

УДК 621.391.6

## АЛГОРИТМ ПОВЫШЕНИЯ ТОЧНОСТИ ПОЗИЦИОНИРОВАНИЯ МОБИЛЬНЫХ СТАНЦИЙ В СИСТЕМАХ СОТОВОЙ СВЯЗИ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВЫХ УРАВНЕНИЙ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН

К. Н. Зотов<sup>1</sup>, И. В. Кузнецов<sup>2</sup>, В. Н. Акульшин<sup>3</sup>, И. И. Гумерова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>zkn2002@inbox.ru, <sup>2</sup>tk@ugatu.ac.ru, <sup>4</sup>ilzira.08@mail.ru

<sup>1, 2, 4</sup> ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ)  
<sup>3</sup> ОАО «Башинформсвязь»

Поступила в редакцию 3 октября 2014 г.

**Аннотация.** Рассматривается возможность применения волновых уравнений для повышения точности позиционирования мобильных станций в системах оператора сотовой связи, позволяющей учесть задержку распространения радиосигнала в условиях городской застройки.

**Ключевые слова:** волновые уравнения; уравнения Гельмгольца; функция управления; позиционирование мобильных станций.

### ВВЕДЕНИЕ

Важной функциональной частью системы современной подвижной связи является позиционирование мобильных станций. [1] Помимо оказания услуги местоопределения, позиционирование мобильных станций (МС) в системе сотовой связи является функцией управления. Эта функция дает возможность прогнозировать нагрузку на базовые станции оператора, выявлять узлы спроса, исключать блокировки и отказы в обслуживании.

В известных внутрисистемных способах позиционирования МС существуют недостатки: не учитывается волновая природа распространения радиосигнала, временные задержки, изменение проницаемости среды, многолучевость распространения сигнала, шумы и помехи в каналах радиосвязи [2].

Использование спутниковых навигационных систем (ГЛОНАСС, GPS и др.), как альтернативных систем позиционирования, не всегда является удобным и возможным.

Для повышения точности позиционирования, в рамках внутрисистемных (наземных) способов можно использовать статистические модели распространения радиоволн, позволяющих учесть амплитудное изменение уровня сигнала от точки излучения до точки приема [3]. Однако важным фактором, влияющим на точность по-

зиционирования, является время прихода (задержки) сигнала. Статистические модели не позволяют учесть данный фактор.

Для повышения точности позиционирования в существующих системах сотовой связи, без привлечения космического сегмента, перестройки существующих сетей и основных агрегатных узлов оборудования, для учета турбулентности среды распространения радиосигнала, в условиях открытости изучаемых систем, предлагается использовать волновые уравнения.

### ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Учитывая известный [4] подход к решению задачи распространения плоской электромагнитной волны, используют – уравнение [5] Гельмгольца (приведенное волновое уравнение):

$$\Delta u + \epsilon \mu E^2 u = 0, \quad (1)$$

где  $\epsilon$  – относительная диэлектрическая проницаемость;  $\mu$  – относительная магнитная проницаемость среды распространения;  $E$  – напряженность электрического поля.

Решение уравнения Гельмгольца в виде двух бегущих плоских однородных волн, амплитуды которых убывают по мере распространения, предложено в [6, 7] в следующем виде:

$$E(r, t) = A_1 e^{-j\omega t} e^{-jk'r} + A_2 e^{-j\omega t} e^{-jk'r} e^{-2\alpha r}, \quad (2)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  – амплитуды составляющих электромагнитной волны (рис. 1);  $\omega$  – частота радиосигнала, распространения со знаком «+» или «-»;  $r$  – пространственная координата, представляемая в виде  $\tau(m, r)$  ( $m$  – направление  $r$  – искомое расстояние);  $c$  – скорость распространения сигнала в среде;  $\alpha$  – характеризует скорость убывания амплитуды волны в направлении распространения и называется показателем поглощения (следует отличать от коэффициента поглощения  $k'' = \omega\alpha/c$ ), величина  $n = c/v$  называется показателем преломления.

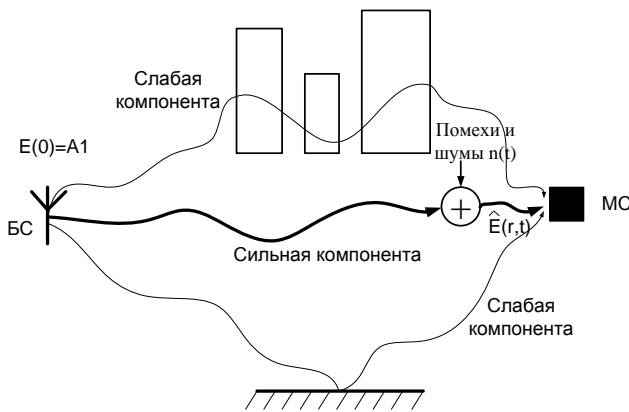


Рис. 1. Представление модели канала связи

### РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Первая часть уравнения (2) описывает волну прямую, вторая – отраженную. В задаче позиционирования интересно лишь одно направление распространения электромагнитной волны – прямое, что сокращает исходную формулу.

Стоит заметить, что пространственная координата  $\tau$ , после таких изменений, превращается в искомую величину  $r$ , и вся формула принимает вид:

$$E(r, t) = A_1 e^{-j\omega t} e^{-jk'r} + A_2 e^{-j\omega t} e^{-jk'r} e^{-2\alpha r}, \quad (3)$$

где  $A_1$  – напряженность электромагнитного поля в точке излучения. Из 3 видно, что  $\omega$  – частота пилотного сигнала.

В силу открытости протоколов взаимодействия, можно также считать, что параметр  $A_1$  доступен измерению и считаем его известным. По сути, это начальное условие для решения (3).

Согласно предложенной модели канала связи (рис. 1), требуется учесть наличие в канале связи помех, приводящих к искажению сигнала, то есть  $E(r, t)$ . Положим, в канале действует гауссовский аддитивный шум  $n(t)$ , который полагается белым, со спектральной плотностью  $N_0$ . В математическом смысле, функция распределения этого шума будет соответствовать формуле:

$$p(n) = \frac{1}{\sqrt{2\pi N_0}} e^{-n^2 / (2N_0)}$$

где  $\Delta t_d = 1/2f$ .

Следовательно, на вход приемника подается:

Задача заключается в том, что необходимо определить расстояние  $r$  вдоль наиболее сильно компоненты распространения сигнала, исходя из следующего условия (критерий правдоподобия по Зигерту–Котельникову [8]):

$$F\left(\frac{E(r, t)}{E_0(r, t)}\right) = 1, \quad (6)$$

где  $F(\dots)$  – интегральная функция распределения всех наблюдаемых напряженностей электрического поля, таких, что верно значение  $E(r, t)$  напряженности поля,

$E_0(r, t)$  – переходная вероятность того, что излучение осуществляется на расстоянии  $r$ , а  $\int_{-\infty}^{\infty} E_0(r, t) dt$  – прием пилотного сигнала.

Выражение (6) для идеального наблюдателя можно формально записать в виде:

Свойство несобственного интеграла [8] гласит о том, что его дифференциал равен подынтегральному выражению. Из чего следует:

где  $T$  – время действия пилотного сигнала.

Тогда искомая функция правдоподобия  $\Lambda(r)$  в соответствии с оптимальным правилом (6) будет определяться выражением:

$$\Lambda(\dots)$$

Следовательно, задача позиционирования сводится к поиску  $r$ , удовлетворяющего решению функционала 9 для случая однолучевого распространения сигнала [9].

Однако согласно предложенной модели канала связи на рис. 1, приемник имеет сложную структуру для приема разнесенных путей распространяемого сигнала (многолучевость) [10]. Необходимо учитывать такую сложную структуру передаваемого радиосигнала для выяснения наиболее сильной компоненты, по которой будет происходить нахождение искомого  $r$ .

Решение задачи сводится к определению решающей схемы, по вычислению условия 9 и дальнейшему определению искомого расстояния  $r$ . В соответствии с традиционным методом решения [11], время наблюдения  $t$   $[0, T]$  разобьем на отдельные участки с частотой дискретизации  $\Delta t_d$ . В силу указанных допущений нетрудно видеть, что 8 гауссовские нестационарные процессы с дисперсией  $\sigma^2 = N_0 \Delta f$ . Для представления этих процессов в виде стационарных гауссовских процессов разбиваем ось времени на сечения с шагом дискретизации  $\Delta t_d$ .

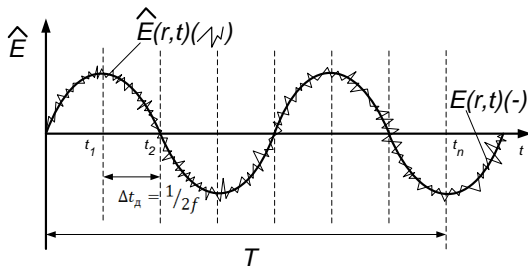


Рис. 2. Представление передаваемого сигнала

На рис. 2 исходный сигнал  $E(r,t)$  представлен в виде синусоиды, а сигнал, подвергшийся действию помех  $\hat{E}(r,t)$ , изображен в виде ломаной синусоиды. Функции сечения в точках  $t_1, t_2, \dots, t_n$  через шаг дискретизации  $\Delta t_d$ . В каждой точке значения функции  $\hat{E}(r,t)$ , – случайные величины. Тогда, согласно (4)  $N$ -мерная условная плотность вероятности для взятых отсчетов будет представлена в виде функционала:

$$\Lambda(\dots) \quad (10)$$

где  $t_i$  –  $i$ -й момент в интервале  $[0, T]$ ;  $T$  – время существования пилотного сигнала;  $N$  – количество «срезов» сигнала на интервале  $[0, T]$ .

Критерием приема сигнала будет:

Решением 9, с учетом 10, после тождественных преобразований получаем:

$$\dots$$

С учетом вышеописанного (12) после всех преобразований примет вид:

$$\dots$$

– является комплексной функцией и необходимо уйти от такой формы представления функционала. С учетом вышеизложенного, рассмотрим  $|\Lambda(r,t)|^2 \rightarrow 0$ , но в силу ограничений (гауссовский шум, известных параметров распространения луча, коэффициенты), в силу неотрицательности получаемых значений модуля:

Алгоритм, перебирая все возможные значения  $r$  вдоль распространения луча, выбирает

Схема оптимального приёмника сигналов, использующая указанный способ определения  $r$  по сильной компоненте, выглядит, как показано на рис. 3. Значение  $r$  подбирается таким обра-

зом, чтобы сигнал на входе приемника максимально соответствовал сигналу на выходе передатчика.

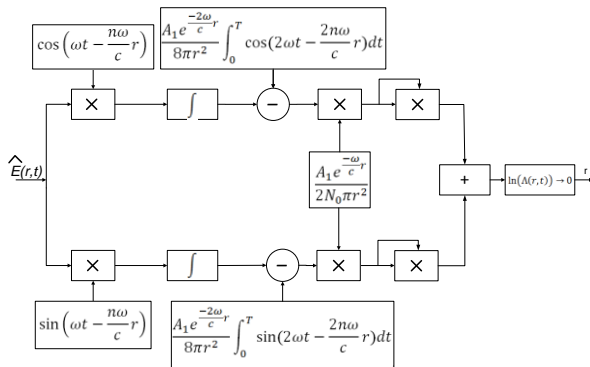


Рис. 3. Схема оптимального приемника

Приемник имеет сложную структуру для приема разнесенных путей распространяемого сигнала (многолучевость), то есть прием сигнала осуществляется с нескольких направлений. Задача вычисления  $r$  требует решения подзадачи выделения наиболее сильной компоненты сигнала (из множества принимаемых) в оптимальном приемнике.

Многолучевость – это эффект, наблюдаемый при распространении сигнала, возникающий при существовании в точке приема радиосигнала не только прямого, но и целого ряда отраженных лучей. Эти сигналы, приходящие различными путями, слабо коррелированы. Влияние замираний будет снижено, если скомбинировать такие сигналы. Для этого необходимо разделить сигналы, приходящие по разным лучам. Описанная задача уже решена с помощью РАКЕ-приемников [10]. Суть работы такого приемника заключается в следующем: принимаемое колебание поступает на  $N$  параллельных корреляторов, на входы которых подаются опорные сигналы, представляющие собой копии сигнала с временными сдвигами. На выходе каждого коррелятора формируется отсчет отклика на соответствующую компоненту входного сигнала. Полученные отсчеты поступают на устройство комбинирования и наблюдаются сдвинутые во времени многолучевые компоненты.

В работе, чтобы учесть многолучевость распространения радиосигнала (его отраженные и переотраженные копии, приходящие на приемник), представим распределение энергии его отдельных компонент согласно распределению Райса (рис. 4), которое часто используют для описания амплитудных флуктуаций радиосигнала [11]

где  $k$  – количество лучей многолучевого сигнала;  $P_i$  – вес  $i$ -того луча.

Учитывая вышесказанное, функционал для нахождения  $r$  по наиболее сильной компоненте:

$$- - - - - \quad (17)$$

где  $T$  – время существования пилотного сигнала;  $k$  – количество лучей многолучевости;  $P_l$  – вес данного луча, согласно 16;  $A_l$  – значение напряженности в точке излучения;  $r_l$  – расстояние по направлению  $l$ -го направления распространения сигнала,  $r$  – искомая величина.

Полученный (17) функционал решается уравнением

$$- - - - - \quad (18)$$

Полученные  $E$ ,  $r$  и будут являться решением всей задачи.

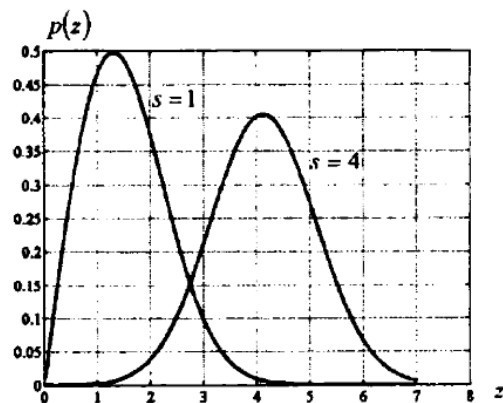


Рис. 4. Плотность вероятности распределения Райса

Чтобы учесть эффект многолучевости радиосигнала, примем

$$- - - - - \quad (19)$$

где  $P_l$  – вес соответствующего луча, выбранный согласно распределения Релея;  $r_l$  – расстояние, которое прошел данный луч от передатчика до приемника;  $r_{\text{ср}}$  – искомое, усредненное расстояние от источника сигнала до приемника;  $T$  – время существования пилотного сигнала.

Убрав мнимую часть (считается, что фаза сигнала не меняется), заметно упрощаем подынтегральное выражение для выполнения расчетов:

Значение под интегралом не зависит от  $t$ , и формула принимает вид:

$$\dots \dots \dots (22)$$

Преобразуя выражение 18, получаем:

$$\dots \dots \dots (23)$$

Из выражения (17):

$$\dots \dots \dots$$

Алгоритм повышения точности позиционирования объектов на основе волновых уравнения Гельмгольца сводится к следующим шагам:

**Шаг 1.** Определение числа лучей при многолучевом приеме радиосигнала.

**Шаг 2.** Составление функционала  $J_0$  для определения  $r$  в оптимальном приемнике (см. рис. 3) по каждому лучу шага 1.

**Шаг 3.** Выделение наиболее сильной компоненты многолучевого сигнала и вычисление искомого значения  $r$  из 24.

**Пример.** Берется три луча, имитирующих прямое и несколько отраженных направлений прихода сигнала на приемник. Согласно распределению Райса, коэффициенты веса данных лучей распределяются по формуле (14).

Принимаем вес лучей за  $P_1 = 0,35, P_2 = 0,4, P_3 = 0,25$ . Соответствующие им расстояния хода луча –  $r_1 = 23$  м,  $r_2 = 20$  м,  $r_3 = 17$  м. Частота излучения принимается за  $f = 100$  МГц.

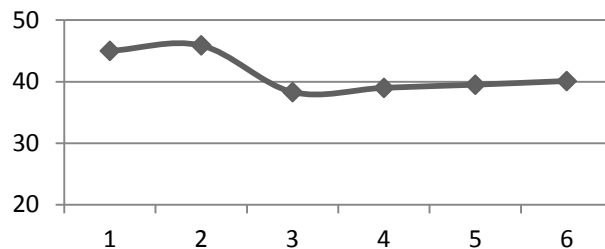
В таблице представлены значения количества лучей и среднее значение расстояний, соответствующие каждому моделированию. На

рис. 5 представлена зависимость значений среднего искомого расстояния от количества лучей, приходящих на приемник.

Таблица

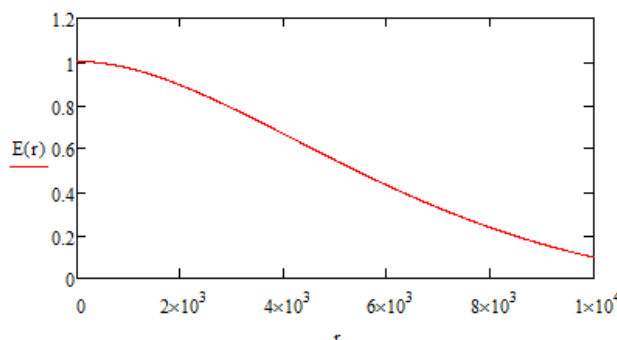
**Зависимость искомого расстояния от количества лучей**

Кол-во составляющих сигнал лучей	Среднее значение искомого расстояния
1	45
2	45,9
3	38,3
4	38,99
5	39,5
6	40,1



**Рис. 5.** Зависимость  $r$  от количества лучей

На рис. 6 представлена зависимость напряженности электромагнитного поля сигнала от расстояния между источником и абонентом сети. Зависимость не противоречит законам физики о распространении сигналов в свободном пространстве.



**Рис. 6.** Зависимость напряженности электромагнитного поля от расстояния

**ВЫВОДЫ**

Описанный выше способ учитывает различные дополнительные критерии среды распространения радиосигнала (турбулентность среды, многолучевость, волновой характер распространения радиосигнала). В общем, данный способ представляет собой сложную математи-

ческую модель распространения сигнала в пространстве, решение которой требует достаточно высоких вычислительных ресурсов и понимания сложных физических процессов, входящих в состав уравнения Гельмгольца. Эти особенности значительно усложняют реализацию способа. Еще одним преимуществом данного способа позиционирования является его совместимость с существующими схемами корреляционного приема сигналов.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Сошников А. А., Воробьев Н. П., Титов Е. В.** Контроль электромагнитной обстановки на объектах с источниками электромагнитных излучений // Ползуновский вестник. 2012, № 4. С. 64-68. [[ A. A. Soshnikov, N. P. Vorob'ev, T. E. Titov "Control of electromagnetic environment at sites with sources of electromagnetic radiation" (in Russian), in *Polzunovski vestnik*, no. 4, pp. 64-68, 2012]]
2. **Хохлов Р. В., Ахманов С. А.** Проблемы нелинейной оптики (электромагнитные волны в нелинейных диспергирующих средах). М.: АН СССР, 1964. 298 с. [[ R. V. Khokhlov and S. A. Akhmanov, *Problems of nonlinear optics (electromagnetic waves in nonlinear dispersive media)*, (in Russian). Moscow: AN SSSR, 1964. ]]
3. **Зотов К. Н.** Повышение эффективности систем соотой связи на основе релевантной кластеризации местоположения мобильных станций: автореф. ... канд. техн. наук / Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. Уфа, 2014. [[ K. N. Zotov, *Efficiency cellular systems based clustering relevant location of mobile stations*, (in Russian). Ufa: UGATU, 2014. ]]
4. **Виноградова М. Б., Руденко О. В., Сухоруков А. П.** Теория волн. М.: Наука, 1979. 382 с. [M. B. Vinogradova, O. V. Rudenko, and A. P. Sykhorukova, *Wave theory*, (in Russian). Moscow: Nauka, 1979. ]]
5. **Арановский К. Ю.** Радиотехнические системы. М.: Высшая школа, 1979. 336 с. [[ K. U. Aranovskiy, *Radio system*, (in Russian). Moscow: Vysshaya shkola, 1979. ]]
6. **Грауэрт Г., Либ И., Фишер В.** Дифференциальное и интегральное исчисление. М.: Мир, 1971. 680 с. [[ G. Grauerd, I. Lib, and V. Fisher, *Differential and integral calculus*, (in Russian). Moscow: Mir, 1971. ]]
7. **Кловский Д. Д.** Теория электрической связи. М.: Радио и связь, 1999. 432 с. [[ D. D. Klovskiy, *Theory of electrical communication*, (in Russian). Moscow: Radio i svyaz', 1999. ]]
8. **Скляр Б.** Цифровая связь. М.: Вильямс, 2003. 1104 с. [[ B. Sklyar, *Digital communication*, (in Russian). Moscow: Vil'yams, 2003. ]]
9. **Петров А. И.** Статическая теория радиотехнических систем. М.: Радиотехника, 2003. 400 с. [[ A. I. Petrov, *Statistical theory of radio systems*, (in Russian). Moscow: Radiotekhnika, 2003. ]]
10. **Зотов К. Н., Кузнецов И. В.** Разработка алгоритма повышения точности позиционирования мобильных станций на основе расчета статистических параметров электромагнитного поля в неоднородной среде // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 2 (55). С. 14-19. [[ K. N. Zotov and I. V. Kyznetsov, "The development of an algorithm to improve the positioning accuracy of mobile stations based on the cal-

ulation of the statistical parameters of the electromagnetic field in an inhomogeneous medium," (in Russian), in *Vestnik UGATU*, vol. 17, no. 2 (55), pp. 14-19, 2013. ]]

11. **Кузнецов И. В., Зотов К. Н.** Повышение точности позиционирования мобильных станций на основе расчета статических параметров электромагнитного поля с использованием уравнений Максвелла // Электротехнические и информационные комплексы и системы. 2013. Т. 9, № 1. С. 89-92. [[ K. N. Zotov and I. V. Kyznetsov, "Improving the accuracy of positioning mobile stations based on the calculation of the statistical parameters of the electromagnetic field using Maxwell's equations," (in Russian), in *Elektrotekhnicheskie i informatsionnye komplekсы i sistemy*, vol. 9, no. 1, pp. 89-92, 2013. ]]

#### ОБ АВТОРАХ

**ЗОТОВ Кирилл Николаевич**, преп. каф. телекоммуникационных систем. Дипл. инж. (УГАТУ, 2005). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2014). Иссл. в обл. систем автоматического управления и телекоммуникационных систем.

**КУЗНЕЦОВ Игорь Васильевич**, проф. каф. телекоммуникационных систем. Дипл. инж. эл. техники. Д-р техн. наук (УГАТУ, 2009). Иссл. в обл. систем автоматического управления и телекоммуникационных систем.

**АКУЛЬШИН Виктор Николаевич**, дир. филиала «Уфимская ГТС». Дипл. инж. (КЭИС, 1980). Канд. техн. наук (УГАТУ, 2006). Иссл. в обл. волоконно-оптических многоканальных систем связи.

**ГУМЕРОВА Ильзира Исламовна**, студ. спец. Инфокоммуникационные технологии и системы связи.

#### METADATA

**Title:** Development algorithm to improve the positioning accuracy of the mobile station based on the calculation static electromagnetic field parameters in inhomogeneous media

**Authors:** K. N. Zotov, I. V. Kuznetsov, V. N. Akulshin, I. I. Gumerova.

**Affiliation:**

Ufa State Aviation Technical University (UGATU), Russia; Bashtel, Russia.

**Email:** zkn2002@inbox.ru, tks@ugatu.ac.ru, lzira.08@mail.ru

**Language:** Russian.

**Source:** Vestnik UGATU (scientific journal of Ufa State Aviation Technical University), vol. 19, no. 1 (67), pp. 132-137, 2015. ISSN 2225-2789 (Online), ISSN 1992-6502 (Print).

**About authors:**

**ZOTOV, Kirill Nikolaevich**, Postgrad. (PhD) Student (UGATU, 2005). Dept. of Automated Systems and Telecommunication Systems (UGATU, 2014).

**KUZNETSOV, Igor Vasilievich**, Prof., Dept. of Telecommunication Systems. Dipl. Radio engineer. Dr. of Tech. Sci. (UGATU, 2009).

**AKULSHIN, Victor Nikolaevich**, Candidate of Engineering Sciences (UGATU, 2006).

**GUMEROVA, Ilzira Islamovna**, student.