

ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧ СЕЙСМОДИНАМИКИ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ СИСТЕМЫ ПОДЗЕМНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ

Т. Рашидов⁽¹⁾, И. Мирзаев⁽¹⁾, Т. Юлдашев⁽¹⁾, Д. Бекмирзаев⁽¹⁾

⁽¹⁾ Институт механики и сейсмостойкости сооружений имени М.Т. Уразбаева АН РУз, г.Ташкент, Республика Узбекистан, tur.rashidov@list.ru, ibrakhim.mir@mail.ru

Аннотация. В статье рассматривается численное решение задач сейсродинамики пространственных систем подземных трубопроводов. Используется метод конечных элементов по пространственным переменным, а по временной переменной применяется метод типа Ньюмарка. Создано прикладное программное обеспечение для расчетов и наглядного представления результатов решения задач в виде графиков изменения перемещений, усилий, моментов во времени в выбранных узловых точках конструкции и в виде анимации.

NUMERICAL SOLUTION OF THE PROBLEMS REGARDING SEISMIC DYNAMICS FOR SPATIAL SYSTEMS OF THE UNDERGROUND PIPELINES

T. Rashidov⁽¹⁾, I. Mirzaev⁽¹⁾, T. Yuldashev⁽¹⁾, D. Bekmirzaev⁽¹⁾

⁽¹⁾ Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures named after M.T. Urazbayev of the Academy of Science of the Republic of Uzbekistan, Tashkent, Republic of Uzbekistan, tur.rashidov@list.ru, ibrakhim.mir@mail.ru

Abstract. The numerical solution of the problems regarding seismic dynamics for spatial systems of the underground pipelines is considered in the article. The finite element method is used for spatial variables, and the Newmark method is applied to the time variable. The applied software was developed for calculations and visual representation of the results for solving problems in the form of change graphs as movements, forces, moments in time at selected nodal points of the structure and in the form of animation.

ЖЕР АЛДЫНДАГЫ ТҮТҮК ӨТКӨРГҮЧТӨРДҮН МЕЙКИНДИК ТУТУМУНУН СЕЙСМОДИНАМИКА МАСЕЛЕСИНИН САНДЫК ЧЕЧИМИ

Т. Рашидов⁽¹⁾, И. Мирзаев⁽¹⁾, Т. Юлдашев⁽¹⁾, Д. Бекмирзаев⁽¹⁾

⁽¹⁾ М.Т. Уразбаев ат. Механика жана курулмалардын сейсмо туруктуулугу институту ӨР ИА, Ташкент ш., Өзбекстан Республикасы, tur.rashidov@list.ru, ibrakhim.mir@mail.ru

Аннотация. Макалада жер алдындагы түтүк өткөргүчтөрдүн мейкиндик тутумунун сейсродинамика маселесинин сандык чечими каралат. Мейкиндик өзгөрүлмө боюнча түпкү элементтер ыкмасы колдонулат, ал эми убактылуу өзгөрүлмө боюнча Ньюмарк тибиндеги ыкма колдонулат. Эсептөөлөр жана маселелердин чечимдеринин жыйынтыктарын конструкциялардын тандалган түйүндүү чекиттеринин убактысында жылышууларын, күчтөнүүлөрүн график түрүндө жана анимация түрүндө көрсөтүп берүү үчүн прикладдык программалык камсыздоо түзүлгөн.

Отличительной чертой сейсмических воздействий на такие сооружения является то, что разрушения проявляются на поворотах, в местах соединения их с массивными узлами, не имеющих антисейсмические мероприятия [1, 2]. Интенсивное напряжение вследствие сейсмической нагрузки действует на деформируемые трубы, что вызывает относительное смещение между грунтом и трубой, аналогично относительному перемещению фундамента относительно основания и ленточного фундамента относительно продольной оси [3, 4]. На практике анализ воздействия землетрясений на подземные трубопроводы недостаточно изучен, чтобы объяснить сейсмическую активность целой системы трубопроводов [5, 6, 13]. В последнее время больше уделяется внимание расчету трубопроводов различной конфигурации (Г-, Т-, П- и V-образные) [7].

Элементы пространственной системы подземных трубопроводов моделируются: стержнем, работающим на сжатие-растяжение, кручение, изгиб и сдвиг, взаимодействующий с грунтом; сосредоточенной массой, взаимодействующей с грунтом; безынерционным элементом для специальных соединений труб.

Сейсмическую волну, распространяющейся в грунте, предлагается задать в виде реальных записей сейсмограмм сильных землетрясений, так же её можно задавать для исследований в виде: гармонической, гармонической затухающей функций, импульса разной формы и других функций, заданных в аналитическом или числовом виде. Считается, что сейсмическая волна имеет конечную скорость распространения и направление. Для реальных землетрясений это может быть, например, волной Релея.

На тестовых испытаниях разработанного программного обеспечения обнаружено, что член взаимодействия трубы с грунтом при больших временах вычислений приводит к появлению «паразитных» гармоник, и необходимо использование искусственной вязкости при вычислениях.

Проведенные нами теоретические и вычислительно-экспериментальные исследования решают проблемы оценки напряженно – деформируемого состояния трубопроводов при сейсмических нагружениях, направленных произвольно относительно конструкции. Для изучения совместных продольных, поперечных колебаний подземных трубопроводов при произвольном направлении сейсмического нагружения применяет прикладную теорию колебаний стержней [8, 9].

Для решения краевой задачи используем метод конечных элементов и неявную аппроксимацию по времени типа Ньюмарка [11]. Разработаны алгоритм и программа расчета подземных трубопроводов в случае падения сейсмической волны под углом к конструкции, что соответствует произвольному сейсмическому нагружению в виде сейсмограммы, а также когда волна задана гармонической или другой функцией. В такой постановке задачи для подземных трубопроводов решаются впервые.

На основе алгоритма компьютерной реализации решим следующую задачу для **Z** образной конструкции с массой в узле 11 и жестко закрепленной на торцах. Механические и геометрические параметры принимаем следующими:

$E = 2 \cdot 10^6$ кГ/см²; $F = 2 \cdot \pi \cdot R \cdot \delta$ см²; $\delta = 1$ см; $R = 25$ см; $m = \rho \cdot F$ кГс²/см²; $T = 0,3$ с; $\rho = 8 \cdot 10^{-6}$ кГс²/см⁴; $l^I = l^{III} = 5000$ см; $l^{II} = 10000$ см; $k_x = 1,72$ кГ/см³; $D_H = 50$ см.

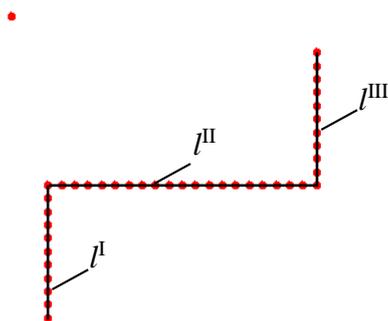


Рис.1. Участок трубопровода **Z** образной конфигурации

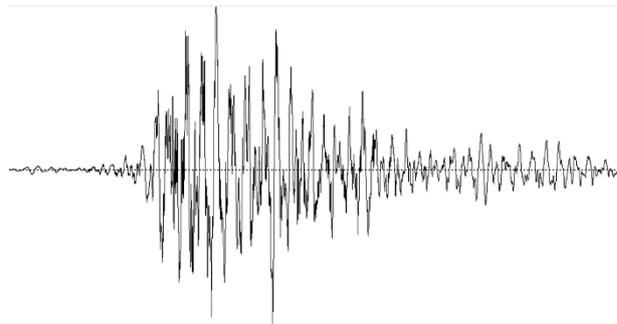


Рис.2. Изменение продольного перемещения трубопровода по времени: 11-узел, $u_{max} = 3,43$ см при $t = 56,45$ с.

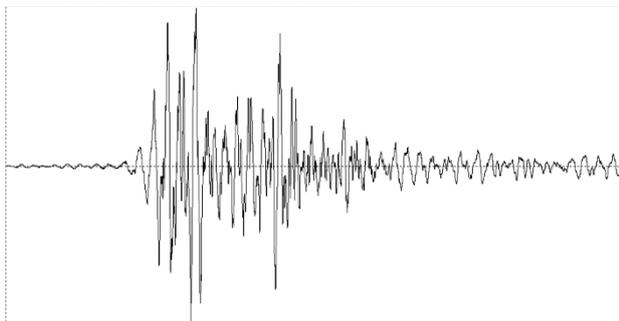


Рис.3. Изменение поперечного перемещения трубопровода по времени: 11-узла, $v_{max} = -6,93$ см при $t = 50,09$ с.

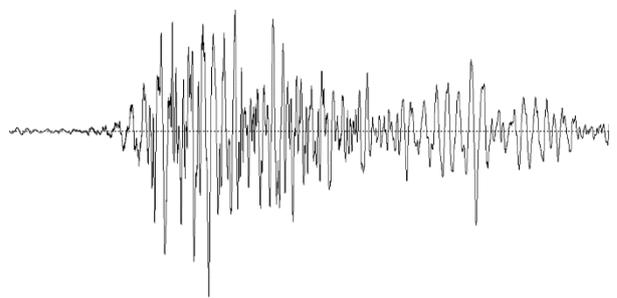


Рис.4. Изменение поперечного перемещения трубопровода по времени: 11-узла, $w_{max} = -2,26$ см при $t = 55,31$ с.

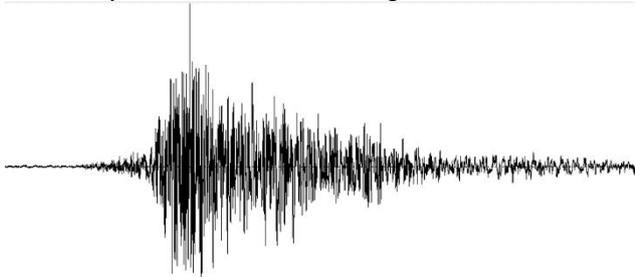


Рис.5. Изменение усилия трубопровода по времени: 11-элемент, $N_{max} = 33100$ кГ при $t = 48,95$ с.

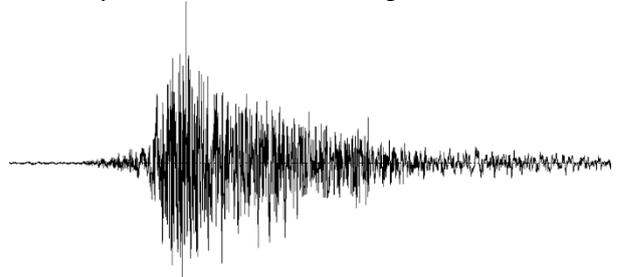


Рис.6. Изменение перерезывавших сил трубопровода по времени: 11-элемент, $Q_{max} = 1,24$ кГ при $t = 49,27$ с.

Большое значение продольного усилия наблюдается в середине второго трубопровода, это значение меньше чем по расчету статической теорией, при увеличении значения коэффициента взаимодействия — это значение приближается к статической теории. Влияние массы на значение перемещений, усилий и моментов наблюдается до расстояния 25 м от точки жестко прикрепленной массы.

В качестве примера действующей сейсмической волны рассмотрим следующее:

$$u_{0,x}(x,t) = a_0 \sin \left(t - \frac{x}{C_p} \right) \cdot \cos \alpha; \quad u_{0,y}(x,t) = a_0 \sin \left(t - \frac{x}{C_p} \right) \cdot \sin \beta \quad \text{при } 0 < t - x/C_p < 1 \text{ с}; \quad a_0 = 0,6 \text{ м};$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T}; \quad T = 0,3 \text{ с}; \quad C_p = 1000 \text{ м/с}; \quad \alpha = 45; \quad \beta = 45; \quad \mu_{\text{грунт}} = 0,2; \quad \mu_{\text{труба}} = 0,3.$$

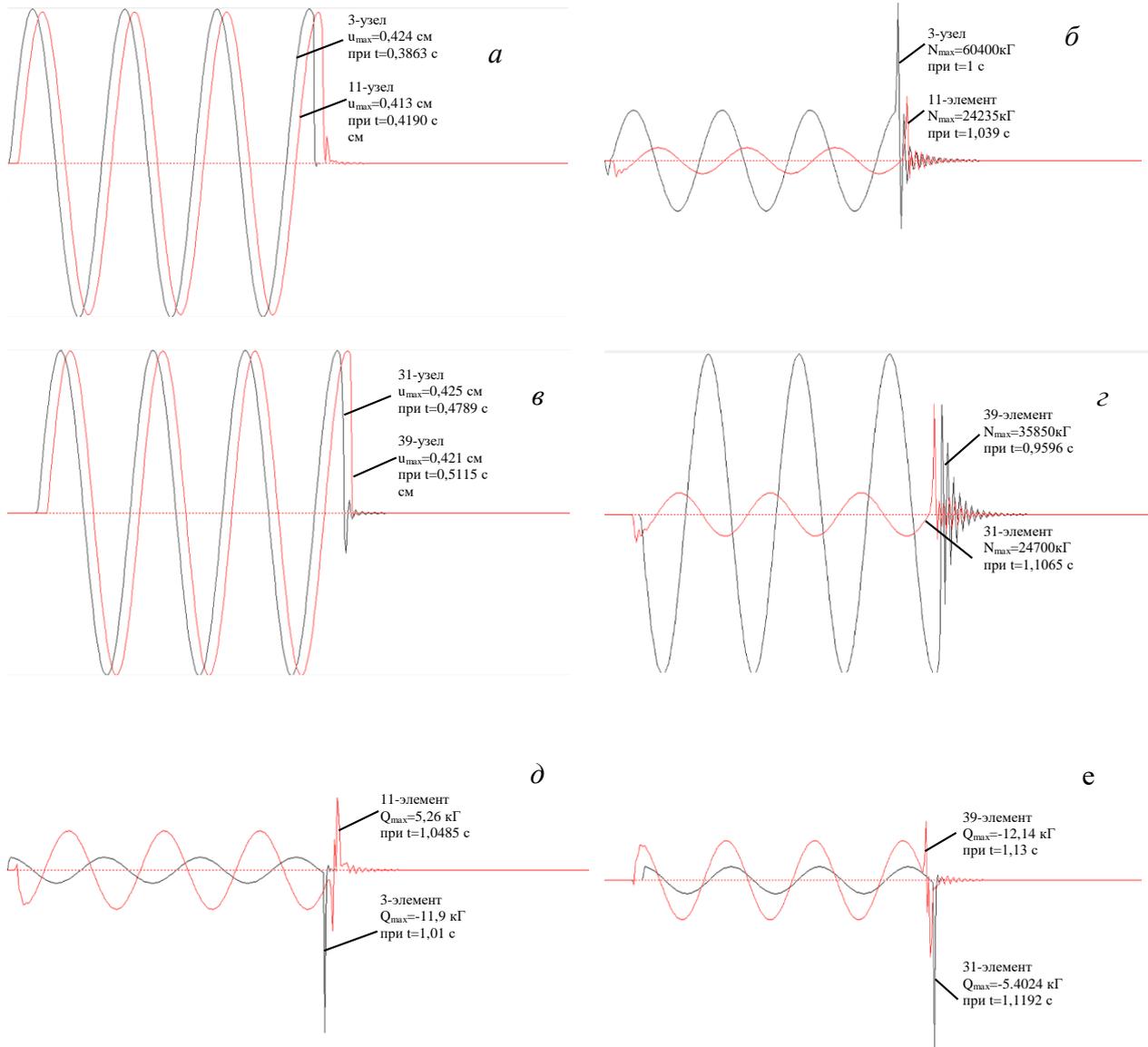


Рис.7. Изменение продольного перемещений (а, в), усилий (б, г) и перерезывающих сил (д, е) по времени подземного трубопровода (резкое прерывание действующей волны приводит к увеличению значения нормального усилия)

Для наглядности приведем ниже результаты решения задачи для линейного трубопровода, торцы которого закреплены в грунт, при действии трехмерной волны, записанной во время землетрясения. Оцифрованные записи сейсмограмм землетрясения предоставлены нам зав. лаб. Университета Беркли Ш. Тахировым.



Рис.8. Участок прямолинейного трубопровода: $l=100000$ см

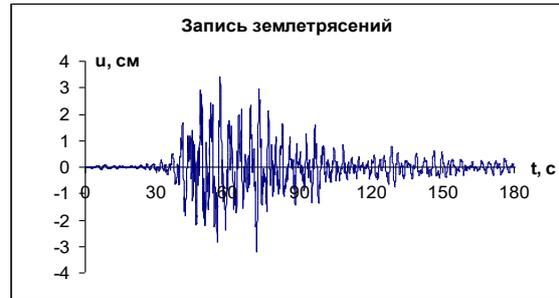


Рис.9. Перемещение по Ox землетрясения (University of California at Berkeley)

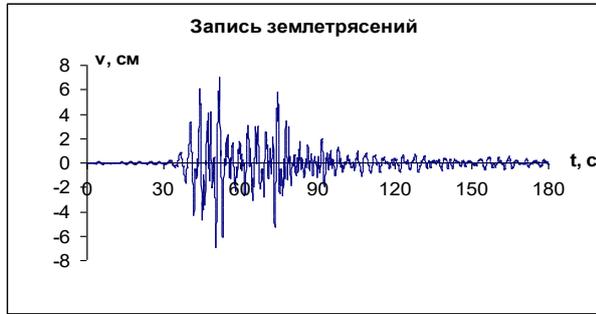


Рис.9. Перемещение по Oy и Oz землетрясения (University of California at Berkeley)

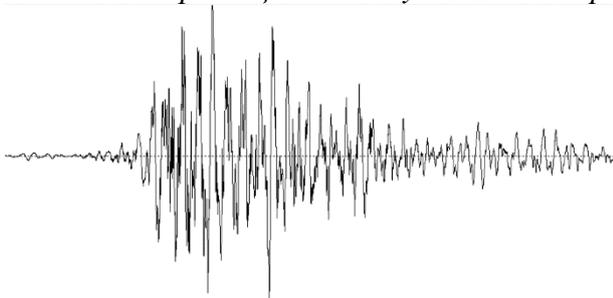
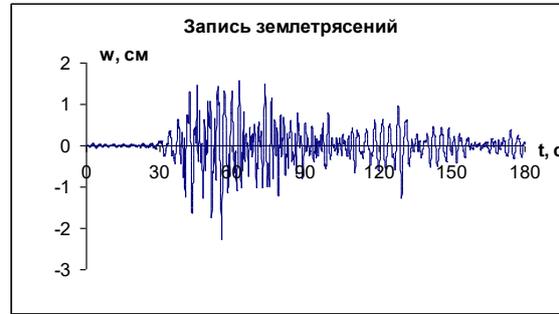


Рис.10. Изменение продольного перемещения трубопровода по времени:
100-узел, $u_{max}=3,4256$ см при $t=56,98$ с.

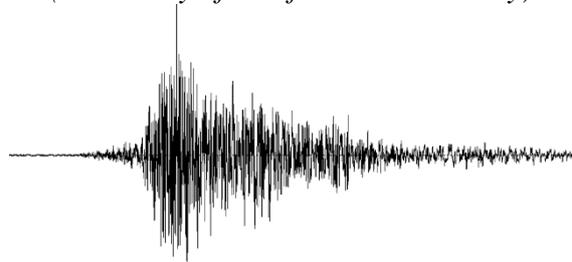


Рис.11. Изменение продольного усилия трубопровода по времени:
200-узел, $N_{max}=51500$ кГ при $t=50,09$ с.

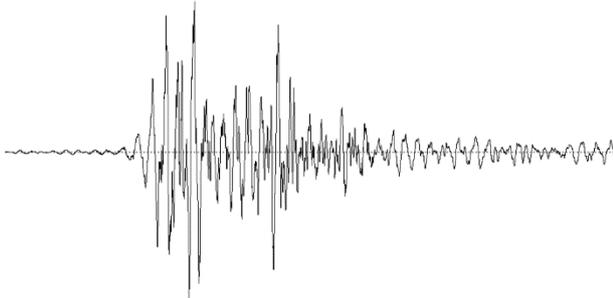


Рис.12. Изменение поперечного перемещения трубопровода по времени:
100-узел, $v_{max}=-7,02$ см при $t=50,58$ с.

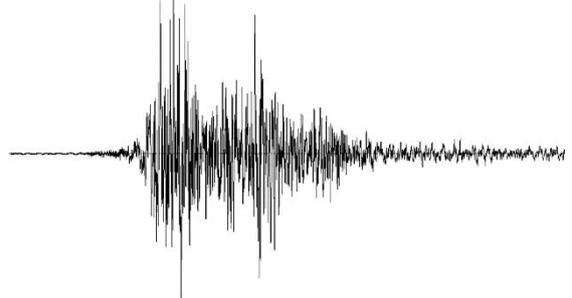


Рис.13. Изменение перерезывающих сил трубопровода по времени:
200-элемент, $Q_{1max}=5,61$ кГ при $t=49,28$ с.

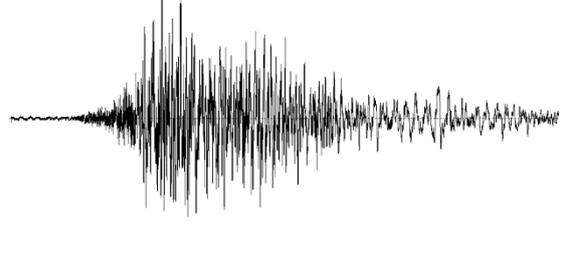
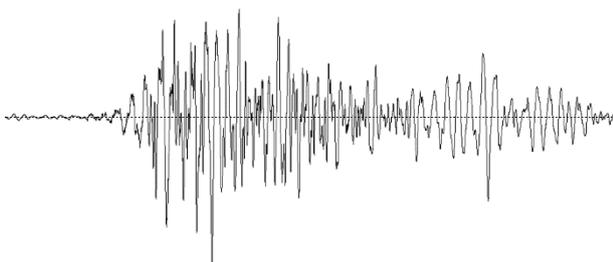


Рис.14. Изменение вертикального перемещения трубопровода по времени: 100-узел, $w_{max}=-2,242$ см при $t=55,97$ с,

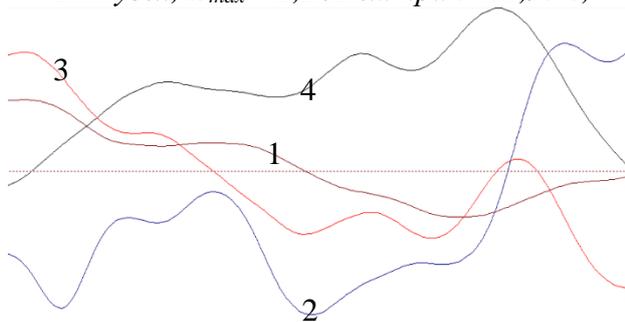


Рис.15. Изменение перерезывающих сил трубопровода по времени: 200-узла, $Q_{2max}=1,88$ кГ при $t=52,22$ с,

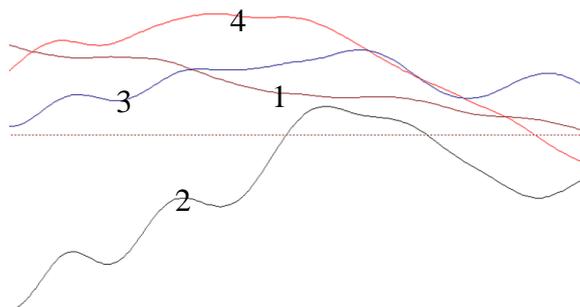


Рис.16. Изменение продольного перемещения вдоль оси трубопровода при заданном времени:

- 1) $t=40$ с, $u_{max}=1,036$ см при $x=3000$ см.
- 2) $t=50$ с, $u_{max}=-2,067$ см при $x=48080$ см.
- 3) $t=60$ с, $u_{max}=1,70$ см при $x=2800$ см.
- 4) $t=70$ с, $u_{max}=2,34$ см при $x=78090$ см.

Рис.17. Изменение поперечного перемещения вдоль оси трубопровода при заданном времени:

- 1) $t=40$ с, $v_{max}=1,8588$ см при $x=1000$ см.
- 2) $t=50$ с, $v_{max}=-3,742$ см при $x=600$ см.
- 3) $t=60$ с, $v_{max}=1,78$ см при $x=54900$ см.
- 4) $t=70$ с, $v_{max}=2,558$ см при $x=31800$ см.

Результаты вычислений анализируются с помощью специально разработанных программных продуктов для графического представления по времени и координатам, а также анимационное представление процесса [12].

Возникает возможность использования прикладных программ для расчета при проектировании подземных трубопроводов на набор записей сейсмограмм сильных землетрясений, что будет существенным дополнением к нормативным документам по сейсмостойкому строительству КМК-96 раздел IV [10].

Выводы

Разработаны алгоритмы на основе метода конечных элементов и программа расчета пространственных систем подземных трубопроводов в случае падения сейсмической волны под углом к конструкции, что соответствует произвольному сейсмическому нагружению.

Максимальные абсолютные значения нормального и касательного напряжений возникают на заземленном конце трубопроводов I и III. Наличие колодцев с достаточной поверхностью и массой приводят к перераспределению напряжений около колодца до расстояния 25 м для рассмотренного типа грунта. Для линейных участков трубопровода статическая теория дает приемлемый результат. Для более точного анализа требуется учет физически нелинейных процессов.

Разработанные алгоритмы и программный расчет дают возможность оптимального проектирования и строительства подземных трубопроводных систем жизнеобеспечения, что открывают возможность существенному дополнению к изменению в норме проектирования их в сейсмических районах.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Т.Р. Рашидов.** Динамическая теория сейсмостойкости сложных систем подземных сооружений. Ташкент.: Фан, 1973. –180 с.
2. **Т.Р. Рашидов., Г.Х. Хожметов.** Сейсмостойкость подземных трубопроводов. Ташкент.: Фан, 1985. –153 с.
3. **Д.Д. Баркан.** Динамика оснований и фундаментов. М.: Стройвоенмориздат, 1948. –412 с.
4. **А.Г. Назаров.** Метод инженерного анализа сейсмических сил. Ереван.: АН Армения. 1959. –257 с.
5. **Т.Р. Рашидов., В.А. Крыженков.** Воздействие Ташкентского землетрясения и его афтершоков на подземные сооружения различного назначения // Ташкентское землетрясение 26 апреля 1966 года. Ташкент.: Фан, 1971. С. 548–599.
6. **А.С. Гехман., Х.Х. Зайнетдинов.** Расчет, конструирование и эксплуатация трубопроводов в сейсмических районах. М.: Стройиздат, 1988. –184 с.
7. American Lifelines Alliance. Guidelines for the Design of Buried Steel Pipe. 2001. P. –76.
8. **Т.Р. Рашидов., Т. Юлдашев.** Математические модели сейсмодинамики сложных систем подземных сооружений // Современные проблемы прочности, пластичности и устойчивости. Тверь: ТГТУ, 2007. –С. 272-277.
9. **Д. А. Бекмирзаев., Т.Р. Рашидов.** Решение задачи сейсмодинамики подземных трубопроводов при нагружениях произвольного направления // Узбекский журнал «Проблемы механики».Ташкент.: 2014. № 3-4. С. 8 – 13.
10. Строительные нормы и правила. «Строительство в сейсмических районах», КМК 2.01.03-96, Ташкент, 1996 г. –88 с.
11. **К.М. Арипов, И. Мирзаев.** Пакет программ на ПЭВМ для исследования статики и динамики пространственных составных конструкций. Тезисы докл. межд. научной конференции “Механика и ее применение” – Ташкент, 1993 г. – с. 109 – 110.
12. **И. Мирзаев.** Анимационное представление динамики пространственных конструкций. // Проблемы механики. 2017, №4, стр. 32-35
13. **И. Мирзаев, Р.Б. Хусайнов.** Численное исследование формирования продольной волны деформации в магистральном трубопроводе. // Материалы республиканской научно-практической конференции «Проблемы геотехники и их современные решения в Узбекистане». 2018, стр. 235-240.