 7th International Forum on Strategic Technology. September 17–21, 2012. – Tomsk Polytechnic University. – V. 1. – P. 552–554.
20. V.P. Pushkarev, V.A. Kochumeev, O.V. Stukach. X-Band Pulse Generator Based on Gunn Diode // In Proceedings of IFOST2012 – The 7<sup>th</sup> International Forum on Strategic Technology. September 17-21, 2012. Tomsk Polytechnic University. – V. 1. – P. 555–556.

*Поступила 03.02.2014 г.*