

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И ГЕОГРАФИЯ София 1113, ул. "Акад. Г. Бончев" бл. 3,тел: (02)9793322, факс: (02)9713005 www.geophys.bas.bg, e-mail: office@geophys.bas.bg

# ДЕПАРТАМЕНТ СЕИЗМИЧНО ИНЖЕНЕРСТВО

# Уязвимост на вкопани тръбопроводи, подложени на сеизмични въздействия

Гл.ас. инж. Антоанета Канева

Научна специалност: 010204 "Механика на деформируемото твърдо тяло"

Автореферат на дисертационен труд за присъждане на образователна и научна степен доктор

Научни консултанти: Доц. д-р инж. М. Костов, НИГГГ-БАН Доц. д-р инж. Д. Стефанов, НИГГГ-БАН 2012, София

Въвеждането в сила на новите евронорми за проектиране у нас, коренно различното спрямо масовата строителна практика моделиране на въздействието и изчисления на вкопаните тръбопроводи, подложени на сеизмични въздействия и липсата на проектантска практика за сеизмичен анализ на вкопаните тръбопроводи определиха темата и целите на дисертационния труд. Целта на дисертацията е да подпомогне проектанта при предстоящото въвеждане на новите евронорми, изясняване на същността на натоварването върху вкопаните тръбопроводи от преминаване на сеизмични вълни, методите за моделиране и определяне на възникващите в тръбите напрежения от това въздействие, параметрите, които влияят на големината на максималните напрежения в тръбите, конкретни насоки за изчисления. От друга страна с въвеждането на новите нормативни документи за вкопаните тръбопроводи възниква естествено въпроса за надеждността на вече водоснабдяване съществуващите системи, например за И канализация, газификация, при сеизмични въздействия. Какви биха били последиците от евентуално силно земетресение върху съществуващите системи? В настоящия дисертационен труд е направена оценка на възможните последици от земетресение с магнитуд М = 6.3 върху водоснабдителната система на град София, което е първата стъпка за набелязване на мероприятия за детайлни изследвания на конкретни части от водоснабдителната мрежа, за определяне на хидравличните загуби, необходимостта от доставяне на вода за пострадалите райони и пр., т.е. за организиране на мероприятия за намаляване последиците от силно земетресение в града.

В предложената дисертация е направен кратък преглед на литературните източници с изследвания на последиците от земетресенията върху подземните тръбопроводи. Този преглед дава представа за етапите през които минава натрупването на опита в изследване на повредите и разрушенията от минали земетресения и дава отговор на въпроса защо толкова късно започват да се въвеждат нормативни изисквания към вкопаните тръбопроводи. Направен е преглед на литературните източници за кривите на уязвимост на вкопани тръбопроводи при земетресения и са избрани подходящи криви на уязвимост, съответстващи на наличните данни за нашия пример. В отделна глава на настоящата работа е представен кратък преглед и анализ на нормативните документи, действащи или ползвани у нас за оразмеряване на стоманени тръбопроводи на сеизмични въздействия. Разгледани са и нормативни документи, които се ползват в чужбина и са сравнени някои положения в тях. Специално внимание е обърнато на неизяснените параметри. В четвърта глава са дадени накратко теоретичните основи, необходими за изясняване характера на въздействието на разпространение на сеизмични вълни върху вкопани тръбопроводи и теоретичните постановки на изчислителните процедури за определяне на напреженията в подземните стоманени тръбопроводи.

Решени са редица примери с опростена процедура на Goodling за изясняване влиянието на отделни параметри, участващи при определяне на максималните усилия в тръбопроводите от разпространение на сеизмични вълни. Направени са изводи за тяхната определяща роля за максималните напрежения в тръбите. Дадени са насоки за практическото ползване на отделните процедури.

Друга важна част от дисертацията е оценката на сеизмичния риск за водопроводната мрежа на големи урбанизирани територии. Изчисленията са проведени за системата за питейна вода на град София. Направената оценка на сеизмичния риск дава добра представа за очакваните повреди при силно земетресение. Оценката може да послужи за планиране на превантивни мерки за снабдяване с вода в случай на силно земетресение, за предвиждане на дублиращо трасе при необходимост, за оценка на необходимите ресурси за подновяване на водопроводната мрежа. Оценката е извършена в ГИС (ArcView GIS, 1996) (географска информационна система) среда, което позволява да се локализират местата с концентрация на повреди и течове. Оценката е направена като са приложени две методики, методика на ALA (2001) (American Lifeline Alliance, партньорство на FEMA и ASCE "American Society of Civil Engineers") и методика HAZUS FEMA (1997). Програмният пакет HAZUS представлява стандартизирана методика в среда на ГИС за оценка на загубите от природни бедствия и се разпространява безплатно от FEMA (Federal Emergency Management Agency-Федерална агенция за управление на бедствията).

С оглед на яснота на изложението искаме да поясним, че под термина вкопани тръбопроводи се разбира тръбопровод, положен в траншея и засипан с обратен насип. В настоящата работа еднозначно се използват определенията вкопан и подземен.

# ГЛАВА 2. ОБЗОР НА СПЕЦИАЛИЗИРАНАТА ЛИТЕРАТУРА ЗА УЯЗВИМОСТ НА ВКОПАНИ ТРЪБОПРОВОДИ ПРИ СЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ

През 70-те години на миналия век с построяването на мощни съвременни магистрални тръбопроводи, които обезпечават с енергийни и химически продукти големи територии (нефтопровода транс-Аляска) на практика започват по-интензивни изследвания на поведението на вкопаните тръбопроводи, подложени на сеизмични въздействия. В Русия в периода 1974-1979 г. диаметрите на магистралните газопроводи нарастват в диапазона 1220 – 1420 mm. Увеличава се и налягането, с което се пренасят различни субстанции. Започват да се прилагат нови високоякостни материали за производство на тръбите (Савинов, 1980).

До средата на 70-те години на миналия век вкопаните тръбопроводи не са оразмерявани за сеизмични въздействия. Липсата на нормативни изисквания за оразмеряване на подземните тръбопроводи в бившите републики на СССР до средата на 70-те години на миналия век според Савинов (1980) се дължи на обстоятелството, че подземните тръбопроводи добре са понесли земетресенията в районите с интензивност VII - VIII MSK – 64 извън зоните на разломите.

В Савинов, 1980 и Р. М. Мукурдумов, 1963 са описани последиците върху подземните тръбопроводи от земетресение Ашхабад от 6 окт. 1948 г., оценено на IX степен по MSK-64 в района на Ашхабад. Земетресението разрушава редица сгради, надземни съоръжения, има разрушения и в подземната тръбопроводна мрежа на града. Най-висока аварийност (3.82 бр. повреди/км) е била наблюдавана при стоманобетонните тръбопроводи, след тях се подреждат чугунените и азбестоциментовите тръбопроводи (0.3 бр. повреди/км). Най-ниска е аварийността на стоманените тръбопроводи90.073 бр. повреди/км).

Т. Rashidov & al. (1973) прави критичен анализ на последиците върху вкопаните тръбопроводи и тунели от земетресението в Ташкент от 1966 г. Основните разрушения са в точките на свързване на тръбите с резервоари, манлоси, помпени станции, фундаменти на сгради, отклонения в тръбите от основната тръба. Почти всички твърди връзки между сегментите на тръбите (чрез муфи или фланшове) са претърпели повреди. Изтъква ролята на почвените условия и по-специално разрушенията в тръбите преминаващи през почви с коренно различни свойства; Установява зависимост между дълбочината на вкопаване и сеизмоустойчивост на тръбопровода.

През 1973 г Kubo (1973) ясно формулира една от особеностите, отнасящи се до вкопаните тръбопроводи, а именно, че сеизмичното натоварване върху вкопаните тръбопроводи се различава коренно от това на останалите конструкции. Повредите при подземните тръбни системи се дължат главно на движението на почвата в резултат на разломи, преминаване на сеизмичните вълни, втечняване на песъчливи почви или разлики в динамичните свойства на два хоризонтални съседни почвени слоя. От прегледа на полевите изследвания Kubo (1973) стига до два много осовите надлъжни деформации преобладават съществени извода: над деформациите от огъване и преместванията на тръбопровода са много близки до тези на обгръщащата го почва. До тези изводи стига и от проведените експерименти. Освен това систематизира аварийността на тръбопроводите в зависимост от материала на тръбите, почвените условия, направлението на разпространение на сеизмичните вълни.

През последните десетилетия са натрупани редица данни за повреди на вкопани тръбопроводи, които са понесли значителни загуби. Повредите вече се класифицират в зависимост от конкретната причина за последиците върху тръбите. По време на земетресение в земната среда възникват два вида премествания, които оказват въздействие върху подземните инженерни съоръжения – остатъчни (PGDpermanent ground deformation) и преходни (временни TGD-transient ground deformation) премествания в земната среда. Преходните премествания в почвата са резултат на преминаването на сеизмичните вълни в земната среда по време на динамичното реагиране на средата, докато остатъчните премествания остават след като е свършило земетресението (Т. О'Rourke, 2005). Остатъчните земни премествания са от индуцирани от земетресението свлачища, преместванията по разломи, хоризонтално преместване предизвикано от втечняване на почвата, сеизмично слягане. Остатъчните земни премествания се представят чрез големина, премествания. геометрия И обхвата на зоната с остатъчни Преходните премествания се представят чрез големината на относителната деформация в почвата при преминаването на сеизмичните вълни в земната среда (M.O`Rourke & Liu, 1999). Най-често повредите и разрушенията във вкопаните тръбопроводи се дължат и на двата вида премествания.

Относителният дял на повредите в подземните тръбопроводи от двата вида премествания варира за всяко земетресение. Повредите от остатъчни премествания се наблюдават в отделни ограничени зони и са с висока плътност на повредите, докато повредите от разпространение на сеизмични вълни обхващат обширни области и са с по-ниска плътност. Под плътност на повредите или аварийност се разбира брой повреди за единица дължина от тръбопровода. Едни от последните силни земетресения, които причиняват сериозни щети на тръбопроводните системи са в Тайван 1999г., в Кобе 1995, в Northridge 1994.

Земетресението Northridge 1994 причинява най-големите повреди на водоснабдяването в САЩ след земетресението в Сан Франсиско през 1906 г. (Т. O`Rourke, 2005). Прекъснати са три главни водопроводни линии, които осигуряват водата за над три четвърти от територията на Лос Анджелис. Без вода остават около 50 000 консуматори.

По време на земетресението Great Hanshin Earthquake в Кобе 1995 водоснабдителните системи в 9 главни града и още 5 по-малки града претърпяват сериозни повреди, UNCRD RReport (1995). Без водоснабдяване остават над 1 100 000 жители, което е над 20 пъти повече от броя на жителите без вода от земетресението в САЩ, Northridge 1994. Основният механизъм на разрушение на подземните тръбопроводи е «изтръгване» в местата на съединенията. Основният материал на тръбите е стомана. Средната стойност на плътността на повредите

(повреди/km) за 12 от 14-те града е 0.23, а най-високите стойности са 1.26 за град Ashiya и за Noshiro е 3.16. От гледна точка на плътността на повреди се счита, че земетресението не представлява особен случай, UNCRD RReport (1995). Особеното в случая е необичайно дългия възстановителен период. Главна причина за дългия възстановителен период на водоснабдяването в пострадалия район е начинът за локализиране на местата с теч/повреда, а именно с увеличаване на налягането в системата. В случая поради многото повреди се оказва, че налягането в системата не може да се повиши достатъчно. Друга причина е, че 74% от необходимото количество вода в района се осигурява от един водоизточник. Главните тръбопроводи от този източник са били пострадали по време на земетресението, което води до спиране на водоподаването. Следващата причина е невъзможност да се разработи план за възстановяване непосредствено след земетресението, тъй като департаментът за ВиК на Кобе е разположен в кметството, което е разрушено по време на земетресението. Така техническата документация и чертежи остават недостъпни.

През 1999 г. в Турция стават две разрушителни земетресения през 90 дни като епицентрите са на разстояние около 100 km едно от друго, Косаеli с магнитуд Ms = 7.8 на 17 август 1999 и Duzce с магнитуд Ms = 7.3 на 12 ноември 1999. Водоснабдителната мрежа на град Duzce е около 780 км. За оценка на плътността на повредите за км от тръбите Tromans (2004) използва данните за ремонт по мрежата. В центъра на града наблюдаваните повредите за km са доста високи RR= 3.13. С RR означаваме плътността на повредите (RR = Repair Rate).

Същността на оценката на поведението на тръбопроводната система при земетресение е количествено да се дефинират повредите във функция на нивото на сеизмичното въздействие. Зависимостта между вероятността за повреди и нивото на сеизмичния хазарт (дефиниран чрез интензивност, максимално земно ускорение, максимална земна скорост или друг параметър на земното движение) се нарича крива на уязвимост (American Lifeline Alliance, ALA, 2001).

За подземните тръбопроводи тези криви са обикновено емпирични, построени въз основа на наблюдения на възникнали повреди и разрушения от минали земетресения във функция на някакъв параметър на земното движение. Първата такава крива за подземни тръбопроводи, предимно от чугун и азбестоцимент, е получена от Katayama et al. през 1975 г. Зависимостта е между броя на повредите за километър от тръбопровода в зависимост от максималното земно ускорение.

През 1983 г. Eguchi (1983, 1991) разделя повредите за вкопаните тръби в зависимост от конкретните причини за възникването им. В резултат на разпространение на сеизмични вълни кривата на уязвимост вече е функция на интензивността, MMI (Modified Mercalli Intensity). Също така вече не е една, а има семейство криви на уязвимост за различен материал на тръбите През 1988 Вагепberg получава крива на уязвимост за чугунени тръби в зависимост от максималната земна скорост.

В края на 80-те и началото на 90-те години на миналия век редица автори (Ballantyne et al., 1990; ASCE-TCLEE, 1991; Hamada, 1991; T.O`Rourke et al.,1991; Hwang and Lin, 1997 O'Rourke и Ayala (1993; Eidinger (1998) и Eidinger et al.(1995) получават криви на уязвимост за разпространение на вълни като отчитат материала на тръбите, а при някои изследвания и диаметрите на тръбите.) получават криви за различен материал на тръбите.

Друг съществен момент в изследванията на уязвимостта на подземните тръбопроводи, подложени на разпространение на сеизмични вълни, е прилагането на ГИС за определяне на факторите, които влияят върху повредите на водоснабдителната мрежа в Лос Анжелис причинени от земетресение Northridge (T.O`Rourke et al., 1998). Съпоставени са различни параметри на сеизмичното въздействие (MMI, PGA, PGV, PGD, AI, (Aryas Intensity) и SI- спектрална интензивност) с пространственото разпределение на повредите в системата за водоснабдяване. Авторите (T.O`Rourke et al., 1998) заключават, че максималната земна скорост най-добре съвпада с наблюдаваните повреди.

Като ползват данните за повреди от минали земетресения на O`Rourke & Ayala (1993), следната зависимост за плътността на повредите (брой повреди/km) във функция на максималното земно ускорение PGV [cm/sec] е изведена за процедурата за оценка на повредите след земетресение HAZUS (1997):

Тази зависимост е валидна за крехки тръби (чугун, азбестоцимент,бетон, ст.б.). За дуктилни тръби (стомана, PVC) зависимост 2.1 трябва да се ползва с фактор 0.3. В HAZUS (1997) тръбите се класифицират само в две групи, дуктилни и крехки. Няма класификация в зависимост от диаметъра на тръбата.

Една от най-широко прилаганите методики за оценка на повредите във вкопани тръбопроводи от разпространение на сеизмични вълни е методиката на ALA (2001). Кривата на уязвимост за вкопани тръби представена в (ALA,2001) е дефинирана въз основа на наблюдавани повреди в тръбопроводи от 12 земетресения предимно в САЩ и Япония в 81 точки.

Въпреки че има публикувани наблюдения на последици върху вкопани тръбопроводи от преминаване на сеизмични вълни в страните на бившия СССР (Туркменистан, Узбекистан), данните от тези обследвания не са включени в нито една от методиките на отделните учени за получаване на емпирични криви на уязвимост.

Естествено възниква въпросът на коя методика да разчитаме в оценките на повреди при възможни земетресения.

В момента има изведени редица емпирични криви на уязвимост на вкопани тръбопроводи при въздействие преминаване на сеизмични вълни, но не може да се направи еднозначна оценка кои криви дават най-достоверни резултати. Необходимо е да се натрупат достатъчно данни за представителна обработка за получаване на кривите на уязвимост и инструментални записи на максималните стойности на земното движение в местата на повреди на тръбопроводите. Ето защо смятаме, че на този етап е добре да се направят изследвания с поне две криви (методики на ALA и HAZUS) и да се оценят повредите и с доверителните интервали на кривите на уязвимост. Така ще се получат долна и горна граница на възможните повреди, а преценката за по-достоверните стойности да се извърши въз основа на инженерни съображения.

### ГЛАВА 3. ПРЕГЛЕД НА НОРМАТИВНИ ДОКУМЕНТИ

В тази глава е представен кратък преглед и анализ на нормативните документи, действащи или ползвани у нас за оразмеряване на стоманени тръбопроводи на сеизмични въздействия. Еврокод 8 EN1998-4, в сила от 2012 г. у нас, не дава цялостна процедура за оразмеряване, а само общи положения и насоки за решения. Това налага ползването и на допълнителни стандартни документи. Ето защо тук са разгледани нормативни документи, които се ползват в чужбина и са сравнени някои положения в тях. Специално внимание е обърнато на неизяснените параметри.

В досега действащите нормативни документи у нас за проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони не е отразена спецификата на натоварването и поведението на вкопаните тръбопроводи по време на земетресение. Нормите за

проектиране на сгради и съоръжения в земетръсни райони от 1987 г. (НПССЗР) предвиждат само ограничителни мерки за дължината на отделните сегменти на стоманобетонни тръби под насипи и изисквания за връзка на правоъгълните ст.б. тръби с покривните сглобяеми плочи.

Действащият от 1 януари 2006 г нов ЗУТ (2006) се обвързва с Наредба № 2 от НПССЗР, 1987. В ЗУТ (2006), чл.64 ясно са изброени 2007 г., която заменя елементите на техническата инфраструктура, където попадат и вкопаните тръбопроводи. Съществената промяна в Наредба № 2 от 2007 г. е, че всички преносни и разпределителни тръбопроводи в земетръсни зони подлежат на проверка за сеизмични натоварвания и са в класове на значимост III и IV.

Единствените у нас норми за проектиране на подземни стоманени тръбопроводи са за засипани магистрални стоманени тръбопроводи. ТНиП за проектиране, изграждане и въвеждане в експлоатация на засипани магистрални стоманени тръбопроводи (1975 г.). В момента тези норми не са в действие. Има действащи руски норми СНиП 2.05.06-85 с изменения от 1996 г. «Строительные Нормы и Правила Магистральные Трубопроводы». В тези норми за подземните тръбопроводи и тръбопроводите в насип се предвижда определянето на допълнително осово напрежение в резултат на въздействието на сеизмична вълна по направление на оста на тръбата, предизвикано от напрегнатото състояние на почвата.

Следващата важна стъпка при нормативните документи за проектиране на вкопани тръбопроводи при сеизмични въздействия е въвеждането на Еврокод 8 EN1998 – Част4. «Силози, резервоари и тръбопроводи». Общите принципи и правила определят изискванията за безопасност на съоръженията, разглеждани в тази част на нормите като още първият принцип обръща внимание на особеностите им. Нивото на осигуреност, надеждност, на тръбопроводните системи, резервоари или силози, се определя в зависимост от броя на хората изложени на риск и от икономическите загуби, които се очакват. За първи път у нас в нормативен документ, Еврокод 8 EN1998 – Част4, се дава специфичното натоварване върху вкопаните тръбопроводи при сеизмично въздействие, където се казва, че вкопаните тръбопроводи са изложени на следните видове директен и индиректен сеизмичен хазарт:

- разпространяващи се сеизмични вълни, които предизвикват диференциални относителни премествания в почвата
- остатъчни, постоянни деформации премествания • като при разлом, премествания на свлачища, премествания в резултат на втечняване на почвата

След като се приеме модел на сеизмичните вълни, се изчисляват относителните деформации и кривините в почвата, оказващи влияние на тръбопровода. В информативното Приложение Б са дадени указания за изчисляване на деформациите във вкопани тръбопроводи от преминаване на сеизмичните вълни съгласно метода, предложен от Newmark (1967). Въз основа на постулата, че инерционните сили, възникващи от взаимодействието между тръбопровода и почвата са много по-малки от тези индуцирани от деформациите на почвата, проблема за взаимодействие почва – тръбопровод може да се сведе до статична задача, т.е. свежда се до случая когато тръбопроводът се деформира от преминаваща вълна без да се отчитат динамичните ефекти. Моделирането е чрез радиални и надлъжни пружини, които свързват конструкцията с почвата.

Ръководството проектиране на вкопани тръбопроводи за на ALA(2001, Guidelines for the design of the buried steel pipelines, 2001, ALA) е един от нормативните документи, който обхваща проектните условия за осигуряване на интегритета на вкопаните тръбопроводи, подложени на всички възможни въздействия. Ръководството дава добре подредени, дефинитивни и без неизяснени НИГГГ, БАН

моменти решения. Осовата относителна деформация индуцирана в тръбата от преминаване на сеизмични вълни се определя с израза:

$$\varepsilon_a = \frac{V_g}{\alpha C_s}, \qquad (3.7)$$

Където:  $V_g$  е максималната земна скорост генерирана от земетресението;  $C_s$  е скоростта на разпространение на привидната вълна (консервативно се приема, че е 2 km/sec);  $\alpha$  е 2 за срязващи обемни вълни със  $C_s$  и е равна на 1 за останалите видове вълни.

Определените по у-е (3.7) относителни деформации се предават на тръбата, но не трябва да са по-големи от относителните осови деформации възникващи на контактната повърхност между тръбата и почвата в резултат на силите на триене

#### между тях:

$$\varepsilon_a \leq \frac{T_u \lambda}{4AE} \quad , \tag{3.8}$$

където: *T<sub>u</sub>* е максималната сила на триене за единица дължина от контактната повърхност тръба-почва; *λ* е привидната дължина на вълната разпространяваща се по земната повърхност, приема се, че е 1 km без допълнителна информация;*A* е площта на напречното сечение на тръбата;*E* е модул на еластичност на стоманата

Индийските норми (IITK,2007) дават още в самото начало дефиниции на привидната скорост на разпространение, на видовете сеизмични вълни, фазова скорост и други термини, които са основни за разбиране същността на проблема с реагирането на вкопаните тръбопроводи на сеизмични въздействия. В общи линии следват американските на ALA (2001). След общата част има раздели за проектиране на вкопаните тръбопроводи за различните видове хазарт.

Документът "ASME B31.1-1995 Приложение VII Незадължителна процедура за проектиране на вкопани тръбопроводи" е предназначен за проектиране на подземни температурни подложени разлики. тръбопроводи, на Натоварването температурни разлики се определя чрез относителната деформация предизвикана в материала на тръбата от температурния градиент. По същия начин действат и относителните деформации предизвикани от преминаване на сеизмични вълни. Основната разлика с останалите документи е, че се отчита пасивния натиск на почвата върху напречните клонове на тръбопровода, което може да доведе до значителна осова сила и огъващ момент в коляното, тройника, отклонението. За да се отчете този натиск е разработена класификация на изчислителните случаи за отделните участъци от тръбопровода, като обхваща всички възможни конфигурации.

От гореизложеното е ясно, че в по-съвременните нормативни документи у нас се обръща необходимото внимание на инфраструктурните съоръжения. Разгледаните нормативни документи могат да се разделят на следните категории по отношение на оразмеряването на вкопаните тръбопроводи за преминаване на сеизмични вълни:

- Отчита се ефекта от разпространение на сеизмични вълни върху правите участъци на тръбите чрез допълнително осово напрежение (такива са СНиП 2.05.06-85, Магистральные Трубопроводы и ТНиП за проектиране, изграждане и въвеждане в експлоатация на засипани магистрални стоманени тръбопроводи, 1975 г.
- Ефектът от разпространение на сеизмични вълни върху правите участъци на тръбите се определя чрез осови и огъвни деформации, не се отчита ефекта от приплъзване между тръбата и почвата (Еврокод 8 EN1998 – 4).
- Ефектът от разпространение на сеизмични вълни върху правите участъци на тръбите се определя чрез осови деформации като се отчита ефекта от приплъзване между тръбата и почвата (ALA 2001, индийските норми).

 Ефектът от разпространение на сеизмични вълни се определя чрез осови деформации върху правите участъци на тръбите като се отчита ефекта от приплъзване между тръбата и почвата и се определят напреженията в колената, тройниците и клоновете (ASME B31.1).

### ГЛАВА 4. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА РЕАГИРАНЕТО НА ВКОПАНИ ТРЪБОПРОВОДИ ПРИ СЕИЗМИЧНИ ВЪЗДЕЙСТВИЯ

В тази глава са дадени теоретичните основи за определяне на натоварването (максимална относителна деформация) върху вкопаните тръбопроводи ОТ на сеизмични вълни. Изяснява ce накратко характера преминаване на въздействието и особеностите за определянето на това натоварване в зависимост от вида на вълните. Дадени са основни постановки на опростената изчислителна процедура за определяне на напреженията в застрашените сечения на подземните стоманени тръбопроводи.

Първият опростен подход за оценка на реагирането на вкопан тръбопровод на въздействието на преминаване на сеизмична вълна е разработен от Newmark (1967) и все още се използва като се доразвива от редица автори. Подходът на Нюмарк се базира на три основни предпоставки (O`Rourke & Liu, 1999). Първата гласи, че земното движение е едно и също в две точки по пътя на разпространение на вълната и се отличава единствено по това, че е изместено по времето. Това означава, че въздействието се моделира като пътуваща вълна. Втората предпоставка гласи, че инерционните сили при вкопаните тръбопроводи са незначителни и могат да бъдат пренебрегнати. Третата предпоставка е, че няма относително преместване по контакта почва-тръба, от което следва, че деформацията в тръбата е равна на тази в почвата.

Като ползват подхода на Newmark, St John & Zahra (1987) извеждат изразите за относителните осови деформации, срязващите деформации и кривини в почвата за P- вълни, за S-вълни и за R- вълни. Резултатите им са за свободно поле и не се отчита взаимодействието тръба-почва. Резултатите за осовите деформации, които са съществени за вкопаните тръбопроводи, са обобщени в таблица 4.1 от Hashash et al. (2001), където ъгълът  $\phi$  дава ориентацията по отношение оста на тръбата. Уравнения (4.11), (4.13) и (4.15) дават максималните стойности на относителните деформации. За P- вълните и R- вълните максималните стойности се явяват при ъгъл  $\phi = 0^{\circ}$ , т.е. когато вълните се разпространяват успоредно на оста на тръбата. Таблица 4.1 Деформации в почвата от преминаване на сеизмични вълни (St John & Zahra, 1987)

Вид на вълните	Надлъжна относителна деформация	Максимална надлъжна относителна деформация
Р- вълни	$\varepsilon = \frac{V_P}{c_P} \cos^2 \varphi \qquad (4.10)$	$\mathcal{E} = \frac{V_P}{c_P} \operatorname{arg} \phi = 0^\circ  (4.11)$
S-вълни	$\varepsilon = \frac{V_s}{c_s} \sin \varphi \cos \varphi_{(4.12)}$	$\mathcal{E} = \frac{V_s}{2c_s} \operatorname{arg} = 45^\circ  (4.13)$
R- вълни (натискова компонента)	$\mathcal{E} = \frac{V_R}{c_R} \cos^2 \varphi \qquad (4.14)$	$\mathcal{E} = \frac{V_R}{c_R} \operatorname{arg} = 0^\circ  (4.15)$

 $V_P$  е максимална земна скорост от преминаване на P- вълни; с<sub>P</sub> е привидна скорост на разпространение на P- вълни; V<sub>S</sub> е максимална земна скорост от преминаване на S- вълни; с<sub>S</sub> е привидна скорост на разпространение на S- вълни; V<sub>R</sub> е максимална земна скорост от преминаване на R- вълни; с<sub>R</sub> е привидна скорост на разпространение на R- вълни;  $\phi$  е ъгъл на встъпване на вълната спрямо оста на тръбата; терминът «привидна скорост» се отнася до скоростта на вълната по отношение на земната повърхност. Има много литературни източници, в които е дискутиран въпроса за вида на сеизмичните вълни, обемни или повърхностни, които са значими за натоварванията върху вкопаните тръбопроводи, определянето на привидната скорост на разпространение на съответния тип вълни както и дължината на вълната за повърхностните вълни за конкретните условия на площадката. Този въпрос не е еднозначно определен в научната литература. Повърхностните вълни могат да са значими на къси разстояния само от няколко десетки километри. Отношението на минималното епицентрално разстояние R към фокалната дълбочина h, при което за първи път се появяват вълни на Rayleigh в хомогенна среда се дава с израза (Ewing et al., 1975):

 $\frac{R}{h} = \frac{1}{\sqrt{\left(V_P / V_R\right)^2 - 1}},$ (4.16)

където:  $V_P$  и  $V_R$  са съответно скорост на разпространение на P-вълни и на Rayleigh вълни.

Критериите за преобладаване на повърхностни вълни се различават в отделните изследвания, но и при най-малката възможност за преобладаване на повърхностни вълни за дадена площадка (по кой да е от представените в дисертацията критерии) е редно с оглед на сигурността, определянето на максималните относителни деформации в почвата за оразмеряване на вкопаните тръбопроводи да се основава на скоростите на разпространение на повърхностните вълни.

Максималната земна скорост V<sub>max</sub> за определения за площадката тип на сеизмичните вълни може да бъде определена по няколко начина в зависимост от конкретния проблем, който се решава и наличните данни. Ако има проведено микросеизмично изследване за площадката, то обикновено са известни и стойностите на максималната земна скорост. Понякога има налични акселерограми и велосиграми и те могат да послужат за определяне на максималната земна скорост. Максималната земна скорост не се изменя съществено в дълбочина за обичайните траншеи на тръбите (0.5 до 3 м) (Tromans, 2004; Sykora & Bastani, 1998), така че стойностите на максималната земна скорост за земната повърхност се използват при определяне на максималните деформации в почвата. Могат да се ползват различни закони за затихване и процедури за получаване на V<sub>max</sub>. Друг подход, който широко се препоръчва (Hashash Y.M.A. et al., 2001; ALA, 2001; IITK, GSDMA,2007) за оценка на максималната земна скорост в инженерната практика е да се ползват представените от Seed & Idriss (1982) зависимости на връзката между максималното земно ускорение и максималната земна скорост във функция на вида на почвата и епицентралното разстояние при отсъствие на конкретни данни за площадката.

Стойността на *с*, привидната скорост на разпространение на обемните вълни, която трябва да се вземе при определяне на деформацията в почвата, е преди всичко функция на типа на сеизмичните вълни – Р, S, R, L вълни. За площадка, подложена само на обемни вълни (т.е. само Р, SV и SH вълни), съответната стойност за видимата скорост на сеизмичните вълни е значително по-висока от тази определена за близката до повърхността скорост на вълната. При достигане на земната повърхност вълните падат под много малък ъгъл спрямо нормалата към повърхността, който води до високи стойности на привидната скорост на разпространение на S-вълните. През 1982 г. О`Rourke et al. получават стойности за привидната скорост на разпространение на S-вълните от 2.1 km/sec до 3.7 km/sec.Японските специалисти Tamura et al.1977, Tsuchida and Kurata 1978, измерват

стойностите на привидните обемни вълни от пет японски земетресения и определят границите им в диапазона 2.6 до 5.3 km/sec. За привидната скорост на разпространение на обемните вълни очевидно е разумно консервативно да се приеме скорост от 2 km/sec за определяне на максималната деформация в почвата както е предложено в ALA(2001).

Двата основни типа повърхностни вълни, които се генерират при земетресение са Love (L-вълни) и Rayleigh (R-вълни). При L-вълните трептенията на почвата са хоризонтални перпендикулярно на посоката на разпространение на вълната, докато при R-вълните трептенията са успоредно на направлението на разпространение на вълната. Следователно L-вълните предизвикват огъване в тръбопровод, който е успореден на направлението на разпространение на вълните, докато R-вълните индуцират надлъжни осови деформации. Тъй като огъването предизвиква ефекти от второстепенно значение, съществено е само реагирането на тръбопровод на R-вълните.

Тъй като R-вълните се разпространяват по земната повърхност, то фазовата скорост на R-вълните е видимата скорост на разпространение на вълните (M.J.O`Rourke, X.Liu, 1999), която трябва да се приеме за определяне на максималните деформации в почвата. Фазовата скорост е функция на изменението на скоростта на S-вълните в дълбочина и е функция на честотата:

$$V_B = \lambda f$$

(4.22)

където V<sub>R</sub> е фазовата скорост на R-вълните, а f е честотата в Hz.

Изменението на скоростта в зависимост от честотата обикновено се изразява количествено чрез така наречената дисперсионна крива, за която има редица процедури за получаването й. Дисперсията е явление, при което вълните с различна честота (и различна дължина на вълната) се разпространяват с различна скорост. Вълните с по-големи дължини проникват до по-големи дълбочини в сравнение с тези с по-къси дължини за същата форма, фазовата им скорост е по-голяма и са по-чувствителни на еластичните свойства на по-дълбоко залягащите слоеве (Babuska and Cara, 1991, цитирано в Jianghai Xia et al.,1999). По-късите дължини на вълните се влияят предимно от физическите свойства на повърхностните пластове. По тази причина на всяка форма на повърхностните вълни съответства конкретна фазова скорост на разпространение за конкретната дължина на вълната, което води до дисперсия на сеизмичния сигнал.

Следващият етап на развитие на подхода на Newmark е по отношение на третата предпоставка като се допуска приплъзване между тръбата и почвата по цялата дължина на тръбата. За дължина на вълната  $\lambda$ , точките от почвата с нула деформация отстоят по хоризонталата на разстояние  $\lambda/2$ . Ако приемем, че силите на триене  $t_u$  са равномерно разпределени по дължината на тръбата, то максималната деформация в тръбата в точка С ще бъде

$$\mathcal{E}_p = \frac{t_u L_s}{AE}$$
, където Ls=  $\lambda/4$ .

Съгласно тази процедура се сравняват относителната осова деформация в почвата и в тръбата в резултат на триенето по контакта. Приема се, че деформациите в почвата се дължат на R-вълни пътуващи успоредно на оста на тръбата. В резултат на дисперсията (фазовата скорост е нарастваща функция на дължината на вълната; C<sub>ph</sub>= λf), относителната деформация в почвата е намаляваща функция на

разстоянието или дължината на вълната  $\mathcal{E}_{g} = \frac{V_{R}}{C_{ph}}$ . Относителната деформация в

тръбата, в резултат на триенето по контакта почва-тръба, е нарастваща функция (фиг. 4.8) на разстоянието L или дължината на вълната λ. При определена конкретна дължина на вълната деформацията от триенето е равна на деформацията в почвата. Тази уникална деформация тогава се явява като максималната деформация, която може да се индуцира в непрекъснат тръбопровод от R-вълни (фигура 4.8).





Задачата за определяне на напрегнатото и деформирано състояние на подземен тръбопровод, положен в траншея и подложен на въздействието на преминаване на сеизмична вълна изисква решаването на контактната задача. Взаимодействието почва-тръба е сложна задача още повече като се вземе предвид нелинейното поведение на почвата и тръбата. Сложността е предимно от нелинейното поведение на почвата. Най-широко използван метод за моделиране и решаване на проблема за взаимодействието е метод, при който тръбата се моделира като греда на винклерова основа с крайни елементи, почвата се представя чрез нелинейни дискретни пружини.

Следващата стъпка е да се определят силите и моментите в тръбните връзки като колена, тройници, разклонения в резултат на определената максимална деформация. Такава процедура е развита от Goodling, E. (1983). Задачата е решена като греда на Винклерова основа. Въведена е идеята за анкер, мястото в тръбата където няма релативно преместване между тръбата и почвата. Основното уравнение е съвместимост на деформациите в мястото на пресичане на надлъжния и напречен клон на тръбата. Отчитат се преместванията на тръбата в почвата, които се възпрепятстват от силите на триене в надлъжния клон и съпротивлението на почвата в напречния клон. Процедурата на Goodling (1983) е залегнала в документ ASME B31.1-1995 и се използва съвместно с метод на крайните елементи. Изчисленията за получаване на напреженията в подземни тръбопроводи се провеждат в няколко етапа:

- Събиране на входните данни;
- Изчисляване на някои междинни параметри;
- Класификация на тръбопроводните участъци;
- Намиране местата на виртуалните анкери;

- Оценка на почвените деформации;
- Изчисление на напреженията в тръбите, колената и тройниците на тръбопроводите при нормални експлоатационни натоварвания и при сеизмично въздействие.

От гореизложеното може да се заключи, че има два подхода за определянето на максималната деформация в тръбата от преминаване на сеизмична вълна. И двата подхода поставят неизяснени въпроси пред инженера-проектант. При първия подход деформацията в тръбата е равна на деформацията в почвата. Трудностите тук възникват при определянето на стойността на привидната или фазова скорост на разпространение на вълната. Освен това трябва да се оцени и кой вид вълни предизвикват тези деформации. При втория подход се отчитат силите на триене по контакта почва-тръба. Трудностите при този подход са при определянето на дължината на вълната.

### ГЛАВА 5. ИЗСЛЕДВАНЕ НА МАКСИМАЛНИТЕ УСИЛИЯ В СТОМАНЕНИ ВКОПАНИ ТРЪБОПРОВОДИ ОТ РАЗПРОСТРАНЕНИЕ НА СЕИЗМИЧНИ ВЪЛНИ

Изчисляването на вкопаните тръбопроводи, подложени на сеизмични въздействия, коренно се отличава от изчисленията за сеизмични въздействия приложими в масовата строителна практика по няколко основни особености:

- Първата разлика е, че в конструктивно отношение тези съоръжения са многократно по- дълги от обичайните надземни конструкции. Дължината на тези инженерни съоръжения е несравнимо по-голяма от напречните размери на тръбопровода. Например трасето на газопроводите пресичат територията не само на една, а на много държави. Следователно по трасето отделните части на тръбопровода са подложени на различно въздействие по време на земетресение.
- Подпорните условия също се отличават при подземните тръбопроводи почвата обхваща тръбите по цялата повърхност на съоръжението и служи за опора.
- Отличителна особеност на значимото за тези конструкции натоварване е от деформациите в почвата в резултат на сеизмичните въздействия. Натоварването от инерционни сили води до незначителни напрежения и не е основно при тръбопроводите, положени в земна среда.
- Друга отличителна характеристика е, че тръбопроводите са инженерна мрежа, система от възли и линии, които са взаимосвързани. Повреда в някоя част се отразява и в другите. Това е от изключителна важност за съвременните мрежи на големи урбанизирани или индустриални райони, където управлението на тази система е автоматизирано и е съсредоточено в отделни възли. Повреда в такъв контролен възел може да блокира цялата система.

Критични за вкопаните тръбопроводи са местата на промяна на посоката на тръбата при колена, чупки, тройници, където относителните деформации и напреженията могат да надвишат допустимите стойности. За намаляване на силите на взаимодействие между тръбата и почвата и за намаляване на максималната относителна деформация, която се предава от почвата върху тръбата още при процеса на проектиране, е необходимо да се познават параметрите, които оказват въздействие върху деформациите и напреженията, възникващи в тръбопровода. Необходимо е да има яснота за мерките, които могат да се предприемат, за намаляване на напреженията в правите участъци, колената, тройниците или отклонения и др. в резултат на максимално индуцираните от сеизмичното въздействие относителни деформации. За да се установи кои фактори влияят наймного на тези напрежения са проведени параметрични изследвания върху няколко участъци на тръби.

Оценката на влиянието на отделните параметри върху големината на напреженията възникващи във вкопан тръбопровод е направена въз основа на проведените числени изследвания за четири вида стандартни тръби, съответно с отношение на диаметъра D към дебелина на стената t на тръбата (D x t, mm) както следва: 157 x 6, 273 x 6, 630 x 6 и 1220 x 8. Изследванията са проведени с модел, който представлява две тръби под прав ъгъл свързани с коляно и модел на права тръба към която чрез тройник е свързано отклонение под прав ъгъл (Фигура 5.1). Изчисленията са проведени с модел на Goodling (1983), който представлява греда на еластична опора по трите направления.



Фиг. 5.1 Схема на изчислителните модели с коляно и с тройник

Параметрите, които са варирани са следните:

- дълбочина на вкопаване на тръбата под земната повърхност H = 0.8 до 7.0 m;
- диапазон на коефициента на триене между тръбата и обратния насип: μ = 0.3 до 0.5;
- k<sub>h</sub> модулът на реакцията на земното легло чрез изменение на C<sub>k</sub> от средната му стойност C<sub>k</sub>=30 до 80;
- дължина на сеизмичната вълна: 500 m, 1000 m.

Резултатите от числените изследвания са представени графично. При увеличаване дълбочината на траншеята се увеличава силата на триене по контакта тръба-почва за всички конфигурации на права тръба със съединена част (фигура 5.2). Заедно с това нараства максималната относителна деформация в тръбата. Това увеличение е по-силно за по-големите диаметри на тръбата, но при обичайните дълбочини на траншеята граничната относителна деформация при натиск за правите участъци на тръбата рядко би могла да бъде надвишена.

При големите диаметри на тръбата максималните осови напрежения (нормални на напречното сечение на тръбата) в правия участък на тръбата са от порядъка на тези в коляното (фиг.5.4) и дори в някои случаи по-големи, докато при малките диаметри - напреженията в коляното (М+S) надвишават максималните осови напрежения в тръбата (max anchor) между 2 и 4 пъти (фиг.5.5). Тази тенденция се запазва и при тройниците.

Означенията на Фигурите в легендата са както следва:

max M - осово напрежение в коляното в резултат на момента

- max S осово напрежение в коляното резултат в на съпротивителната сила S на деформиращата се почва при напречния клон
- max M+S осово напрежение в резултат коляното в на момента и съпротивителната сила S

max anchor - максималното осово напрежение в правия участък в тръбата, което се определя в мястото на виртуалния анкер, т.е. в мястото където тръбата е неподвижно запъната в обграждащата я почва и няма относително преместване между тръбата и почвата за модел на тръба с коляно

tee M – осово напрежение в тройника в резултат на момента

tee S - осово напрежение в тройника в резултат на съпротивителната сила S на деформиращата се почва при напречния клон



Фиг.5.4 Изменение на напрежението в коляното на тръба с D=1.22 m в зависимост от дълбочината на вкопаване

tee M + S - осово напрежение в тройника в резултат на момента и съпротивителната сила S

tee anchor - максималното осово напрежение в правия участък в тръбата, което се определя в мястото на виртуалния анкер, т.е. в мястото където тръбата е неподвижно запъната в обграждащата я почва и няма относително преместване между тръбата и почвата за модел на тръба с тройник



Фиг. 5.2. Зависимост на силата на триене по контакта тръба - почва от дълбочината на вкопаване



Фиг.5.5 Изменение на напрежението в коляното на тръба с D=0.157 m в дълбочината зависимост ОТ на вкопаване

При тръбите с големи диаметри стойността на показателя за отношението на коравината на почвата към тази на тръбата (beta) се променя несъществено с увеличаване на дълбочината на вкопаване; при тръбите с малки диаметри стойността му се променя значително (фиг.5.8). Това определя по-високите напрежения в коляното от момента, който се получава от силата на съпротивление на почвата по напречния клон, в тръбите с по-високи стойности на "beta", т.е. с помалки диаметри (фиг. 5.9). По-високи стойности на показателя за отношението на НИГГГ, БАН стр. 15

коравината на почвата към тази на тръбата (beta) означават, че коравината на почвата е с по-големи стойности от тази на тръбата и коляното е подложено на силно огъване. Това може да се види на фигура 5.9, където за големи стойности на "beta" (малки диаметри на тръбите) напреженията в коляното започват с високи стойности още при минималните дълбочини на вкопаване в сравнение със същите дълбочини на вкопаване за тръбите с голям диаметър. Поради високите напрежения от момента в тръбите с по-малки диаметри под 0.6 m е особено важно да се следят напреженията, които могат да надминат допустимите стойности на нормативния документ спрямо който се изчисляват тръбопроводите. Очевидно за тези случаи не е достатъчно да следим само стойностите на максималната относителна деформация. В колената на тръбите с малки диаметри проблемът обикновено се решава с увеличаване дебелината на стените. За тънките тръби (D=273, D=157) при увеличаване с 2 mm на дебелината на стените на коляното напреженията падат с около 30%.





Фиг. 5.8. Зависимост на показателя за коравина от дълбочината на вкопаване ф (Beta- показател за отношението на н коравината на почвата към тази на м тръбата)

Фиг. 5.9. Зависимости от дълбочината на вкопаване на осовото напрежение от момент

Увеличаването на коефициента на триене по контакта тръба-почва от 0.3 на 0.5 води до увеличаване на напреженията в коляното с около 65% (Фиг. 5.11). При увеличаване на стойността на коефициента на триене право пропорционално нараства и силата на триене по контакта.

Изменението на коефициента за уплътнение на почвата Ск от стойности за средно уплътнени почви до много уплътнени почви води до изменение на напреженията в коляното от порядъка на 10% (фиг. 5.15). Общо може да се постигне 15-16% разлика в напреженията от промяна на относителното тегло с 1% на обратния насип и неговото уплътняване (промяна на Ск).



Фиг. 5.11. Сравнение на осовото напрежение при различни стойности на коефициента на триене за тръби с D=0.63 m



Фиг. 5.15 Изменение на напрежението в тръба с D=0.157 m при различни стойности на коефициента за уплътнение на почвата Ck в зависимост от дълбочината на вкопаване



Фиг. 5.18 Изменение на напрежението в тръба с D=1.22 m при различни стойности на дължината на сеизмичната вълна в зависимост от дълбочината на вкопаване

Най-важният параметър за възникващите във вкопаните тръбопроводи относителни деформации и напрежения е правилното определяне на дължината на сеизмичната вълна. Увеличаването двойно на дължината на вълната води до увеличение на напреженията в коляното над 3 пъти (фигура 5.18). С увеличаване на дължината на вълната нараства деформацията в тръбата, нараства дължината на участъка от тръбата по който действат силите на триене.

### ГЛАВА 6. ОЦЕНКА НА УЯЗВИМОСТТА НА ВОДОСНАБДИТЕЛНАТА СИСТЕМА ЗА ГРАД СОФИЯ

В настоящата дисертация е направена оценка на сеизмичния риск за водоснабдителната система на град София и по-точно на вкопаните тръбопроводи, довеждащи водата до града и самата водопроводна мрежа в града. Изследването е в среда на ГИС. Отчетени са всички налични данни за тръбите, до които

дисертантът имаше достъп. Използвани са различни методики за оценка на повредите от възможно земетресение в град София.

Изграждането на водоснабдителната система за град София започва в края на XIX век и началото на XX век. По настояще водите за питейно водоснабдяване на София идват предимно от язовир "Искър" по водопровода "Пасарел – София" и водопровод "Искър". Третият "Рилски водопровод" довежда водите от реките Бели, Леви и Черни Искър. Техническите характеристики на водоснабдителната мрежа на София са посочени в таблица 6.1:

Таблица 6.1 Технически характеристики на водоснабдителната мрежа на София

Елемент на водоснабдителната мрежа	Количество
Довеждащи и главни водопроводи	238 km
Градска водоснабдителна мрежа	3230 km
14 резервоара за централно снабдяване	331,700 m3
37 резервоара за местно снабдяване	7600 m3
20 помпени станции с капацитет	4170 l/sec

Довеждащите и главни водопроводи на софийската водоснабдителна мрежа са предимно стоманени тръби с големи диаметри между 1700 и 1200 mm. Друга голяма част от довеждащите водопроводи представлява бетонов канал или тунел.

За градската водоснабдителна мрежа на София бе невъзможно да се съберат данни в ГИС формат. Това наложи да приемем, че подземните тръбопроводи на градската водопроводна мрежа следват осовата линия на улиците. Общата дължина на уличната мрежа в ГИС формат е 2412 km, а общата дължина на градската водоснабдителна мрежа е 3230 km (Таблица 6.1). Уличната мрежа на районите Панчарево, Кремиковци, Нови Искър, Банкя и Връбница не са цифровани в ГИС среда, поради което дължината на водопроводната мрежа, която участва в изследването е по-малка от цитираната от статистиката в техническите характеристики. Не са цифровани и сградните отклонения на водоподаването.

Данни за относителния дял на тръбите по вида на материала им за градската водоснабдителна мрежа на София са представени на Фиг. 6.4. При назначаване на материала на тръбите сме приели запазване на процентното отношение на тръбите с даден материал. От данните на Фиг. 6.4 е видно, че водоснабдителната мрежа е предимно от три материала, стомана, азбестоцимент (етернит) и чугун.

Водопроводна мрежа	Дължина (м)	%
Без материал	148 256	4.59
Бетон	14	0.00
Етернит	798 095	24.70
Каменинов водопровод	2 244	0.07
ПВЦ	843	0.03
ПЕВП	313 928	9.72
Поцинкована стомана	201 800	6.25
Стомана	996 677	30.85
Стъклопласт	90	0.00
Чугун	768 600	23.79
Общо	3 230 547	100.00

Фиг. 6.4 Разпределение в зависимост от материала на тръбите на водопроводната мрежа – разпределителна улична мрежа в проценти

Изследването сме провели въз основа на еднакви площни единици от урбанизираната градска среда. За целта сме избрали правоъгълници със страни 400 m на 500 m, които условно наричаме клетки. Това са ¼ от кадастралната мрежа. За всяка клетка са изчислени дължините на водопроводите по вида на материала и на

Фигура 6.6 за всяка клетка от мрежата на София е нанесен материала, който има най-голяма дължина в съответната клетка.



Фиг. 6.6 Преобладаващ тип на тръбите от водоснабдителната мрежа

Следващият ключов елемент на процедурата е анализ на сеизмичния хазарт в разглежданата област. В настоящата работа е ползвана картата за максимална земна скорост за земетресение с магнитуд М=6.3. Тази карта е въведена в ГИС средата и е показана на фигура 6.8.



Фиг. 6.8 Разпределение на максималната земна скорост cm/s за земетресение с магнитуд М=6.3 и водоснабдителната мрежа на град София НИГГГ, БАН стр. 19

За София най-често срещан случай на възможни повреди и разрушения по тръбите от силно земетресение се очаква в резултат от деформациите в почвата от преминаване на сеизмичните вълни. Този механизъм обхваща голяма територия и може да причини повреди в тръбопроводите минаващи през различни почвени условия в отделни части на изследваната област. Оценката на уязвимостта на вкопаните тръбопроводи от сеизмични въздействия използвана за София е съгласно линейния (медианен) (ALA,2001) алгоритъм на повредите за преминаване на сеизмични вълни. Линейният модел на ALA за вкопани тръбопроводи изразява броя на ремонтните работи/повреди за единица дължина от тръбата като функция на максималната земна скорост и е наречен скелетна крива.

$$RR = a * PGV, \qquad (6.2)$$

където: *RR* е ремонтните работи/повреди за единица дължина от тръбата; *a* = наклона на медианата на набора данни, и наклона на отделна точка от данните приета като ремонти за единица дължина на тръбата, разделена на свързаната с тези повреди максимална земна скорост *PGV*.

В случаите, когато има данни за тръбите, се въвежда модифициращ коефициент К1, който отчита диаметър, тип на връзките между елементите, материал на тръбите. В методиката на ALA(2001). са представени стойностите на модифициращия коефициент за коригиране на скелетната крива. С въвеждане на коефициента К1 уравнение 6.2 добива вида:

$$RR = a * PGV * K1 \tag{6.3}$$

Водопроводната мрежа на град София е изградена преди всичко от стоманени, чугунени и етернитови тръби (общо 85.6%). Около 150 km от водопроводната система на град София е изпълнена от поцинковани тръби. Покритието на поцинкованите тръби се износва доста бързо и връзките на този вид тръби са главно на резба, което ги прави крехки и уязвими при сеизмични въздействия. Като имаме пред вид тези съображения приемаме коефициент К1 = 1.3 (съгласно методиката на ALA) за поцинкованите тръби. Голяма част от стоманените тръби са положени преди десетилетия и можем да приемем, че вече са доста корозирали, което ни дава основание да приемем коефициент К1=0.9 (методиката на ALA) за този тип тръби още повече, че подпочвените води за София са високи, което води до увеличаване на корозията. Когато няма данни за корозивността на почвата за чугунените и азбестоциментови тръби коефициентът за модифициране на скелетните криви на уязвимостта е К1 = 1.0. Поради високите подпочвени води и твърдите връзки при чугунените тръби, за случая на град София приемаме модифициращ коефициент K1=1.4 (методиката на ALA(2001). Уравнение 6.3 добива следния вид при оценка на повредите за 1000 m и за PGV cm/sec:

$$RR = a * PGV * K1 = 0.002454 * PGV * K1$$
(6.4)

Поради ненадеждни връзки при азбестоциментовите тръби приемаме за тях коефициент К1=1.4, който се отличава съществено от препоръчания от методиката на ALA(2001) модифициращ коефициент. Оценката дадена от Савинов (1980), цитирана по-горе в глава 2 на дисертацията, за чугунени и азбестоциментови тръби за IX степен по MSK-64 е 0.3 за 1000 m. За интензивност IX MSK, която приемаме равна на интензивност IX MMI ( приложение A на Tromans I. (2004)), съгласно Wald et al.(1999) диапазонът на максималната земна скорост е 60-116 cm/sec. Средната стойност на максималната земна скорост в посочения диапазон е 88 cm/sec. Съгласно методиката на ALA(2001) за район с PGV = 88 cm/sec, като заместим в уние (6.4) получаваме RR=0.3 за 1 km от трасето на азбестоциментови и чугунени тръби. Тази оценка на предвижданите повреди съвпада с оценката дадена от

Савинов (1980). Този резултат потвърждава удачния подбор на модифициращия коефициент за тръби от материал азбестоцимент.

След интегриране на кривите на уязвимост за всеки тип тръба от водоснабдителната мрежа на град София (наличната в ГИС среда е 2422 km) с максималната земна скорост, получена за територията на града от земетресение с магнитуд 6.3 се получават повредите в мрежата. На Фигура 6.14 са показани повредите в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, средни оценки и материал на тръбите – среден(т.е не се отчита), а на фиг. 6.15 - повредите в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, средни оценки и материал на тръбите – среден(т.е. не се отчита), а на фиг. 6.15 - повредите в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, средни оценки и материал на тръбите – съгласно таблицата от Фигура 6.4.







Фиг.6. 14 Разпределение на броя на повредите/течовете в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, средни оценки. Материал на тръбите – среден



Фиг.6. 15 Разпределение на броя на повредите/течовете в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, средни оценки. Материал на тръбите – съгласно таблицата от фигура 6.4

НИГГГ, БАН

Резултатите за средните оценки и среден материал на тръбите (Фиг. 6.14) показват. земетресение с магнитуд M=6.3 общият брой че при на повредите/течовете е 62. Разпределението на повредите в изследваната област отразява амплитудата на сеизмичния хазарт и до голяма степен плътността на мрежата. Влиянието на фактора вид на материала може да се проследи като се сравнят резултатите от Фигура 6.14 с тези от Фигура 6.15. На Фигура 6.15 разпределението на повредите вече носи и характера на материала на тръбите. Очевидно броят на клетките с повреди в диапазона 0.15 до 0.177 км<sup>-1</sup> нараства значително като отчитаме материала на тръбите (Фиг.6.15) и се появяват клетки с повреди над този диапазон. Резултатите за средните оценки и материал на тръбите съгласно статистическите данни за водоснабдителната система на града (Фиг. 6.15) земетресение с при магнитуд M=6.3 общият брой показват. че на повредите/течовете в градска мрежа на водоснабдяването е 66 (за 2422 km наличната в ГИС среда). В случая общата бройка на повредите не е нарастнала значително- от 62 става 66 при отчитане на материала на тръбите, но имаме в картата на настъпилите повреди и разрушения места с изявена концентрация на повреди (Фиг.6.15).

Направена е и оценка на повредите на водоснабдителната градска мрежа по кривата на ALA (2001) за 84 % доверителен интервал – Фигура 6.16. Оценката е извършена при отчитане на вида на материала на тръбите. Броят на повредите/течовете за този случай нараства на 191 общо за целия град.



Фиг. 6.16 Разпределение на броя на повредите/течовете в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3, оценки при 84% доверителен интервал. Материал на тръбите – съгласно статистическите данни за София (фигура 6.4)

Оценка на повредите на водоснабдителната система на града провеждаме и със зависимостите на HAZUS (1997). Съгласно тази методика тръбите се класифицират в две категории в зависимост от материала и връзките на тръбите. Тези категории са "крехки " и "дуктилни". За водопроводната система на София тръбите са класифицирани по два начина в зависимост от състоянието им. Първата класификация дава следната картина на разпределение на тръбите: 59% от

дължината на мрежата са крехки тръби и 41%-дуктилни. При второто разпределение на вида на тръбите само 20% от цялата дължина на водопроводната мрежа попада в тип дуктилни тръби.

Повечето от тръбите на водоснабдителната система на град София са в зони с PGV<= 13 cm/sec (Фиг.6.8). При тези условия, процедурата на HAZUS се очаква да даде по-ниски стойности за повредите на вкопаните тръби в сравнение с процедурата на ALA (2001). При материал на тръбите класифициран съгласно процедурата на HAZUS, (вариант с 41% дуктилни тръби) дава общо 38 повреди във водоснабдителната мрежа на София. Разпределението на повредите в града е представено на фигура 6.20.

Дори при най-неблагоприятна класификация на тръбите съгласно процедурата на HAZUS (само 20%- дуктилни тръби) броят на повредите в цялата водоснабдителна мрежа на град София нараства до 47, която стойност е по-ниска от оценката (66 броя повреди) по ALA (2001) с линеен модел и отчетен вид на материала на тръбите в съответствие със статистическите данни за София. Разпределението на повредите в града е представено на фигура 6.22 при класификация по таблица 6.8.



Фиг. 6.20 Разпределение на броя на повредите/течовете в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3 съгласно методиката на Hazus (1997) и материали съгласно таблица 6.7.



Фиг. 6.22 Разпределение на броя на повредите/течовете в тръбопроводната система за питейна вода на София от земетресение с магнитуд М=6.3 съгласно методиката на Hazus (1997) и материали съгласно таблица 6.8.

От направения анализ се вижда, че за примерното земетресение с магнитуд 6.3 най-ниската стойност за оценката на броя на повреди и течове във водоснабдителната система на град София е 38 (съгласно HAZUS). Горната граница на повредите/течовете се получава от кривата на уязвимост по методиката на ALA (2001) с 84% доверителен интервал. Тази оценка дава 191 повреди общо. Тези цифри се отнасят за наличната в ГИС среда водопроводна мрежа от 2422 км. Като коригираме съответно за 3230 км границите на оценките за повредите/ течовете съответно се движат от 88 до 255. Като имаме предвид, че голяма част от тръбите се ползват над 35 години, по-вероятно е да очакваме голям брой повреди във водоснабдителната система на град София, по-близки до високата стойност на интервала на получените повреди.

Повредите в тръбопроводите на уличната мрежа ще доведат до прекъсване на водоснабдяването в малки райони от града. За тези повреди/течове в старата градска част, където би имало разрушения от повредени сгради периода на възстановяване на водоснабдяването ще се удължи. При повреди в главните водопроводи в градската част поради съществуващите връзки между ринговете, водоподаването винаги може да се възстанови по някоя от връзките. По-опасен довеждащите сценарий представлява повреда в водопроводи. Там преобладаващата част от довеждащи линии са дублирани и това значително намалява опасността от прекъсване на водоснабдяването на града. Най-опасно би било възникване на повреда в единичната линия, защото това ще доведе до намаляване значително на подаваното количество вода. Дори и да са много ниски оценките (под 1) за броя на повредите в главните довеждащи тръбопроводи, трябва да се има предвид, че рискът е по-висок за единичната линия. Това показва, че е необходимо за този участък да се провери има ли допълнителни фактори като свлачищни процеси, втечняване на почви и др., които могат да увеличат многократно риска от повреда там при сеизмични въздействия.

### ИЗВОДИ И ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Направена е класификация на съществуващите нормативни документи за изчисляване на вкопани тръбопроводи, подложени на преминаване на сеизмични вълни. Тази класификация дава необходимата начална информация за избор на нормативни документи от страна на проектанта в зависимост от изискванията към съответните тръбопроводи.

2. Разработена е практически ориентирана процедура при изчисляването на вкопани тръбопроводи, подложени на преминаване на сеизмични вълни, която посочва последователните етапи на изчисленията, документи за ползване за всеки етап, препоръки. Основните стъпки са както следва:

2.1 Установяване на модела за типа на сеизмичните вълни за площадката

С оглед на сигурността, оценката на максималните относителни деформации в почвата да се основава на скоростите на разпространение на повърхностните вълни, ако по кой да е от посочените критерии има и най-малката възможност за преобладаването им за дадена площадка.

#### 2.2 Определяне на параметрите на въздействието Предлага се за привидната скорост на разпространение на обемните вълни като разумно консервативно решение да се приеме скорост от 2 km/sec за определяне на максималната деформация в почвата, ако няма обоснована въз основа на геофизични данни привидната скорост за площадката.

2.3 Изчисляване на сеизмичното натоварване (максималната относителна деформация)

При проектиране на отговорни съоръжения препоръчваме за определяне на привидната/или фазова скорост на разпространение на сеизмичните вълни, да се ползва експертна компетентна помощ, да се извършат съответните геофизични проучвания за уточняване на параметрите на почвените слоеве и получаване на дисперсионната крива за площадката.

2.4 Определяне на реагирането на отделните участъци от вкопаните тръбопроводи

За решаване на сложната контактна задача при липса на специализиран програмен продукт може да се ползва процедурата на Goodling (1983), която дава ясно формулирани параметри за определяне напреженията в колената, тройниците, отклоненията и др. на вкопаните тръбопроводи при определено сеизмично натоварване. Разликите в напреженията, изчислени с процедурата на Goodling и с използване на модел с крайни елементи е малка, което дава предимство на проектанта да ползва изчисления на ръка с процедурата на Goodling (1983).

2.5 Проверка на получените резултати с граничните/допустими стойности в съответствие с нормативните документи.

3. От проведените многобройни числени изследвания са изведени практически граници на изменение на максималните напрежения при прилагане на съответните мерки за тяхното намаляване:

3.1 Направените изчисления потвърждават препоръка 6.6 (10) на Еврокод 8-Част 4 за тръбопроводи преминаващи през разломи.

При обичайните дълбочини на траншеите, максималните относителни деформации възникващи в тръбата в правите участъци рядко биха могли да надвишат граничните при натиск и да предизвикат повреди. Напреженията в колената, тройниците, отклоненията и др. могат да са над допустимите стойности на съответния нормативен документ.

3.2 Проведеният анализ конкретизира обхвата на приложение на мярка 6.6 (5) на Еврокод 8- Част 4.

За тръби с големи диаметри (D>300 mm), при които напреженията са над допустимите стойности, ефикасна мярка за редуцирането им е да се намали дълбочината на вкопаване при възможност (без да се влиза в противоречие с други технически изисквания). Дълбочината на вкопаване оказва по - значимо влияние при тръбите с големи диаметри отколкото при тръбите с малки диаметри.

3.3 Резултатите от числените изследвания определят количествено ефикасността на мярка 6.6(7) на Еврокод 8- Част 4.

Един от начините да се намалят напреженията във вкопания тръбопровод е като се сведе до минимум триенето между тръбата и околната почва чрез подходящо покритие на тръбата. Промяната на коефициента на триене от 0.5 на 0.3 води до намаляване на напреженията с 65%.

3.4 Направените изчисления определят количествено ефикасността на мярка 6.6(8) и В.1 (7) на Еврокод 8- Част 4.

Промяната на уплътнението и типа на обратната засипка също може да доведе до около 15% промяна на напреженията.

3.5 Анализът на резултатите от числените изследвания потвърждава препоръка 6.6 (6) на Еврокод 8- Част 4 за тръбопроводи преминаващи през разломи, определя се количествено ефикасността и обхвата на приложение на мярката.

При тръбите с малки диаметри е ефективно да се увеличи коравината на тръбата чрез увеличаване дебелината на стената. За тънките тръби (D=273, D=157) при увеличаване с 2 mm на дебелината на стените на коляното напреженията падат с около 30%.

3.6 Чрез числените изследвания е обоснована необходимостта от правилен подбор на модела на въздействието.

Най-важният параметър за възникващите във вкопаните тръбопроводи относителни деформации и напрежения е правилното определяне на дължината на сеизмичната вълна. Увеличаването двойно на дължината на вълната води до увеличение на напреженията в коляното над 3 пъти.

4. Направена е оценка на сеизмичния риск на водопроводната система за питейна вода на град София. Оценката включва следните основни положения:

4.1 За първи път е направената оценка на повредите/течовете във водопроводната система за питейна вода на град София при възможно земетресение с магнитуд 6.3, като е отчетен вида на материала на тръбите от системата. Оценката дава нагледна картина за възможните последици при силни земетресения.

4.2 Направената относително приблизителна оценка може да послужи успешно за изготвяне на план за действие при силно земетресение като част от превантивните дейности за намаляване последиците от силни ни движения

4.3 Оценката на повредите може да послужи за предвиждане на необходимите водни количества, както в периода непосредствено след силно земетресение за ограничаване на възникнали пожари, така и за възстановителния период с оглед на осигуряване на санитарно необходимите количества вода за населението в пострадалите райони.

4.4 Направеният анализ на възможните повреди по главните довеждащи водопроводи маркира мерки за обследване на участъците с единична линия, за избягване на недопустими последици върху водоснабдяването на столицата.

4.5 Обоснована е необходимостта от провеждане на детайлно обследване на съществуващото положение, постоянно попълване на наличната информация в ГИС среда за настъпили промени в системата, описване на всички ремонтни дейности като се класифицират по вид. Изследването показа, че липсват подробни данни за наличните тръби, трасетата им и почвените условия, необходими за получаване на достоверни зависимости за възможните повреди по тръбопроводната мрежа.

4.6 Определен е коригиращ коефициент за вида на материала за азбестоциментови и чугунени тръби въз основа на съпоставяне на данни за плътността на повредите на подземните тръбопроводи от земетресението Ашхабад (Савинов,1980) с кривите на ALA(2001)

4.7 Направеният анализ потвърждава необходимостта от по-нататъшни изследвания на възлите на водоснабдителната мрежа. За възлите е необходимо подробно събиране на данни и анализ на всеки възел по отделно.

В резултат на направения анализ на литературните източници и проведените числени изследвания са направени следните основни препоръки:

5. В момента има изведени редица емпирични криви на уязвимост на вкопани тръбопроводи при въздействие преминаване на сеизмични вълни, но не може да се направи еднозначна оценка кои криви или методика дават най-достоверни резултати. От прегледа на публикуваните изследвания са дефинирани следните препоръки:

5.1 Препоръчва се да се натрупат достатъчно данни за представителна обработка за получаване на кривите на уязвимост за вкопани тръбопроводи и инструментални записи на максималните стойности на земното движение в местата на повреди на тръбопроводите;

5.2 На този етап е добре да се направят изследвания с поне две криви на уязвимост и да се оценят повредите и с доверителните интервали на кривите на уязвимост. Така ще се получат долна и горна граница на възможните повреди, а преценката за по-достоверните стойности да се извърши въз основа на инженерни съображения.

6. Използвана е оригинална идея за представяне на водопроводната система в ГИС формат чрез градската улична мрежа.

#### НАУЧНИ ПРИНОСИ

1. Направена е класификация на съществуващите нормативни документи за изчисляване на вкопани тръбопроводи, подложени на преминаване на сеизмични вълни. Класификацията дава необходимата начална информация за избор на нормативни документи от страна на проектанта в зависимост от изискванията към съответните тръбопроводи.

2. Разработена е практически ориентирана процедура за изчисляването на вкопани тръбопроводи, подложени на преминаване на сеизмични вълни, която посочва последователните етапи на изчисленията, документи за ползване за всеки етап и препоръки.

3. Изведени са количествени критерии за изменение на максималните напрежения при прилагане на съответните мерки за тяхното намаляване въз основа на проведените многобройни числени изследвания:

3.1 Потвърдена е препоръка 6.6 (10) на Еврокод 8- Част 4 за тръбопроводи преминаващи през разломи.

3.2 Конкретизиран е обхвата на приложение на мярка 6.6 (5) на Еврокод 8-Част 4.

3.3 Количествено е определена ефикасността на мярка 6.6(7) на Еврокод 8-Част 4.

3.4 Количествено е определена ефикасността на мярка 6.6(8) и В.1 (7) на Еврокод 8- Част 4.

3.5 Потвърдена е препоръка 6.6 (6) на Еврокод 8- Част 4 за тръбопроводи преминаващи през разломи, определено е количествено ефикасността и обхвата на приложение на мярката.

3.6 Обоснована е необходимостта от правилен подбор на модела на въздействието.

#### НАУЧНО - ПРИЛОЖНИ ПРИНОСИ

4.1 За първи път е направената оценка на повредите/течовете във водопроводната система за питейна вода на град София при възможно земетресение с магнитуд 6.3, като е отчетен вида на материала на тръбите от системата. Оценката дава нагледна картина за възможните последици при силни земетресения.

4.2 Направената оценка може да послужи успешно за изготвяне на план за действие при силно земетресение като част от превантивните дейности за намаляване последиците от силни земни движения.

4.3 Оценката на повредите може да послужи за предвиждане на необходимите водни количества, както в периода непосредствено след силно земетресение за ограничаване на възникнали пожари, така и за възстановителния

период с оглед на осигуряване на санитарно необходимите количества вода за населението в пострадалите райони.

4.4 Маркирана е мярка за обследване на участъците с единична линия по главните довеждащи водопроводи.

4.5 Определен е коригиращ коефициент за вида на материала за азбестоциментови и чугунени тръби въз основа на съпоставяне на данни за плътността на повредите на подземните тръбопроводи.

5. Използвана е оригинална идея за представяне на водопроводната система в ГИС формат чрез градската улична мрежа.

6. Дадени са методически указания за начина за определяне на повредите/течовете в съществуващи тръбопроводни системи при силни земетресения.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Изказвам своите най-сърдечни благодарности на своите научни консултанти доц. д-р М. Костов и доц. д-р Д. Стефанов за оказаното ми доверие да участвам в отговорни практически задачи за определяне на сеизмичния капацитет на вкопани тръбопроводи, предоставената ми литература по темата и нормативни документи, което положи началото на развитието ми в тази тематика. Признателна съм им за оказаното време и препоръки за развитие на темата, за помощта при дефиниране на резултатите, редакцията и оформяне на дисертационната работа, за ползотворната критика и препоръки.

Благодарна съм на колежката Н. Колева за помощта й при изчисленията в ГИС среда, както и на всички колеги от департамент "Сеизмично инженерство", които ми помогнаха с данни, литература, дискусия или стимул да развия тази тема.

## НАУЧНИ ПУБЛИКАЦИИ, СВЪРЗАНИ С ДИСЕРТАЦИОННИЯ ТРУД ДОКЛАДИ НА НАУЧНИ ФОРУМИ

- 1. Kaneva A., 2005, Vulnerability of lifeline systems application to Sofia, X National Congress on Theoretical and Applied Mechanics, September, Varna
- Канева А., 2010, Изследване на параметрите за определяне на напреженията в стоманени вкопани тръбопроводи, подложени на сеизмични въздействия, Международна конференция Проектиране на сгради и съоръжения- DCB 2010, Варна
- Канева А., 2012, Изчисляване на вкопани тръбопроводи, подложени на преминаване на сеизмични вълни - нормативни документи, класификация и препоръки, Международна конференция Проектиране на сгради и съоръжения- DCB 2012, Варна

Дисертационният труд съдържа 104 страници текст, 15 таблици и 52 фигури. Използвани са 99 заглавия на литературни източници.