

DOI: 10.17122/ntj-oil-2019-4-104-110

УДК 622.692.4

Л.И. Быков, Д.А. Гулин, А.Г. Гумеров, И.Ф. Махмудова, А.М. Шаммазов  
(Уфимский государственный нефтяной технический университет, Уфа,  
Российская Федерация)

## МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ РАСЧЕТНАЯ СХЕМА БАЛОЧНОГО ПЕРЕХОДА ТРУБОПРОВОДА С КОМПЕНСАТОРАМИ

Leonid I. Bykov, Denis A. Gulin, Asgat G. Gumerov, Indira F. Makhmudova,  
Ayrat M. Shammazov (Ufa State Petroleum Technological University,  
Ufa, Russian Federation)

### MODERNIZED CALCULATED SCHEME OF BALL TRANSFER PIPELINE WITH COMPENSATORS

#### Введение

На данный момент расчетные схемы надземных балочных переходов с компенсацией температурных деформаций не отражают действительного положения трубопровода на местности. В связи с этим анализ исследований в этой области и создание новой схемы особенно актуальны.

#### Цели и задачи

Цели исследования - определение напряженного состояния перехода и расчет оптимальной длины компенсаторов.

Для достижения данных целей поставлены следующие задачи:

- анализ существующих методов расчета и оценки напряженно-деформированного состояния в опасных сечениях трубопроводного перехода;
- разработка альтернативного метода расчета.

#### Методы

В качестве основного метода используется сравнительный анализ. Для создания расчётной схемы применяются методы строительной механики, а также программное обеспечение Maple 18.

#### Background

Currently, the design of temperature compensated above-ground beam crossings does not reflect the actual position of the pipeline in the field. In this regard, the analysis of research in this area and the creation of a new scheme are particularly relevant.

#### Aims and Objectives

The study aim is to determine the stress state of the transition and calculate the optimal length of the compensators.

To achieve this aims, the following tasks are set:

- analysis of the existing methods of calculation and assessment of the stress-strain state in the hazardous sections of the pipeline crossing;
- development of an alternative method of calculation.

#### Methods

Comparative analysis is used as the main method. For creation of the settlement scheme methods of building mechanics, and also software Maple 18 are applied.

### Результаты

В результате проведенного анализа исследований напряженно-деформированного состояния балочных переходов с использованием компенсаторов продольных деформаций были изучены различные условия работы трубопроводов, рассмотрены конструктивные схемы и методика их расчета, проанализированы данные использования компенсаторов в трубопроводном транспорте.

На основании выявленных недостатков существующих методов расчета предложена схема, представляющая собой статически неопределимую рамную конструкцию, получена зависимость длины консольной части от пролета для некоторых размеров труб.

### Results

As a result of the carried out analysis of the research of the stress-strain state of beam transitions with the use of expansion joints of longitudinal deformations, various conditions of pipelines operation were studied, structural schemes and methods of their calculation were considered, data of expansion joints use in pipeline transport were analyzed.

It was offered, the dependence of the length of the cantilever part on the span for some sizes of pipes is received on the basis of the revealed drawbacks of the existing methods of calculation the scheme representing a statically undefined frame construction.

---

**Ключевые слова:** балочный переход трубопровода; компенсатор; напряженно-деформированное состояние

**Key words:** pipeline beam overpass; compensator; stress-strain state

---

Надземные балочные трубопроводные переходы используются при пересечении мелких рек, оврагов и других естественных и искусственных препятствий. Наиболее рационально их применение при ширине препятствий 10-100 м. В конструктивном отношении они могут быть выполнены одно- и многопролетными, при наличии или отсутствии компенсирующих устройств [1-4].

Оптимальной считается конструкция, в которой максимальный изгибающий момент в середине пролета и момент на опоре равны по абсолютной величине, т.е. конструкция равнопрочна. Согласно [1, 5], это достигается в случае, когда длина консоли  $a = 0,354 \cdot l$  (рисунок 1).

Рассмотренная расчетная схема представляет собой неразрезную балку на опорах, тогда как в действительности балочный переход с компенсаторами имеет Г- или П-образный вид [6-8].

Предлагается использовать расчетную схему, основанную на правилах строительной механики [9, 10]: статически неопределимая рамная конструкция - однопролетный балочный переход с Г-образными компенсаторами (рисунок 2). Так как представленная система статически неопределимая, для решения данной задачи используется метод сил, решение полученной системы канонических уравнений предлагается производить с помощью системы компьютерной математики Maple 18 [11].

При решении данной задачи сделаны следующие допущения:

- возможные перемещения подземных участков не учитываются (заделки неподвижны),  $\Delta A = \Delta K = 0$ ;
- не учитывается изменение температуры окружающей среды при выходе трубопровода на дневную поверхность (температура подземной части трубо-

провода не влияет на температуру надземной части),  $\Delta t = 0$ .

Расчет вылета компенсатора был произведен в соответствии с [12]. Для раскрытия статической неопределенности был использован метод сил. Так как число внешних реакций связей равно 9, количество уравнений статического равновесия на плоскости - 3, то степень статической неопределенности:  $n = 9 - 3 = 6$ .

Для нахождения избыточных реакций связей была составлена система из шести уравнений совместности деформаций.

В качестве основной системы была выбрана схема (рисунок 3, а) с избыточными связями в точках А, С, D.

Эквивалентная система с реакциями отброшенных связей и внешними нагрузками приведена на рисунке 3, б.

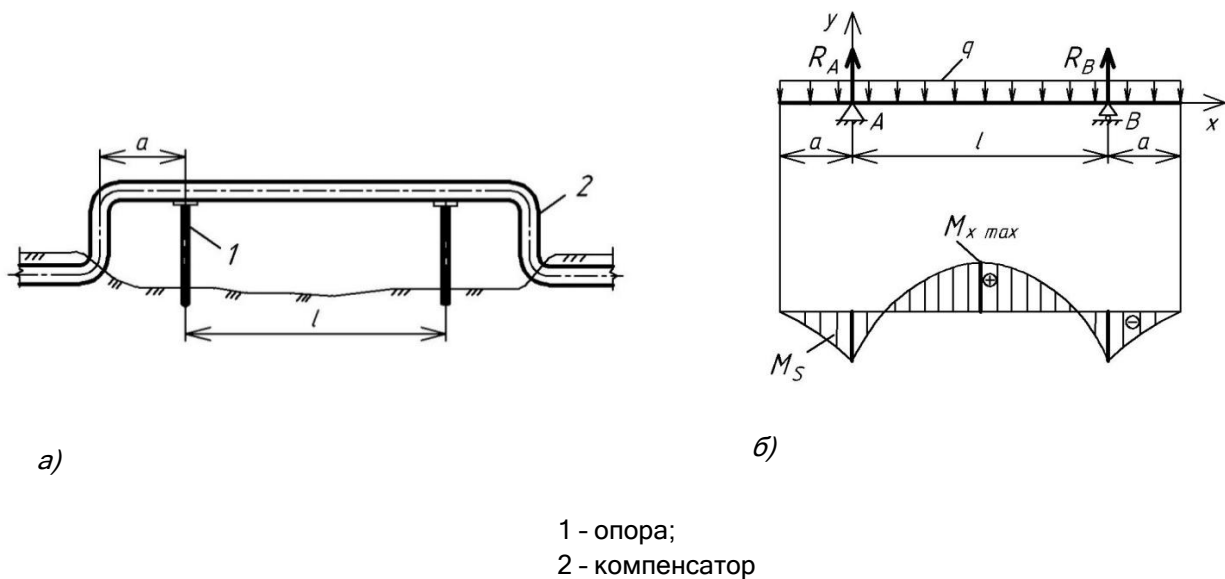


Рисунок 1. Однопролетный двухконсольный балочный переход с компенсаторами: конструкция перехода (а); расчетная схема (б)

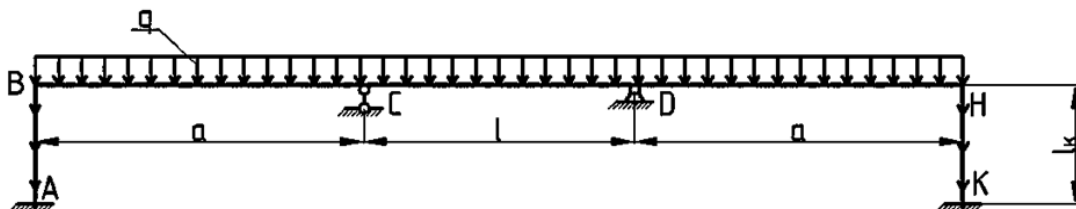
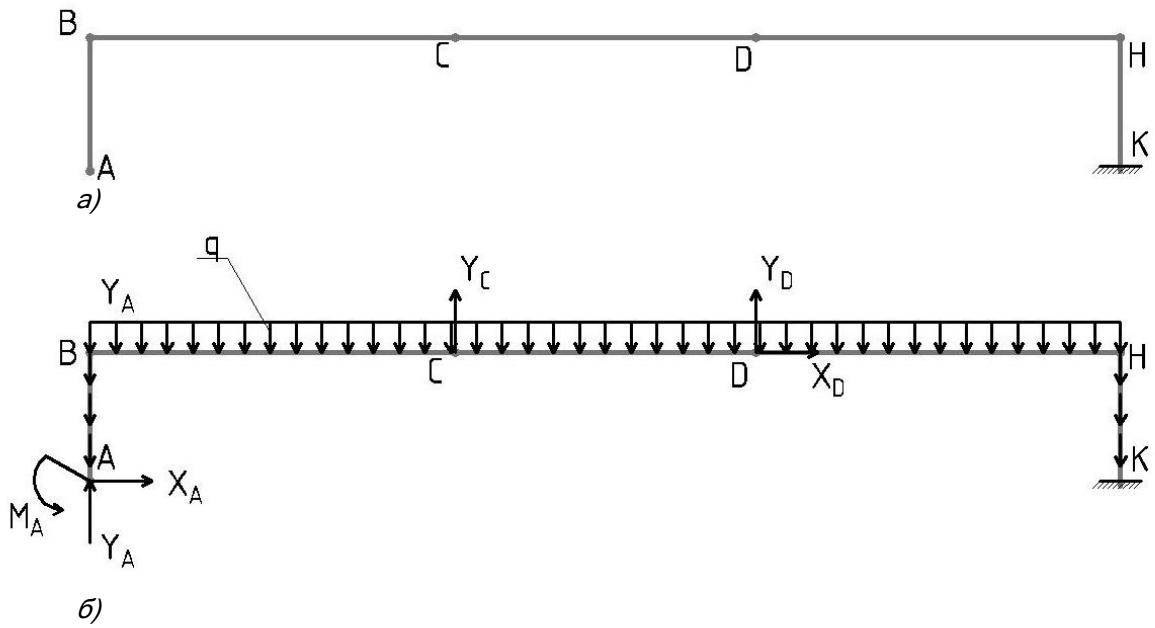


Рисунок 2. Усовершенствованная расчетная схема однопролетного балочного перехода



а) основная система;  
б) эквивалентная система

Рисунок 3. Схема для расчетов

Система из шести канонических уравнений:

$$\begin{cases} M_A \cdot \delta_{1M_A} + Y_A \cdot \delta_{1Y_A} + X_A \cdot \delta_{1X_A} + Y_C \cdot \delta_{1Y_C} + Y_D \cdot \delta_{1Y_D} + X_D \cdot \delta_{1Y_D} + \delta_{1F} = 0 \\ M_A \cdot \delta_{2M_A} + Y_A \cdot \delta_{2Y_A} + X_A \cdot \delta_{2X_A} + Y_C \cdot \delta_{2Y_C} + Y_D \cdot \delta_{2Y_D} + X_D \cdot \delta_{2Y_D} + \delta_{2F} = 0 \\ \dots \\ M_A \cdot \delta_{6M_A} + Y_A \cdot \delta_{6Y_A} + X_A \cdot \delta_{6X_A} + Y_C \cdot \delta_{6Y_C} + Y_D \cdot \delta_{6Y_D} + X_D \cdot \delta_{6Y_D} + \delta_{6F} = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

где  $M_A$  - момент силы в отброшенной связи A;

$Y_A, X_A, Y_C, Y_D, X_D$  - реакции в отброшенных связях A, C, D соответственно;

$\delta_{ij(F)}$  - перемещение точки приложения реакции по направлению  $i=1...6$  от единичной силы (единичного момента силы)  $J$  или от внешней нагрузки  $F$ .

Для нахождения перемещений  $\delta_{ij}$  были использованы правило Верещагина и интеграл Максвелла-Мора:

$$\delta_{ij(F)} = \int \frac{M_z^{J_i} \cdot M_z^{J_j(F)}}{E \cdot I_z} dx, \quad (2)$$

где  $M_z^i$  - момент от единичной силы  $J_i$ , приложенный к основной системе по направлению  $i$ ;  $M_z^{J(F)}$  - момент от единичной силы  $J_j$  по направлению  $j$  или от внешней нагрузки  $F$ ;

$E$  - модуль Юнга;  $I_z$  - момент инерции относительно оси  $Z$ .

Найденные реакции связей позволили построить эпюры изгибающих моментов и приравнять максимальный изгибающий момент в середине пролета и момент на опоре для нахождения нового соотношения  $a/l$ .

В результате проведенных исследований получена зависимость длины консольной части  $a$  от пролета  $l$  для некоторых размеров труб, представленная в виде номограммы (рисунок 4).

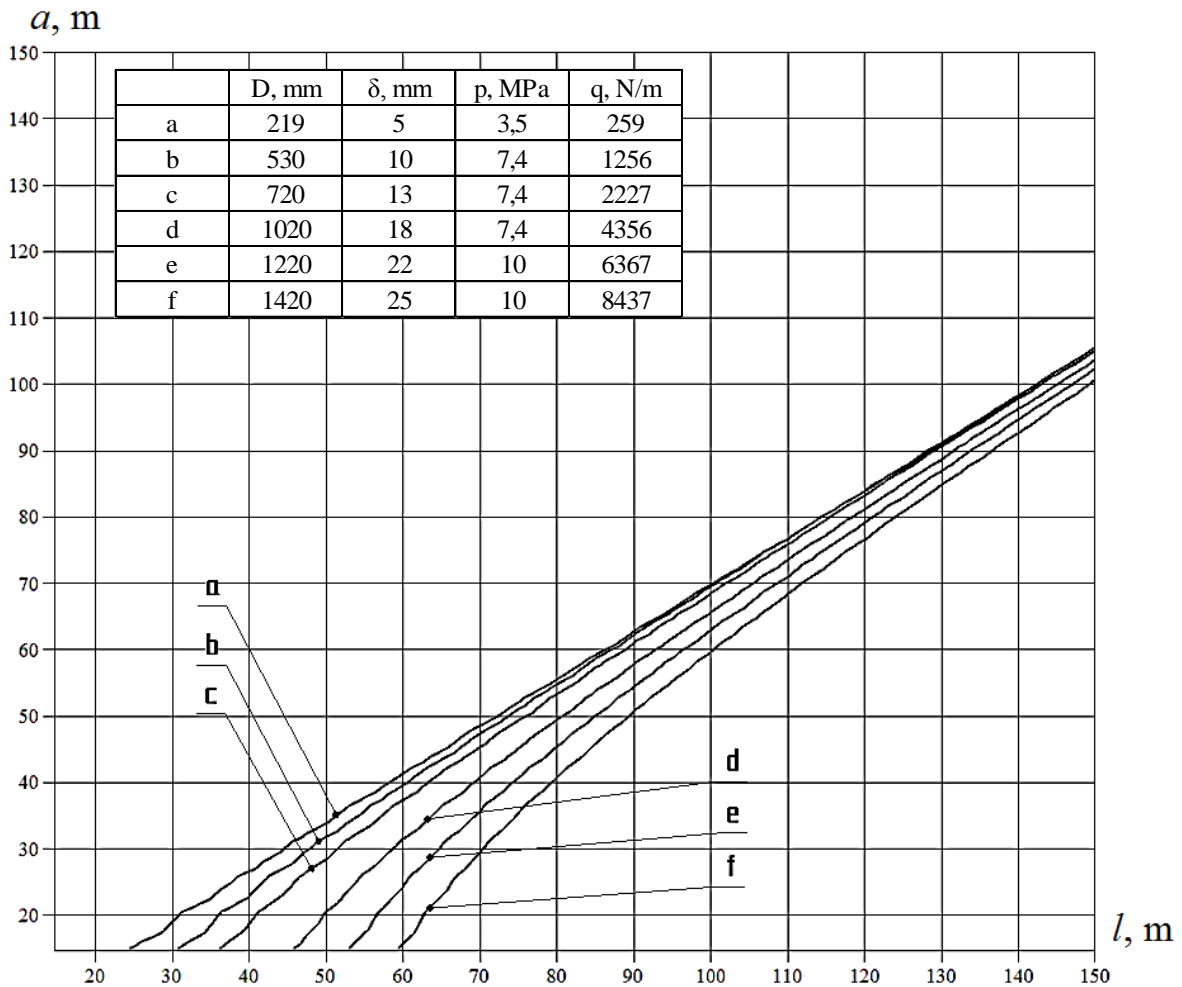


Рисунок 4. Зависимости длины консольной части  $a$  от пролета  $l$  для некоторых размеров труб

Полученные зависимости могут быть предложены для расчета консольных участков пролетного сооружения при проектировании надземных балочных трубопроводных переходов с компенсаторами.

### Выводы

В результате проведенного анализа исследований напряженно-деформированного состояния балочных переходов с использованием компенсаторов продольных деформаций были изучены различные условия работы трубопроводов, рассмотрены конструктивные схемы и методика их

расчета, проанализированы данные использования компенсаторов в трубопроводном транспорте.

На основании выявленных недостатков существующих методов расчета предложена схема, представляющая собой статически неопределимую рамную конструкцию, получена зависимость длины консольной части от пролета для некоторых размеров труб. Полученные зависимости могут быть предложены для расчета консольных участков пролетного сооружения при проектировании надземных балочных трубопроводных переходов с компенсаторами.

### Список литературы

1. Быков Л.И. Типовые расчеты при проектировании, строительстве и ремонте газонефтепроводов. СПб.: Недра, 2011. 748 с.
2. George A.A. *Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair*. USA., 2003.
3. Ellenberger P. *Piping and Pipeline Calculations Manual // Construction, Design Fabrication and Examination*. 2nd ed. Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2014. XIII. 398 p.
4. Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16). USA: American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.
5. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промышленных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: Недра, 1991. 287 с.
6. Кузьбожев А.С. Балочные переходы. Методы расчета и реконструкции на стадии эксплуатации трубопровода. Ухта: УГТУ, 2013. 111 с.
7. Петров И.П. Надземная прокладка трубопроводов. М.: Недра, 1965. 447 с.
8. Howard F.R. *Piping Design for Process Plants*. USA: John Wiley & Sons, 1963. 295 p.
9. Феодосьев В.И. Сопrotivlenie материалов. М.: МГТУ, 1999. 592 с.
10. Langhaar, H.L. *Energy Methods in Applied Mechanics*. Krieger, 1989.
11. Maple Learning Guide, Based in part on the work of B. W. Char. Maplesoft, a Division of Waterloo Maple Inc., 2003.
12. СП 36.13330.2012. Магистральные трубопроводы (Актуализированная редакция СНиП 2.05.06-85\*). М.: ФАУ «ФЦС», 2013. 93 с.

### References

1. Bykov L.I. *Tipovye raschety pri proektirovanii, stroitel'stve i remonte gazonefteprovodov* [Typical Calculations for Design, Construction and Repair of Oil and Gas Pipelines]. Saint-Petersburg, Nedra Publ., 2011. 748 p. [in Russian].
2. George A.A. *Piping and Pipeline Engineering Design, Construction, Maintenance, Integrity, and Repair*. USA, 2003.
3. Ellenberger P. *Piping and Pipeline Calculations Manual. Construction, Design Fabrication and Examination*. 2nd ed., Butterworth-Heinemann, Elsevier, 2014, XIII, 398 p.
4. *Specification for Structural Steel Buildings (ANSI/AISC 360-16)*. USA, American Institute of Steel Construction (AISC), 2016.
5. Ainbinder A.B. *Raschet magistral'nykh i promyslovyykh truboprovodov na prochnost' i ustoychivost'* [Calculation of Main and Field Pipelines for Strength and Stability]. Moscow, Nedra Publ., 1991. 287 p. [in Russian].
6. Kuz'bozhev A.S. *Balochnye perekhody. Metody rascheta i rekonstruktsii na stadii ekspluatatsii truboprovoda* [Beam Transitions. The Methods of Calculation and the Reconstruction Stage of the Pipeline]. Ukhta, USTU, 2013. 111 p. [in Russian].
7. Petrov I.P. *Nadzemnaya prokladka truboprovodov* [Overhead Piping]. Moscow, Nedra Publ., 1965. 447 p. [in Russian].
8. Howard F.R. *Piping Design for Process Plants*. USA, John Wiley & Sons. 1963. 295 p.
9. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Mpscpw, MSTU, 1999. 592 p. [in Russian].
10. Langhaar H.L. *Energy Methods in Applied Mechanics*. Krieger, 1989.
11. *Maple Learning Guide, Based in Part on the Work of B.W. Char*. Maplesoft, a Division of Waterloo Maple Inc., 2003.

12. SP 36.13330.2012. *Magistral'nye truboprovody (Aktualizirovannaya redaktsiya SNIp 2.05.06-85\*)* [SP 36.13330.2012. Pipelines (Updated Version SNIp 2.05.06-85\*)]. Moscow, Federal Centre for Rationing, 2013. 93 p. [in Russian].

#### Авторы

• Быков Леонид Иванович, д-р техн. наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: st@rusoil.net

• Гулин Денис Алексеевич  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Старший преподаватель кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: denis.ufa@list.ru

• Гумеров Асгат Галимьянович, д-р техн. наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Профессор кафедры «Сооружение и ремонт газонефтепроводов и газонефтехранилищ»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: gumerov@anrb.ru

• Махмудова Индира Фанилевна  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Студент кафедры «Транспорт и хранение нефти и газа»  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: maxmudova\_indira@bk.ru

• Шаммазов Айрат Мингазович, д-р техн. наук, профессор  
Уфимский государственный нефтяной технический университет  
Президент  
Российская Федерация, 450062, г. Уфа, ул. Космонавтов, 1  
e-mail: ashammazov@mail.ru

#### The Authors

• Bykov Leonid I., Doctor of Engineering Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: st@rusoil.net

• Gulin Denis A.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Senior Lecturer of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: denis.ufa@list.ru

• Gumerov Asgat G., Doctor of Engineering Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
Professor of Construction and Repair of Gas and Oil Pipelines and Gas and Oil Storage Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: gumerov@anrb.ru

• Makhmudova Indira F.  
Ufa State Petroleum Technological University  
Student of Oil and Gas Transportation and Storage Department  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: maxmudova\_indira@bk.ru

• Shammazov Ayrat M., Doctor of Engineering Sciences, Professor  
Ufa State Petroleum Technological University  
President  
1, Kosmonavtov str., Ufa, 450062,  
Russian Federation  
e-mail: ashammazov@mail.ru