**РАЗВИТИЕ НОРМАТИВНЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА ПОДЗЕМНЫХ МАГИСТРАЛЬНЫХ ТРУБОПРОВОДОВ НА ОСНОВЕ ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ СЕЙСМОСТОЙКОСТИ ПОДЗЕМНЫХ СООРУЖЕНИЙ**

**DEVELOPMENT OF NORMATIVE METHODS OF CALCULATION OF UNDERGROUND MAIN PIPELINES BASED ON THE WAVE THEORY OF SEISMIC STABILITY OF UNDERGROUND STRUCTURES**

**Султанов К.С.**

доктор физ.-мат. наук, проф., гл. научн. сотр., Институт механики и сейсмостойкости сооружений АН РУз

**Кумаков Ж.Х.**

ассистент, Ташкентский архитектурно строительный институт

**Sultanov K.S.**

Doctor of Physcal-Mathematical Sciences, Professor, Chief Scientific Researcher, Institute of Mechanics and Seismic Stability of Structures of the Academy of Sciences of Uzbekistan

**Kumakov J.Kh.**

Lecturer, Tashkent Architecture and Construction Institute Аннотация.

**Аннотация.** Продольная напряжения в подземном трубопроводе при воздействии сейсмической нагрузки нормативными методами расчета определяется на основе гипотезы о равенстве деформаций грунта и трубопровода. Здесь предлагается метод определения продольного сейсмического напряжения на основе напряженно-деформированного состояния грунтовой среды вокруг подземного трубопровода. Показана более реальность предлагаемого метода при воздействии сейсмической нагрузки на систему трубопровод-грунтовая среда.

**Abstract**. Longitudinal stresses in underground pipelines under the effect of seismic load are determined by normative methods of calculation on the basis of the hypothesis of strain equality in soil and in a pipeline. A method to determine the longitudinal seismic stresses is proposed in the paper based on the stress-strain state of soil medium around an underground pipeline. The reality of the proposed method is shown under the effect of seismic load on the pipeline–soil system.

**DOI 10.37153/2686-0045-2019-13-107-112**

Напряженное состояние подземных трубопроводов непосредственно зависит от напряженного состояние грунтов, через которые передается сейсмическая нагрузка на трубопровод [1-8]. Напряженное состояние грунта вокруг трубопровода, зависит от волновых процессов, происходящих в грунтовой среде при распространении сейсмической волны, от механических свойств грунта и т.д. [8]. Волновой процесс в грунте является нестационарным. Также возникает нестационарный волновой процесс в трубопроводе. При разработке методов расчета напряженного состояния подземных трубопроводов на сейсмические воздействия, перечисленные выше факторы существенно упрощаются.

Метод определения продольных напряжений подземного трубопровода [1] основан на гипотезе равенства деформации трубопровода на деформацию грунта при распространении сейсмической волны в системе «грунтовая среда -трубопровод». Здесь, из решения задачи о распространении плоской сейсмической волны в грунте, определяется максимальная деформация грунта и она принимается за деформацию трубопровода. Далее, из закона Гука, определяется продольная напряжения трубопровода. Полученная при этом формула поправочными коэффициентами [1]. Очевидно, что принимаемая здесь гипотеза о равенстве деформации трубопровода к деформации грунта, не может иметь место в действительности. Однако, как утверждается в [1], этот метод позволяет определит максимальную продольную напряжения в подземном трубопроводе. В настоящее время, нормативные методы расчета продольных сейсмических напряжений в подземных трубопроводах, основаны на гипотезу [1].

В динамической теории сейсмостойкости подземных трубопроводов, рассмотренных в [1-4], продольная напряжения трубопровода зависит от силы взаимодействия трубопровода с грунтом, возникающих под действием сейсмической нагрузки. Значения силы взаимодействия, считается пропорциональным, значению относительного смещения. Далее, с учетом этой силы, продольная напряжения трубопровода определяется из уравнения продольного стационарного колебания упругого или неупругого стержня. В этом случае, также, волновой процесс или динамическая напряженная состояния грунта игнорируется, мало того, грунт фактически считается недеформируемым телом. Учитывается только движения грунта, как твердого тело. Эти допущения, также не соответствуют действительности.

В [8] разработана волновая теория сейсмостойкости подземных трубопроводов, учитывающая практически всех перечисленных выше факторов.

Целью настоящей работы является определение продольных напряжений в подземном трубопроводе при воздействии сейсмических нагрузок, на основе волновой теории [8].

Рассмотрим простейший случай, одномерные волновые задачи о распространении плоской волны в грунте и в трубопроводе. Распространение плоской сейсмической волны в системе «грунтовая среда – подземный трубопровод» рассматривается на двух связанных одномерных нестационарных волновых задачах, описываемые уравнениями

(1)

где *i*  1, 2; при *i* 1 все параметры относятся к трубопроводу, а при *i*  2  к грунту, *i*  продольное по оси *x* напряжение, *i* продольная деформация, *vi* продольная скорость частиц, *EDi* модуль динамическогосжатия, *ESi*  модуль статического сжатия, *i*  параметр вязкости, *i*  коэффициент вязкости, **  знак скорости, *v*  относительная скорость *v*  *v*2  *v*1  , **  приведенная сила взаимодействия трубы с грунтом.

Согласно уравнениям (1) грунтовая среда и материал трубопровода считается линейным вязкоупругим телом. В частном случае, когда *ED*  *ES* , модель среды переходит в модель упругого тела.

Волна создается в начальном сечении *x*  0 нагрузкой, изменяющейся по закону

*i*  max sin *t* / *T*  при 0  *t*  **

(2)

*i*  при *t*  0

где **max  амплитуда, **  время действия, *T*  полупериод нагрузки.

На фронте волны выполняется условие

 (3)

где *с*0*i*  скорость распространения продольной волны в трубопроводе *i* 1 и грунте *i*  2.

Постановка задачи соответствует случаю, когда протяженный трубопровод находится в полупространстве. Ось *x* трубопровода и полупространство совпадают. На поверхности контакта трубопровода с грунтом образуется сила взаимодействия (трения), которая определяется соотношением

 (4)

где *DH* – наружный диаметр, *DB* – внутренний диаметр трубопровода, ** – касательное к внешней поверхности напряжение, определяемое из законов взаимодействия, предложенных в [5].

Система уравнений (1) с граничными условиями (2), (3) решается методом характеристик с последующим применением метода конечных разностей.

Для проведения расчетов приняты следующие значения исходных данных для трубопровода и грунта:

*DH* =0.2 м; *DB* = 0.18 м; = 7800 кг/м3; *c*01 = 5000 м/с; 106 *с*-1; *ED*1 = *ES*1 = 2 105 МПа; 2000 кг/м3; *c*02 = 500 м/с; 104 с-1; *ED*2 = *ES*2 = 2 103 МПа;

коэффициент бокового давления грунта *K* = 0.3.

Значения параметров модели взаимодействия [5]: *CS* = 100 м/с; *KN* = 100 м-1; *fN =* 0.425; γ*N* = 1.5; ; ; ; ϰ = 0.1. Рассматривается полубесконечный трубопровод ( *L* = 10000 м).

Параметры нагрузки **max  0.5 МПа; *T*  0.01 с, что соответствует высокочастотной сейсмической нагрузке (**  50 с-1) с амплитудой 0.5 МПа.

Вертикальное к оси трубопровода напряжение определяется по формуле

 (5)

где  *–* статическое напряжение, определяемое весом грунта над трубопроводом.

На рис.1 приведено изменение касательного напряжения на поверхности контакта трубопровода с грунтом на сечении *x =* 7.5 м, согласно закону взаимодействия, основанному на модели стандартно-линейного тела [5]. Касательное напряжение нарастает с увеличением относительного смещения *u =* *u*2*-u*1, достигает пикового значения, затем спадает. При *u =* 0.005 м значение τ стабилизируется и она определяется из закона Кулона [5]. При изменении знака относительной скорости *v =* *v*2 – *v*1, значение τ уменьшается до нуля и далее начинается новый цикл взаимодействия.

На рис.2 приведены изменения продольных напряжений, относящихся к сечениям трубопровода *x =* 2.5 м (кривые 1-3); 5 м (кривые 10-30) и 7,5 м (кривые 1\*-3\*) от начального сечения. Кривые 1 получены при ; для кривых 2 – и при ; для кривых 3 – ; при .

Прежде всего, результаты расчетов на рис.2 показывают существенный рост напряжения, по сравнению с амплитудой волны в грунте (max = 0.5МПа). При рассматриваемых исходных данных волна в грунте затухает незначительно. Влияние ** на параметры волн в грунте практически нет.

При частоте продольной волны в грунте ω = 50 с-1, увеличение напряжения в трубопроводе наблюдается в сто раз, т.е. до 50 МПа.

Рис.1. Изменение касательных напряжений в сечениях Рис.2. Изменение продольных напряжений в различных

 трубопровода сечениях трубопровода

 Результаты расчетов показывают, что при дальнейшем уменьшении частоты сейсмической волны до 5с-1, максимальное напряжение в трубопроводе увеличивается до 150 МПа, в 300 раз по сравнению с амплитудой сейсмической волны в упругом грунте. Учет в расчетах вязких и пластических свойств грунта приводит к ещё большему увеличению продольного напряжения в грунте на 20-30% по сравнению с упругим случаем. В результате в трубопроводе возникает напряжение 1 150200 МПа, что превышает предел допустимых напряжений при эксплуатации стальных трубопроводов. Такие значения напряжений приводят к разрушению подземных магистральных трубопроводов.

Механизм образования продольных напряжений в подземном трубопроводе состоит из трех составляющих. Первая – это относительное смещение (трение), через которое передается огромное усилие (энергия) грунтовой среды на трубопровод. Вторая – это нормальное к внешней поверхности напряжение (давление). Продольное напряжение в трубопроводе, без учета нормального динамического напряжения в (5), в два раза меньше, чем когда учитывается (кривые 1 и 2, рис.2). Учет отрыва на поверхности контакта трубопровода с грунтом (кривые 3, *N* < 0, *N* = 0) также приводит к увеличению продольного напряжения с удалением от начального сечения трубопровода. Третья – это свойства грунтов. Когда учитываются вязкие и пластические свойства грунтов, увеличивается смещение грунта, следовательно, значение относительного смещения *u*. Это приводит к увеличению значения касательного напряжения и увеличивается значение продольного напряжения.

Таким образом, учет в расчетах напряженного состояния грунтовой среды, вокруг подземного протяженного трубопровода, приводит к образованию существенно больших напряжений в трубопроводе, при частотах продольных волн меньше 20 с-1.

Установлено, что амплитуда продольных напряжений в трубопроводе зависит от частоты продольных волн, от значения нормального к внешней поверхности динамического напряжения в грунте, от значения смещения грунта относительно трубопровода и от вязких и пластических свойств грунта.

Воздействия нагрузки на начальное сечение трубопровода, на формирование продольного напряжения в трубопроводе практически не влияет. Напряженное состояние трубопровода существенно зависит от механического поведения грунта вокруг трубопровода и параметров волн в грунтовой среде.

**Литература**

1. Напетваридзе Ш.Г. и др. Сейсмостойкость магистральных трубопроводов и специальных сооружений нефтяной и газовой промышленности. М.: Наука, 1980. 172 с.

2. Айнбиндер А.Б. Расчет магистральных и промысловых трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: «Недра», 1992. 288 с.

3. Айнбиндер А.Б., Кемерштейн А.Г. Расчет магистральных трубопроводов на прочность и устойчивость. М.: «Недра», 1982. 341 с.

4. Бородавкин П.П. Подземные магистральные трубопроводы. М.: «Недра», 1982. 384 с.

5. Султанов К.С., Баходиров А.А. Законы сдвигового взаимодействия на поверхности контакта твердых тел с грунтами // Основания, фундаменты и механика грунтов. 2016. №2. С. 25-31.

6. Баходиров А.А., Исмаилова С.И., Султанов К.С. Динамическое деформирование контактного слоя при сдвиговом взаимодействии тела с грунтом // Известия РАН. Прикладная математика и механика. ПММ. 2015. Том.79. №6. С. 839-852.

7. Баходиров А.А., Султанов К.С. Волны в вязкоупругом стержне, окружённом грунтовой средой при плавном нагружении // Известия РАН. Механика твердого тела. МТТ. 2014. №3. С. 132-144.

8. Султанов К.С. Волновая теория сейсмостойкости подземных сооружений. Ташкент: Фан, 2016. 392 с.