

## **Численный метод в исследовании сейсродинамики сложных систем подземных трубопроводов**

д.т.н. проф. академик АН РУз Рашидов Т.Р., Бекмирзаев Д.А.

*Институт сейсмостойкости сооружений АН РУз*

(+998 71) 262-78-34, tur.rashidov@list.ru, (+998 71) 262-78-34, diyorbek\_84@mail.ru

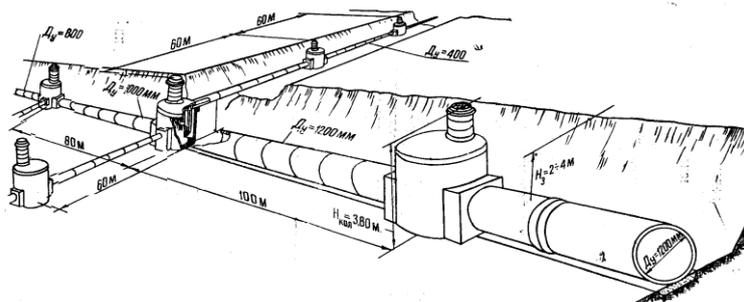
*Аннотация.* В настоящей статье рассмотрены некоторые задачи колебаний сложных систем подземных трубопроводов при сейсмическом нагружении. Полученная система уравнений решается методом конечных разностей второго порядка точности. Программа составлена на основе алгоритма компьютерной реализации на ориентированном языке Borland Delphi 7. Результаты решения приводятся в виде графиков.

*Ключевые слова:* сложные системы подземных трубопроводов, сейсродинамика, сейсмическое воздействие, взаимодействие в системе «труба – грунт», метод конечных разностей.

В работе [1] разработаны основы динамической теории сейсмостойкости сложных систем подземных трубопроводов. Предполагается, что любое рассматриваемое сооружение является протяженным, разветвляющимся как по простиранию, так и по глубине, со сложными как с жесткими, так и податливыми соединениями, примыканиями труб в сложном узле (рисунок 1).

Предлагается теория, схематизирующая подземное сооружение как совокупность взаимодействующих с грунтом балочно-рамных конструкций и жестких массивных тел, обладающих шестью степенями свободы. Удлиненные стыкуемые между собой участки представляют собой трубопроводы, тоннели, каналы, заглубленные фундаменты и пр. и рассматриваются как брусья (балки), работающие на растяжение – сжатие, изгиб и кручение и взаимодействующие с узловыми сооружениями [2].

«Сложной системой называется система трубопроводов и сооружений, различным образом стыкуемых в сложных узлах, с учетом важнейших особенностей комплекса и характера строительства (типичный пример показан на рисунке 1). Сложными узлами, в частности, являются различные смотровые колодцы, места разветвлений, поворотов, всевозможные варианты стыковок, крепления и пр.» [1, 2].



**Рисунок 1. Вариант сложной системы подземных сооружений**

В сейсродинамике подземных сооружений на первый план выходит, с одной стороны, – конструктивная особенность сооружения, а с другой – оценка характера взаимодействия в системе «сооружение-грунт», разновидности моделей взаимодействия в этой системе.

Упрощенный метод исследования сейсродинамики сложных подземных систем сводит общую задачу к независимым задачам продольного движения основных трубопроводов с усложненными условиями стыковки в узлах и приближает ее к достаточно изученной задаче продольных колебаний подземного трубопровода [1, 2]. При движении летательных аппаратов в воздухе, обнаруженные так называемые до и сверхзвуковые скорости применяются при расчете подземного трубопровода на сейсмические нагружения [2, 3]. Современное состояние вычислительных средств позволяют более полно учесть многочисленные факторы и с

большой степенью достоверности определить фактическое напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода.

В последнее время этот вопрос принимает острую актуальность. Накопился достаточный материал, связанный с последствиями сильных землетрясений на системы «трубопровод-грунт», расположенные в грунтах с различными свойствами. В связи с этим проанализированы отечественные и зарубежные работы, в частности материалы XIV (Пекин, 2008) и XV (Лиссабон, 2012) Всемирных конференций по сейсмостойкому строительству и Международной конференции по проектированию в геотехнической инженерии (Токио, 2009), связанные с исследованием систем жизнеобеспечения типа подземных газо-, водо- и нефтепроводов, с целью дополнить разработанную теорию новыми данными, оценить ее результативность и установить новизну настоящей работы [4, 5, 6].

### Постановка задачи и метод решения

Рассматривается задача о продольных колебаниях подземных трубопроводов, имеющих сложные узлы. Известно [1], что система дифференциальных уравнений продольных колебаний подземных трубопроводов, имеющих сложные узлы, имеет следующий вид (здесь в данном случае  $I_y = I_z = 0$ ),

$$\begin{cases} -\rho F \frac{\partial^2 u'}{\partial t^2} + EF \frac{\partial^2 u'}{\partial x^2} - 2\pi R k_x (u' - u_0) = 0, \\ -\rho_1 F_1 \frac{\partial^2 u^0}{\partial t^2} + EF \frac{\partial u'}{\partial x} - EF \frac{\partial u''}{\partial x} - 2\pi R_{uz} H_{uz} k_x^{uz} (u^0 - u_0) = 0, \\ -\rho F \frac{\partial^2 u''}{\partial t^2} + EF \frac{\partial^2 u''}{\partial x^2} - 2\pi R k_x (u'' - u_0) = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где:  $\rho$  – плотность материала трубопровода,  $F$  – площадь его поперечного сечения,  $E$  – модуль упругости материала трубы,  $k_x$  – коэффициент равномерного сдвига трубопровода в грунте,  $k_x^{uz}$  – коэффициент равномерного сдвига узла в грунте,  $R$  – наружный радиус трубы,  $u_0$  – закон движения грунта,  $\rho_1$  – плотность материала узла,  $F_1$  – площадь поперечного сечения узла,  $R_{uz}$  – наружный радиус узла,  $H_{uz}$  – высота узла,  $u', u''$  – абсолютные продольные перемещения трубы,  $u^0$  – абсолютные продольные перемещения узла,  $I_y, I_z$  – осевые моменты инерции.

В первом и третьем уравнениях системы (1) приведены дифференциальные уравнения движений левого и правого трубопровода, связанная со сложным узлом. Во втором уравнении приведено дифференциальное уравнение движения абсолютно жесткого узла (в точечном представлении). Исследуем систему уравнений (1) с помощью метода конечных разностей второго порядка точности.

Переход к безразмерным перемещениям и координатам:

$$u' = \bar{u}'R, \quad u^0 = \bar{u}^0R, \quad u'' = \bar{u}''R, \quad x = \bar{x}l, \quad t = \bar{t}t_0, \quad u_0 = \bar{u}_0R.$$

Получаем следующую систему уравнений в безразмерных параметрах:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial \bar{t}^2} - \frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial \bar{x}^2} + \frac{2\pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} (\bar{u}' - \bar{u}_0) = 0, \\ \frac{\rho_1 F_1}{\rho F l} \frac{\partial^2 \bar{u}^0}{\partial \bar{t}^2} - \frac{\partial \bar{u}'}{\partial \bar{x}} + \frac{\partial \bar{u}''}{\partial \bar{x}} + \frac{2\pi R_{uz} H_{uz} R k_x^{uz} l}{\rho F a_T^2} (\bar{u}^0 - \bar{u}_0) = 0, \\ \frac{\partial^2 \bar{u}''}{\partial \bar{t}^2} - \frac{\partial^2 \bar{u}''}{\partial \bar{x}^2} + \frac{2\pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} (\bar{u}'' - \bar{u}_0) = 0, \end{cases} \quad (2)$$

где:  $a_T = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$ .

Система дифференциальных уравнений (2) с учетом граничных условий решается методом конечных разностей. При этом в основном используется аппроксимация второго порядка точности с центральной разностной схемой [7].

Полученную систему алгебраических уравнений решаем в явной схеме.

$$\begin{aligned} \bar{u}_i^{0j+1} &= \left( 2 - \frac{\tau^2 2\pi R_{uz} h R k_x^{uz} l^2}{\rho_1 F_1 a_T^2} \right) \bar{u}_i^{0j} - \bar{u}_i^{0j-1} + \frac{\tau^2 2\pi R_{uz} h R k_x^{uz} l^2}{\rho_1 F_1 a_T^2} \bar{u}_{0i}^j + \\ &+ \frac{\tau^2 \rho F l}{2h \rho_1 F_1} (\bar{u}'_{i+1}{}^j - \bar{u}'_{i-1}{}^j) - \frac{\tau^2 \rho F l}{2h \rho_1 F_1} (\bar{u}''_{i+1}{}^j - \bar{u}''_{i-1}{}^j), \\ \bar{u}_i'^{j+1} &= \frac{\tau^2}{h^2} \bar{u}'_{i-1}{}^j + \left( 2 - 2\frac{\tau^2}{h^2} - \frac{2\tau^2 \pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} \right) \bar{u}_i'^j + \frac{\tau^2}{h^2} \bar{u}'_{i+1}{}^j - \bar{u}_i'^{j-1} + \frac{2\tau^2 \pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} \bar{u}_{0i}^j, \\ \bar{u}_i''^{j+1} &= \frac{\tau^2}{h^2} \bar{u}''_{i-1}{}^j + \left( 2 - 2\frac{\tau^2}{h^2} - \frac{2\tau^2 \pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} \right) \bar{u}_i''^j + \frac{\tau^2}{h^2} \bar{u}''_{i+1}{}^j - \bar{u}_i''^{j-1} + \frac{2\tau^2 \pi R l^2 k_x}{a_T^2 \rho F} \bar{u}_{0i}^j. \end{aligned} \quad (3)$$

Здесь  $\tau$  – шаг по времени, должен удовлетворять условию Куранта  $\tau \leq \frac{h}{4}$ . На основе разработанных алгоритмов формируется компьютерная реализация решаемых задач.

По своему характеру задачи сейсмодинамики подземных сооружений совпадают с задачами движения самолета в воздушном пространстве. Все ранние вычисления, которые были выполнены на больших ЭВМ, выполнялись в ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского по их программе [8].

### Численное решение задачи

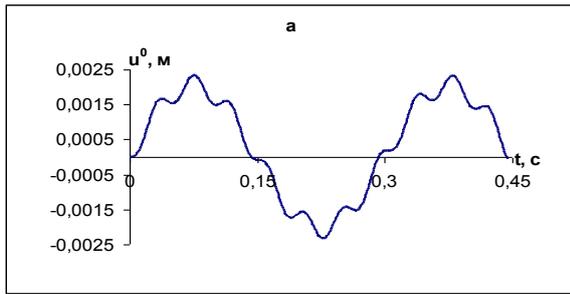
Рассмотрим напряженно-деформированное состояние чугунный подземный трубопровод с зашпеленными концами при сейсмическом воздействии различного вида. На основе разработанного алгоритма сделана компьютерная реализация задачи.

Механические и геометрические параметры подземного трубопровода и грунта приняты:  $E = 1,15 \cdot 10^5$  МПа;  $\rho = 7,2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $F = \frac{\pi(D_H^2 - D_B^2)}{4}$  м<sup>2</sup>;  $D_H = 0,4$  м;  $D_B = 0,39$  м;  $l = 20$  м;  $k_x = 1 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $u_0 = A \sin \omega t$ ;  $A = 0,002$  м;  $\omega = \frac{2\pi}{T}$ ;  $T = 0,3$  с;  $u_0 = \frac{A}{\tilde{i}^4} [\bar{\tau}(2\tilde{i} - \bar{\tau})]^2$

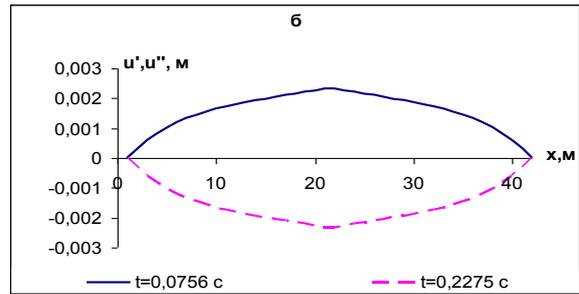
импульсивная нагрузка,  $\tilde{i} = \frac{\tau_0}{2}$ ,  $\bar{\tau} = \frac{C_p t}{l}$ .

Для узла:  $E = 2,5 \cdot 10^4$  МПа;  $\rho = 2 \cdot 10^3$  кг/м<sup>3</sup>;  $D_{Huz} = 1,2$  м;  $D_{Buz} = 1,1$  м;  $F_1 = \frac{\pi(D_{Huz}^2 - D_{Buz}^2)}{4}$  м<sup>2</sup>;  $k_x^{uz} = 2 \cdot 10^4$  кН/м<sup>3</sup>;  $H_{uz} = 1$  м.

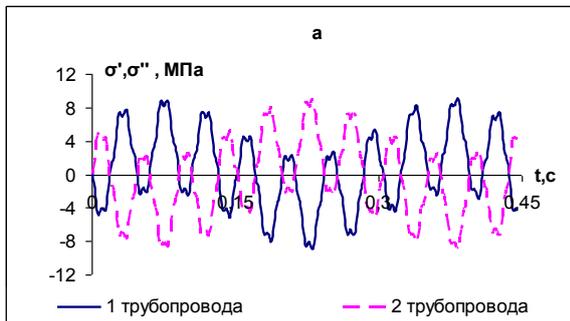
На рисунке 2а приводится зависимость продольного смещения узла при воздействии сейсмической нагрузки вдоль оси трубопровода, изменяющей по закону синусоиды, а на рисунке 2б – изменение перемещения трубопроводов вдоль оси  $x$  при заданном времени.



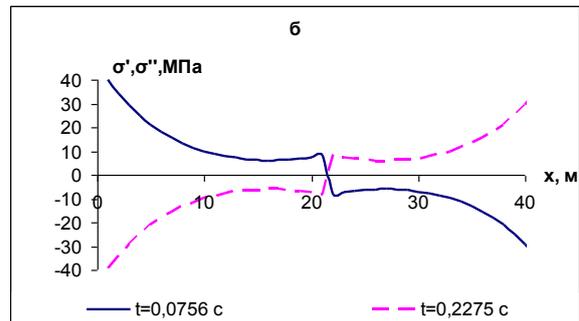
**Рисунок 2а.** Изменения перемещения узла по времени при синусоидальном нагружении трубопровода



**Рисунок 2б.** Изменения перемещений трубопроводов при синусоидальном нагружении вдоль координатной оси  $x$  при заданном времени



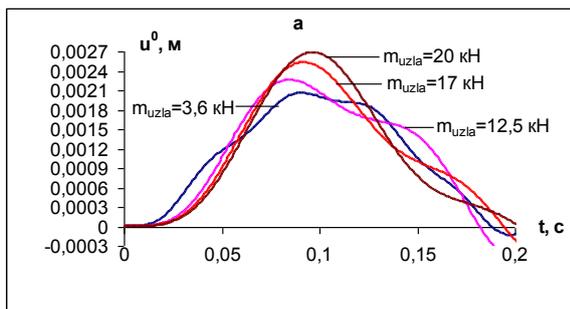
**Рисунок 3а.** Изменение напряжений трубопроводов около узла по времени



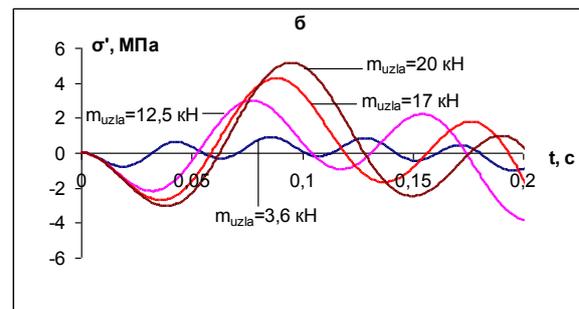
**Рисунок 3б.** Изменения напряжений трубопровода по оси  $x$  при заданном времени и синусоидальном нагружении

Результаты получены при синусоидальном нагружении (рисунок 3а) и (рисунок 3б) которые показывают, что при заданном времени максимальные значения напряжений достигаются на заземленных концах трубопровода.

**$M < 1$**



**Рисунок 4а.** Изменения перемещений узла по времени при разных значениях массы узла (без изменения габаритов) при импульсивном нагружении ( $l = 20$  м)

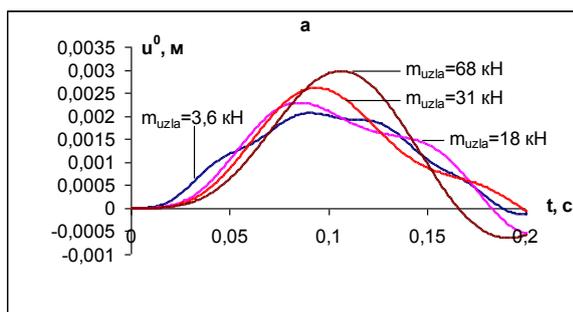


**Рисунок 4б.** Изменения напряжений трубопроводов около узла по времени при изменении массы узла (без изменения габарита)

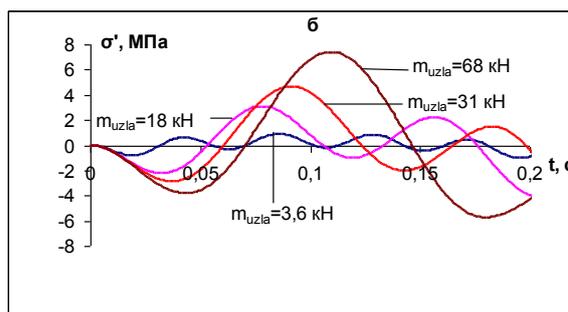
Максимальный эффект взаимодействия с грунтом сосредотачивается в узловых участках при импульсном нагружении трубопровода.

Увеличение массы узла без изменения его габаритов слабо влияет на динамику трубопроводов ( $M < 1$ ,  $C_p = 500$  м/с,  $M > 1$ ,  $C_p = 3500$  м/с,  $M = \frac{C_p}{a_T}$ ,  $C_p$  – распространения сейсмической волны). Здесь  $M$  число Маха (условно названной).

**M<1**



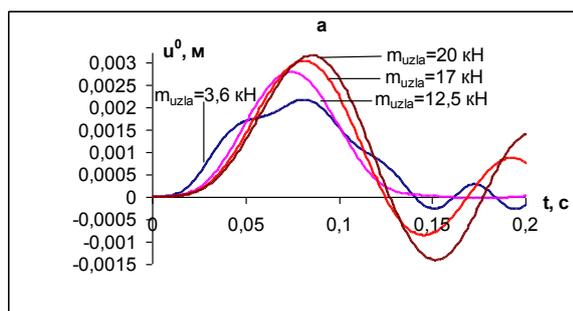
**Рисунок 5а.** Изменение перемещений узла по времени при изменении массы узла (с изменением габарита) при импульсивном нагружении



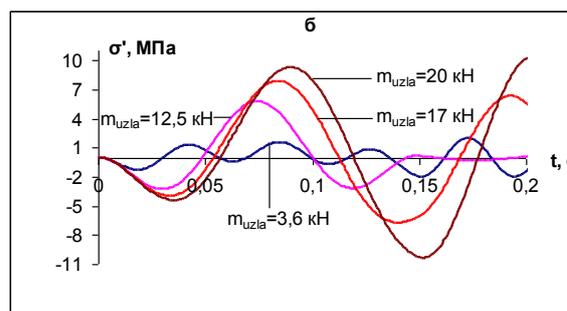
**Рисунок 5б.** Изменение напряжений трубопроводов около узла по времени при изменении массы узла (с изменением габаритов) при импульсивном нагружении

Достаточно сильное влияние обнаруживается, при увеличении массы узла связанное с увеличением его габаритов, следовательно, и значение величины сопротивления движению. Влияние массивности узла сильнее сказывается при резком изменении свойств грунта по длине трубопровода (рис. 4а, 4б, 5а, 5б, 6а, 6б, 7а, 7б).

**M>1**

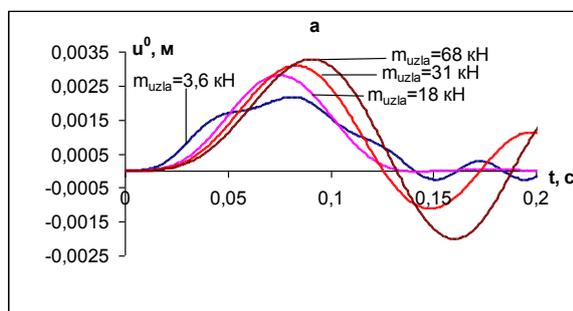


**Рисунок 6а.** Изменения перемещений узла по времени при разных значениях массы узла (без изменения габаритов) при импульсивном нагружении ( $l = 20$  м)

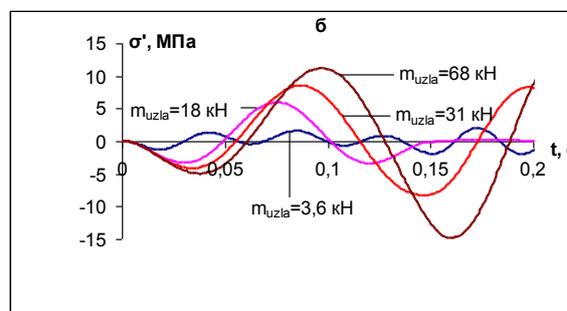


**Рисунок 6б.** Изменения напряжений трубопроводов около узла по времени при изменении массы узла (без изменения габарита)

**M>1**



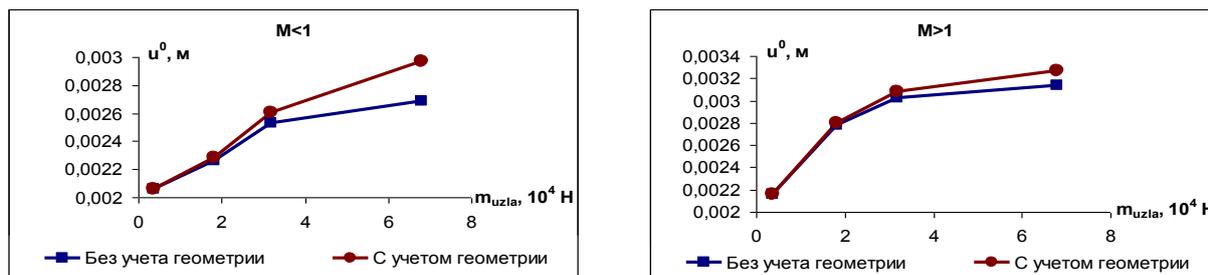
**Рисунок 7а.** Изменение перемещений узла по времени при изменении массы узла (с изменением габарита) при импульсивном нагружении



**Рисунок 7б.** Изменение напряжений трубопроводов около узла по времени при изменении массы узла (с изменением габаритов) при импульсивном нагружении

Нами рассмотрен расчет таких труб, имеющих в узле точечный узел. Здесь приведен

случай, когда меняется масса узла, с и без учета его геометрии (рисунок 8).



**Рисунок 8. Влияние массы узла на динамику трубопровода**

Приведено изменение относительного перемещения в зависимости от изменения массы узла. Как видно из рисунков геометрия узла существенно влияет на напряженно-деформированное состояние подземного трубопровода, следовательно, для расчета подземных сооружений существенно его взаимодействие с грунтом, по сравнению с влиянием силы инерции относительного движения.

### Выводы

Разработан алгоритм и пакет прикладных программ на данном этапе позволяют определить напряженно-деформированное состояние сложной системы подземных трубопроводов при сейсмических воздействиях (для линейных задач) в зависимости от всех параметров: числа Маха (отношение скоростей продольных волн в грунте и трубопроводе), параметров стыковки, характеристик сложного узла (геометрия узла и плотность грунта в узле), глубины заложения, интенсивности сейсмических воздействий и др.

Результаты решения задач можно рекомендовать использовать при проектировании и строительстве подземных трубопроводов в сейсмических регионах и включить в качестве дополнения в нормативный документ КМК-96 (СНиП), раздел «Подземные сооружения». Такая рекомендация будет предложена впервые, и нет никаких сомнений в том, что она займет достойное место в нормативном документе по сейсмостойкому строительству, ибо этот раздел «Подземные сооружения» главным образом разработан нами еще в 1996 г.

В свою очередь эти результаты являются первым приближением при рассмотрении комплекса задач, учитывающих нелинейные взаимодействия в системе «сооружение-грунт». Это является новым вкладом в сейсмодинамическую теорию, что открывает широкие возможности их применения в оптимальном проектировании комплекса систем жизнеобеспечения в сейсмических районах.

### Литература

1. Рашидов Т.Р. Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. – Ташкент: Фан, 1973. – 180 с.
2. Ильюшин А.А., Рашидов Т.Р. Упрощенные уравнения сейсмодинамики сложных систем подземных сооружений // Изв. АН РУз. Сер. тех. наук. 1970. №2. С. 20-31.
3. Ильюшин А.А., Рашидов Т.Р. О действии сейсмической волны на подземный трубопровод. Изв. Ан Уз ССР. Серия тех.наук. 1971. № 1. С. 3 – 11.
4. The 14th World Conference on Earthquake Engineering. 2008. Beijing.
5. Proceeding of Intenational conference on performance-based design in earthquake geotechnical engineering: Performance-based design in earthquake geotechnical engineering. 2009. Tokyo.
6. The 15th World Conference on Earthquake Engineering. 2012. Lisbon.
7. Самарский А.А., Гулин А.В. Численные методы. М.: Наука, 1989.
8. Рашидов Т.Р. Актуальные задачи сейсмодинамики подземных сооружений // Упругость и неупругость. Материалы международного научного симпозиума по проблемам механики деформируемых тел, посвященного 100-летию со дня рождения А.А. Ильюшина. М. 2011. С. 446-453.