

Sisekaitseakadeemia
Päästekolledž

Sergei Petrov

RS060

PLAHVATUSTE SOOJUSKIIRGUSE MÕJU BLEVE NÄITEL

Lõputöö

Juhendaja:
Andres Talvari, PhD

Tallinn 2010

ANNOTATSIOON

SISEKAITSEAKADEEMIA

Kolledž:	Kuu ja aasta:
Päästekolledž	juuni 2010
Töö pealkiri:	
Plahvatuste soojuskiirguse mõju BLEVE näitel	
Töö autor:	Olen nõus oma lõputöö kättesaadavaks tegemisega elektroonilises keskkonnas.
Sergei Petrov	Allkiri:
Antud lõputöö on kirjutatud teemal „Plahvatuste soojuskiirguse mõju BLEVE näitel“. Lõputöö põhiosa pikkuseks on 40 lehekülge. Lõputöö sisaldab 3 tabelit ja 4 joonist. Töö on kirjutatud eesti keeles ja võõrkeelne kokkuvõtte vene keeles.	
Eesti riik on üks riikidest, mille kaudu transporditakse suures koguses veeldatud gaase. Eestis on mitu ettevõtet, kelle tootmisprotsess nõuab veeldatud gaasi kasutamist ja ladustamist. Ohutuse jaoks on oluline, et gaasiga seotud juhtumid oleks edukalt lahendatud. Lõputöö eesmärgiks oli anda võimalusi päästeteenistusele matemaatilise arvutamise abil operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel ja kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks. Uurimismeetoditest kasutati matemaatilise arvutamise meetodit. Läbiviidud lõputöö uuringud näitasid, et võrreldes arvutamise kaudu saadud andmed maailmas juhtunud õnnetuste tagajärgedega võib eeldada, et arvutuse kaudu saadud tulemused vastavad maailmas juhtunud õnnetuse tagajärgedele. Lõputöö tulemusena teeb autor ettepanekud operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel ja kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks.	
Võtmesõnad: plahvatus, soojuskiirgus, veeldatud gaas, süttimine, põlemine, aurustumine, detonatsioon, lööklaine, kriitiline rõhk, keemistemperatuur, lõhkeaine.	
Ключевые слова: взрыв, тепловое излучение, сжиженный газ, воспламенение, горение, испарение, детонация, ударная волна, критическое давление, температура кипения, взрывчатка.	
Säilitamise koht:	
Kaitsmisele lubatud	
Kolledži direktor: Margus Möldri	Allkiri:
Vastab lõputöö nõuetele	
Juhendaja: Andres Talvari	Allkiri:

SISUKORD

ANNOTATSIOON	2
SISUKORD	3
MÕISTETE JA LÜHENDITE SELGITUS.....	5
SISSEJUHATUS	8
1.PLAHVATUSED	10
1.1. Plahvatuse mõiste	10
1.2. Soojuskiirgus	11
1.3. Plahvatuse mõjud.....	13
2. BLEVE.....	15
2.1. BLEVE mõiste.....	15
2.2. Külma BLEVE	16
2.3. Kuum BLEVE.....	17
2.4. BLEVE'ga seotud õnnetused.....	17
2.5.1. Veeldatud gaaside omadused.....	21
2.5.2. Veeldatud gaaside süttimise eripärad	22
2.6. BLEVE arvutus meetodite kirjeldus	25
2.6.1 V. Marshali arvutusmeetod.....	25
2.6.2 FOCT P 12.3.047-98 arvutusmeetod	26
2.6.3 ALOHA arvutusmeetod.....	28
2.7. AS Sillamäe LPG terminal	28
3. BLEVE OHT	31
3.1. Transport.....	31
3.2 LPG ladustamine ja transportimine tehnoloogia	32
4. JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD.....	35
KOKKUVÕTE	37
PE3IOME.....	38

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU	39
TABELITE JA JOONISTE LOETELU	40

MÕISTETE JA LÜHENDITE SELGITUS

KVPAP- keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus. (BLEVE - boiling liquid expanding vapour explosion).

LPG- liquefied petrooleum gas (vedeldatud naftagaasid).

LNG- liquefied natural gas (maagaas).

ALOHA- Areal Locations of Hazardous Atmospheres.

Plahvatus – aine või tema oleku ülikiire muutus, millega kaasneb suure energiahulga vabanemine, temperatuuri järsk tõus ning lööklaine. Vabaneva energia liigi järgi eristatakse füüsilist, keemilist ja tuumaplahvatust (Talvari 2006: 205).

Füüsikaline plahvatus – plahvatusaine muutub ainult füüsiliselt, näiteks aurukatla plahvatus või meteoriidi löök maale langemisel (Talvari 2006: 205).

Keemiline plahvatus – soojusenergia ja gaasid eralduvad ülikiirete keemiliste reaktsioonidega. Tavaliselt on tegemist ülikiire oksüdeerumisega (Talvari 2006: 205).

Lõhkeaine – keemiline ühend (liitlõhkeaine) või ühendite mehhaaniline segu (liitlõhkeaine), mis soojuse, löögi, surve, hõõrdumise, elektrisädeme, leegi, keemiliste reaktsioonide või mõne muu algimpulsi tõttu ilma õhuhapnikuta kiiresti laguneb ja tekitab plahvatuse. Lõhkeained jagunevad paiskavateks ja brisantseteks (Talvari 2006: 205).

Paiskav lõhkeaine – lõhkeaine, mida iseloomustab keemiliste reaktsioonide kulgemise suhteliselt väike kiirus (400-1000 m/s), mille tagajärjel kasvab aeglaselt gaaside surve ümbrusele ning tema toime on seetõttu paiskava iseloomuga (Talvari 2006: 205).

Brisantne lõhkeaine – lõhkeaine, mida iseloomustab suur detonatsioonikiirus, mille tagajärjel gaaside surve kiire kasv lõhkamispaigas mõjub purutavalt ümbrusele. Brisantsed lõhkeained jagunevad omakorda initsierivateks ja tööstuslikeks lõhkeaineteks (Talvari 2006: 205).

Initsieriv lõhkeaine – brisantne lõhkeaine, mis plahvatab kergesti suhteliselt nõrga algimpulsi toimel, kasutatakse detonaatorite valmistamisel. Lõhkeainete ja lõhkamisvahendite ühisnimetuseks on lõhkematerjalid. Sõltuvalt molekulisest seoste tugevusest, algimpulsi võimsusest ja lõhkeaine omadustest võib lõhkeaine laguneda erineva kiirusega. Tekivad erinevad protsessid: termiline lagunemine ehk põlemine, pahvumine ehk plahvatuspõlemine või detonatsioon (Talvari 2006: 205).

Põlemine – suhteliselt aeglane oksüdeerumine (põlemiskiirus ei ületa 400 m/s), toimub ainult siis kui lõhkeaine temperatuur ei ületa leekpunkti. Lõhkaine põleb, kui kvaliteet on madal, algimpulss liiga nõrk vms (Talvari 2006: 205).

Detonatsioon – rõhu järsust suurenemisest põhjustatud erakordselt kiire (kuni 9000 m/s) eksotermiliste protsesside levik aines, millega kaasneb lööklaine. Detonatsioon iseloomustab brisantseid lõhkeaineid, mille mõjul kivim puruneb (Talvari 2006: 205).

Lööklaine – nähtus, mille puhul mingis keskkonnas tekib liikuv pind (laine front), kus keskkonna tihedus, rõhk ja osakeste kiirus muutuvad hüppeliselt. Seejuures keskkond puruneb, surub kokku või hakkab võnkuma. Lööklaine koos sellele järgi liikuva keskkonnaga moodustab detonatsioonilaine. Lõhkeaine detoneerimisel vabaneb väga kiiresti suur hulk soojusenergiat (1,3-6,3 MJ/kg), tekib hulgaliselt gaase (0,3-1,0 m³/kg) ja kõrge rõhk. Rõhk võib teha mehhaanilist tööd. Lõhketööde tulemused sõltuvad lõhkeainete tihedusest. Peale tühimikkudeta kompaktsel lõhkeaine tegeliku tiheduse kasutatakse puistetiheduse mõistet, mille määramisel arvestatakse ka tühimike mahtu.

Tahke lõhkeaine puistetihedus on 30-60% väiksem tegelikust tihedusest ning see sõltub lõhkeaine osakeste kujust ja mõõtmetest (Talvari 2006: 205).

Keemistemperatuur - on temperatuur, mille juures vedeliku aururõhk saab võrdseks välisrõhuga (atmosfäärirõhul), see tähendab aine hakkab keema (Talvari 2006: 205).

Kriitiline rõhk - on rõhk, mille korral gaas on nii gaasilises kui ka vedelas olekus, s.t. vedela ja gaasilise oleku vahel on tasakaal. Kõiki gaase ja aineid on võimalik viia vedelasse olekusse rõhu tõstmise ja temperatuuri alandamisega ja sealt edasi tahkesse olekusse rõhu alandamise ja temperatuuri tõstmisega (Talvari 2006: 205).

SISSEJUHATUS

Aastast aastasse erinevatel ettevõtetel maailmas arendatakse, täiustatakse ja muutuvad keerulisemaks tootmisprotsessid. Gaaside kasutamine, ladustamine, töötlemine ja transportimine omandab üha rohkem ja rohkem tähendust kiiresti arenevas maailmas. Enamik veeldatud gaase on põlevad, plahvatusohtlikud, mürgised ning seetõttu nendega ümberkäitumine vajab erilist tähelepanu ja ettevaatust.

Eesti riik on oma geograafilisest seisukohast üks riikidest, mille kaudu transporditakse suures koguses veeldatud gaase. Eestis on mitu ettevõtet, kelle tootmisprotsess nõuab veeldatud gaasi kasutamist ja ladustamist. Päästeteenistus on üks riigiasutustest, kes osaleb veeldatud gaasist põhjustatud õnnetuste tagajärgede likvideerimisel.

Lõputöö eesmärgiks on anda päästeteenistusele matemaatilise arvutamise abil võimalusi operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel ja kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks.

Eesmärgi saavutamiseks on lõputöö raames püstitatud järgmised ülesanded:

1. Kirjeldada plahvatuste lööklaine ja soojuskiirguse mõjud, uurida veeldatud gaaside põlemise eripärad, anda ülevaade veeldatud gaaside omadustest, kirjeldada BLEVE olemust, uurida teoreetiliselt ja hinnata BLEVE tekkimise ohtu ja temaga kaasnevaid tagajärgi.
2. Arvutuste abil teha matemaatilise mudeli LPG näitel, et näidata võimalikud tagajärjed BLEVE tekkimise korral.

3 Teha ettepanekud päästeorganisatsioonile kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks ja operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel.

Lõputöö empiirilise osa eesmägi täitmiseks on kasutatud kolme arvutusmeetodit: ГООТ P 12.3.047-98, ALOHA, V. Marshali arvutusmeetod. Nende abil arvutatakse soojuskiirguse mõju, tulekera diameetri ja kestvusaja BLEVE korral.

Lõputöö empiirilise osa raames püüdis autor tutvustada päästeteenistusele, millised ohud võivad kaasneda veeldatud gaaside plahvatuse korral. Lõputöö tulemusena tehakse päästeteenistusele ettepanekud kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks ja operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel.

1.PLAHVATUSED

1.1. Plahvatuse mõiste

Plahvatus on suure energiahulga ootamatu vabanemine, millega kaasneb lööklaine teke ja kõva mürin. Plahvatusega kaasneb inimesi ja ehitisi mõjutav potentsiaalne oht. Plahvatus võib olla kas keemilise või füüsilise olemusega. Füüsilise olemusega on tuumaplahvatused, samuti ka surve all olevate gaaside mahutite purunemised. Keemiline plahvatus on olemuselt eksotermiline reaktsioon tahke või vedelfaasis oleva ainega, või gaasilises faasis toimuv redoksreaktsioon, nt õhuhapniku ja peendispersses oleva tahke või vedelfaasis oleva põlevaine vahel või gaasi ja põlevaine auru molekulide vahel (Маршалл 1989: 241).

Gaasipilve plahvatuse korral toimub reeglina tulepahvak (deflagratsioon). Pahvumise korral liigub põlemistsoon edasi soojusjuhtivuse teel kiirusega 400-1000 m/s. Vabaneva energia hulk on sama suur kui detonatsioonil. Vabanev võimsus on suhteliselt väike (kümneid kordi väiksem kui detonatsioonil), kuna kiirus ei ole eriti suur. Pahvumine on iseloomulik paiskavatele lõhkeainetele, mille kasutamisel suurte laengute puhul ei purune kivim väikesteks tükkideks. Deflagratsioon tekib gaasi-õhusegu põlemisel, õhk-bensiinisegu põlemisel, mootorikütuse või pürotehniliste ühendite põletamisel (Talvari 2006: 125).

1.2. Soojuskiirgus

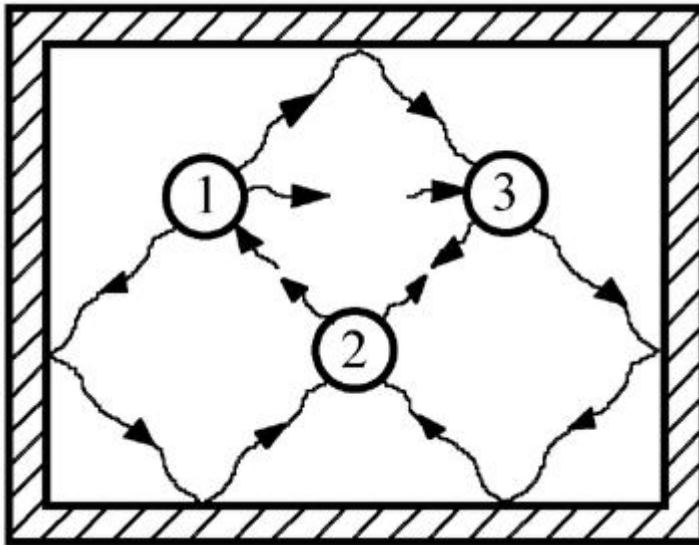
Soojuskiirgus, temperatuuri kiirgus, elektromagnetiline kiirgus, mida keha kiirgab, tekivad tänu keha sisemisele energiale. Soojuskiirgus omab üldist spektri, mille maksimumi asend sõltub keha temperatuurist.

Keha temperatuuri tõusuga tekitatud kogu soojuskiirguse energia suureneb ja maksimum liigub piirkonna väikeste lainepikkuste juurde. Soojuskiirgust kiirgavad näiteks sulametalli pind, maa atmosfäär jne (Talvari 2009: 179-180).

Kuumenenud soojuskisirgataivate kehade jaoks vastab tõe Kirchhoffi kiirguse seadus. Seadus seob nende kiiratud ja neelatud võimekused koos kiiratud absoluutse must keha võimekusega (Мартинсон, Смирнов 2002: 5).

G. Kirchhoffi seadus: mis tahes kehade kiiratud ja neelatud omaduste vahel peab olema side. Katse näitab, et soojuskiirguse tasakaal süsteemis (joonis 1) võib tekkida ainult siis, kui iga keha hakkab kiirgama ja neelama ajaühikus sama palju energiat. See tähendab, et keha, mis neelab kiirguse intensiivsemalt ükskõik mis sagedusega, hakkab samuti selle kiirguse intensiivsemalt kiirgama (Мартинсон, Смирнов 2002: 5).

Seega, lähtudes detailse tasakaalu printsiibist on võime kiirguse ja neelamise vahel looduses võrdne kõike kehade jaoks. See puudutab ka absoluutset must keha, mis antud temperatuuril on universaalne üks ja sama sageduse funktsioon (laine pikkus) (Мартинсон, Смирнов 2002: 6).

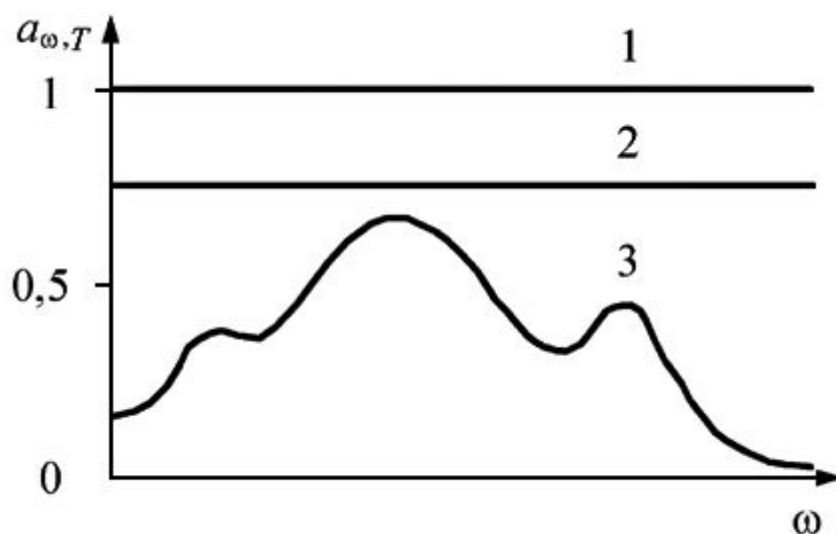


Joonis 1. Soojuskiirguse vahetus (Мартинсон, Смирнов 2002: 6)

Täieliku termodünaamilise tasakaalu juures kõik keha osad on ühel temperatuuril ja soojuskiirguse energia, mida kiirgab iga keha, kompenseeritakse neelamiskehade energiaga. Sel juhul on keha soojuskiirgus termodünaamilises tasakaalus ja seda nimetatakse tasakaalustatuks kiirguseks (tasakaalustatud on absoluutse must keha kiirgus) (Мартинсон, Смирнов 2002: 6).

Oma eripära järgi ei saa keha neelamisvõimekus olla rohkem kui üks. Keha, mille neelamisvõimekus on vähem kui üks ja sagedusriba on koguaeg üks ja sama, nimetatakse hall kehadeks (Мартинсон, Смирнов 2002: 6).

Soojuskiirguse teooria iseärane koht on absoluutne must keha. Nõnda nimetas G. Kirchhoff keha, mille sagedusriba ja ükskõik mis temperatuuri juures neelamisvõimekus on võrdne ühega. Tegelik keha peegeldab alati osa energiast, mida ta saab väljaspoolt (joonis 2). Isegi tahm oma omadustega läheneb absoluutsele mustale kehale ainult optilises ulatuses (Мартинсон, Смирнов 2002: 6).



Joonis 2. 1. Absoluutselt must keha; 2. Hall keha; 3. Tegelik keha. (Мартинсон, Смирнов 2002: 7)

Uurides soojuskiirguse mõju inimese organismile võib esile tuua inimese nii psühholoogilisi kui ka patoloogilisi kannatusi. Psühholoogilise mõjuga kaasneb pulsi sageduse suuremine, higistamine, kehatemperatuuri tõus, mis avalduvad ainult siis, kui on tegemist pikaajalise toimega (Sirel 2008: 12).

Soojuskiirguse patoloogiline mõju on seotud nahas neeldunud soojust tekitatud soojuskahjustustega. Soojuskiirgust tekitatud nahakahjustused jaotatakse esimese, teise ja kolmanda järgu põletushaavadeks. Soojuskiirguse poolt tekitatud soojuskahjustused on raskelt ravitavad ja paljudel juhtudel võivad põhjustada surma (Sirel 2008: 13).

1.3. Plahvatuse mõjud

Plahvatuse mõjutegurid on mõistlik jagada erinevatesse rühmadesse. Esimesel liigitamistasemel jaotatakse plahvatuse mõjutegurid reeglina kahte põhiliiki: otsesed ja kaudsed mõjutegurid. Põhiliseks otseseks mõjuteguriks on plahvatuslaine (rõhulaine ja lööklaine) poolt tekitatud ülerõhk (Sirel 2008: 67-68).

Kaudsete mõjutegurite hulka kuuluvad kaks alarühma: teise ja kolmanda järgu mõjutegurid (Sirel 2008: 68). Teise järgu mõjutegurid on teravad killud ja tükid. Kolmanda järgu põhilisteks mõjuteguriteks on inimese pikalilöömine ja vastu seina (või teisi tugevaid takistusi) paiskamine (Sirel 2008: 68).

Võrreldes lõhkeaine ja veeldatud naftagaasid plahvatuse korral on lõhkeainetel soojuskiirguse mõju suurem ja lööklaine tugevam. Lõhkeainest või veeldatud gaasist suurel määral eralduv soojus sõltub põlevainete kogusest ja hapniku sisalduse suhtest. Juhul kui aine oksüdeerib täielikult tekitab maksimaalselt võimalik soojuse hulk.

2. BLEVE

2.1. BLEVE mõiste

Keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatuse mõistet (*ingl.k. BLEVE* ehk *Boiling Liquid Expanding Vapour Explosion*) leiutas 1960-ndatel aastatel ameeriklane Uilber Uolls. BLEVE on keeva vedeliku paisuvate aurude plahvatus. Selline sündmus võib tekkida siis, kui rõhu all olev anum on tulekahju piirkonnas. Anuma soojendamine paneb vedelikku keema ja seejärel tõuseb anumal rõhk. Kui normaalsetes tingimustes tõuseb anumal rõhk üle projekterimisnormi, siis väljalaskeklapp võib seda kaitsta. Kuid osa anuma seintes, mis asub ülalpool vedeliku taset, hakkab oma tugevust kaotama ülekuumenemise tõttu. Tulemusena läheb anum katki ja sisu lendab plahvatuslikult laiali. Kui anuma sisaldus on tuleohtlik aine, siis plahvatuse korral tekib äkiline süütamine, mis omakorda viib tulekera tekkimisele. Kuigi anuma plahvatuse tagajärjel tekib lööklaine, mis on võimeline tekitada mõned kahjustused, on suurimaks ohuks sel juhul soojuskiirgus ja kildude laialilendamine (veeldatud tuleohtlike gaaside juhul). Sarnased nähtused võivad esineda ka kokkusurutud gaasiballoonides, kuid sellisel juhul ei teki hetkeline aurustumine. Kui lenduvate vedelikega tünnid satuvad tulekoldesse, siis võib tekkida plahvatus ja plahvatuse hetkel võib aurude ja hapniku segu sisu pidada veeldatud gaasiks (Маршалл 1989: 160-161).

Eespool nimetatud stsenaarium koosneb neljast etapist:

1. Surve all oleva anuma katvus leegiga;
2. Leegi tegevus nõrgestab mittemääritud seinu osasid ja see viib nende lagunemiseni;

3. Seejärel tuleb plahvatus, mis tekib rõhu suurendamise tulemusena. Vabaneb vedelgaas, mis kohe aurustub;

4. Vedeliku äkilise aurustumise puhul süttivad aurud ja tekib tulekera.

Plahvatuse mõiste iseenesest sisaldab ainult kolmandat etappi. Salvestatud päris palju juhtumeid, kus avarii toimus esimesel ja teisel etapil. Sellised juhtumid tekkisid aurukatla plahvatuste korral. Avariid võivad tekkida siis, kui veetase kukub ülaosas allapoole, on valitud ebaõige töörežiim või operaatori hooletuse tõttu. Ülalpool loetletud rikkumised viivad mittemääritud osa seinu tekkimisele ja võib juhtuda avarii esimeses ja teises etapis. Kuid selline sissesuunatud plahvatus võib esineda ka muudel põhjustel, näiteks metalli kahjustuse tõttu. Sellisel juhul puudub avarii teine etapp. See kehtib ka veeldatud gaaside anumate puhul, kus tekib rõhu tõus. Kuigi auru pilvede plahvatuse korral tekib ülerõhk, mis võib laiendada mitme kilomeetri ulatuses, ilmselt ei ületa maksimaalne rõhk (absoluutne) 0,2 MPa. Plahvatuse korral anuma kokkupuute punktis on maksimaalne rõhk maksimaalse ladustamise rõhu lähedal. Kuid ilmselt anuma paari raadiuse kaugusel langeb lainerinde rõhk kuni atmosfääri rõhuni. Propaan absoluutse rõhu all (see on 1 MPa) moodustab vastavalt teoreetilisi kaalutlusi, pilve, mis on umbes 80 korda suurem kui propaani esialgne maht atmosfäärirõhul ja raadius on ligikaudu 4,5 korda suurem kui tema esialgne raadius, juhul kui toimub ühtlane jaotus (Маршал 1989: 161-162).

2.2. Külma BLEVE

Külm BLEVE on füüsiline plahvatus, kusjuures vabastatud energia on kokkusurutud või veeldatud gaaside sisemise energia (täpsemalt, veeldatud auru sisemine energia). Selliste plahvatuste tugevus sõltub siserõhust. Purustuste põhjus on laiendatud aurude tõttu tekkinud lööklaine või plahvatatud anuma kest (Маршал 1989: 243-244).

Füüsikaline plahvatus võib tekkida külma ja kuuma vedeliku nihe korral, kui ühe vedeliku keemistemperatuur on palju suurem kui teisel vedelikul. Sel juhul toimub aurustumine plahvatuslikult. Tekkiv füüsiline detonatsioon kaasneb lööklaine ja ülerõhuga. Mõnel juhul ulatub ülerõhk sadu megapaskalid (Маршал 1989: 244).

2.3. Kuum BLEVE

Kuum BLEVE on keemiline plahvatus, kus energia vabastamise põhjuseks on eksotermiline keemiline reaktsioon kütuse ja oksüdeerija vahel. Keemiliste plahvatuste korral energiaallikateks on iseenesest kiirendavad eksotermilised reaktsioonid põlevate ainete ja oksüdeerija vahel, või termilise lagunemise reaktsioon ebastabiilsete ühenditega. Mahuliste plahvatuste puhul hajub kütus (tahkes, vedelas või gaasilises faasis) oksüdeerija-hapniku sisaldavas õhus ja tekivad tolmutpilved, aurupilved (kütuseõhu segud) või gaasisehud (Маршал 1989: 244).

2.4. BLEVE'ga seotud õnnetused

Käesolevas peatükis tuuakse näited, kus avarii tagajärjel tekkis BLEVE plahvatus. Kõige märkamisväärsed avariid on toimunud Prantsusmaal Feyzini linnas, Mehhiko Ühendriikides Mehhiko linnas ja Ameerika Ühendriikides Klivlendi linnas.

Avarii Prantsusmaal Feyzini linnas toimus 04.jaanuaril 1966. aastal. Varahommikul umbes kell 6.40 püüdis Feyzini naftatehase operaator teha igapäevase tehnoloogilise operatsiooni – kogunenud vee alla laskmine kerakujulisest propaani mahutist (mahuti maht on 1200 m³). Oletatakse, et 3/4 mahutit oli täidetud, järelikult sisaldas see 450 tonni propaani. Vedela propaani leke kestis kaks tundi ja gaasiline propaan lekkis poolteist tundi läbi kaitseklappi. Arvatavasti võib propaani kõige õigemaks koguseks mahutis lugeda plahvatuse hetkel 200 tonni (hinnanguline kogus). Õhutemperatuur oli 0

°C, ja see on täiesti võimalik, et reservuaari äravoolu süsteemis tekkis kork. See võis tekkida jääst või propaani hüdraadist. Operaator avas mõlemad kraanid täielikult, ja nendest järsku hakkas voolama vedelik. Sellel hetkel ainuke võti, mis oli kinnitatud alumise kraanale langes maapinnale ja selle tõstmine oli võimatu. Tekkis propaaniaurude pilv. Tuult peaaegu ei olnud, seega sai pilv hajutatud kõikides suundades. Pilve süttimine toimus umbes kell 7.15, see tähendab et 35 minuti pärast kui propaanimahuti hakkas lekkima. Süttimine oli põhjustatud möödasõitvate autodest (Маршал 1989: 201).

Esialgu oli mahuti rõhk 7 baari. Seejärel hakkas mahuti alumise osa soojendamise tõttu rõhk kiiresti tõusma. Reservuaari avatud kaitseklappidest tulid välja gaasijoad kõrgusega 30-40 meetrit (Маршал 1989: 201).

Mahuti plahvatuse tõttu (plahvatus toimus 8.45 ehk kahe tunni ja viie minuti pärast avariid, ja poolteist tunni peale tulekahju algust) tekkis tulekera, mille tagajärjel hukkus 17 inimest (nendest on 11 tuletõrjujat) ja 80 inimest sai vigastada. Sai kannatada ka inimesed, kes asusid mahutist 300 meetri kaugusel. Natukese aja pärast plahvatasid veel 4 sfäärilist mahutit ja hakkasid põlema mitu bensiini- ja naftamahutit (Маршал 1989: 202).

19. novembril 1984. aastal toimus Mehhiko linnas (Mehhiko Ühendriigid) rida plahvatusi, mille tagajärjel tekkisid tulekahjud. Tulekahju kestis 20 tundi. Selle sündmuse tulemusena hukkus 500 inimest, vigastada sai 7231 inimest, nendest 144 suri haiglas ära. Umbes 200 tuhat inimest kaotasid oma kodu ja vajasisid evakueerimist (Маршал 1989: 232).

Avarii hetkel 3/4 mahutite pargist oli täidetud. Allpool toodud tabel näitab täpsemalt LPG kogust mahutites.

Tabel 1 . LPG kogus mahutites (Маршал 1989: 234)

Mahutite kuju ja arv	Nominaalne mahtuvus (m ³)	Üld mahtuvus (m ³)	Täituvus õnnetuse hetkel (m ³)
2 sfäärilist	2400	4800	4320
4 sfäärilist	1500	6000	3000
4 silindrilist	270	1080	972
14 silindrilist	180	2520	2268
6 silindrilist	54	324	292
3 silindrilist	45	135	121
21 silindrilist	36	756	680
Kokku : 54		15615	13653

Tõenäoliselt oli peamiseks sündmuseks LPG leke torustikus. Selle torustiku kaudu viidi veeldatud gaasid mahutitesse. Arvatavasti, tekkis leke torustikus maapinnast kõrgemal asuvate mahutite lähedal. Süttimine tekkis 5-10 minuti peale kui torustik hakkas lekkima. Süttimisallikaks oli tõrvikuvalgus, mis asus maapeal lekke kohast 100 meetri kaugusel. Pealtnägijate sõnul kaasnes süttimine plahvatuslega. Süttimine soodustas tulekera moodustumist. Tulekera tõusis õhku. Torustiku mõra kohast tekkis põlevast gaasist tugev tõrvikuvalgus, mis oli suunatud ühe sfäärilise mahuti suunas. Peale süütamist hakkas umbes 10 elumaja põlema. Kaheteistkümne minuti pärast plahvastas sfääriline mahuti, mille suunas oli torustikust tõrvikuvalgus suunatud. Tulemusena tekkis tulekera raadiusega 300 meetrit (Маршал 1989: 234).

Järgmise pooleteistkümne tunni jooksul oli seitse või kaheksa tugevat plahvatust ja palju väiksemaid plahvatusi. Plahvatasid peaaegu kõik silindrilised mahutid, mis olid ära visatud lõuna suunas erinevatele kaugustele. Selline olukord oli tingitud tulekahju soojuskoormusest, mis oli suunatud põhjaosa lõppu (Маршал 1989: 234).

Palju suuri mahutite kilde oli visatud 100 meetri kaugusele. Üks silindriline mahuti lendas 1200 meetri kaugusele, 11 reservuaari lendasid kaugemale kui 100 meetrit. Kaks reservuaari ei plahvatanud, kuid purunesid toe lagunemise tõttu ja kukkusid maapinnale. Peaaegu kõik 300 meetri raadiuses majad said tõsiseid vigastusi (Маршал 1989: 235).

Põhjusteks, miks avarii tekitas nii suuri kahjustusi, võib nimetada: 1) elamu rajoonid ehitati hoidlatest väga lähedal; 2) gaasihoidlate projekteerimise ja kasutamise vead; 3) torustikus puudus automaatne sulgemissüsteem, mida võiks rakendada avarii korral; 4) sfäärilistel mahutitel puudus termiline isolatsioon ja splinklersüsteem (Маршал 1989: 235).

Õnnetuse tagajärgi saab lähemalt näha tööstusettevõtete plaanil, mis on lisatud käesoleva töö lõppu (LISA 1).

20. oktoobril 1944. aastal toimus Klivlendi (Ameerika Ühendriigid) gaasitehases LNG leke. Esialgu oli gaasileke umbes 1900 tonni. Kahekümne minuti pärast toimus teine gaasipurse ja 1000 tonni LNG'd lekkis õhku. Lekkinud LNG süttis kiiresti, ja osa gaasist langes reovee äravooluks ettenähtud kanalisatsiooni. Hiljem sai sisemiste plahvatuste tõttu kanalisatsioon suuri kahjustusi. Tekkinud tulekahjus hävis täielikult tehas, 10 administratiivhoonet ja 80 eramaja. Kõik ehitatud hooned paiknesid lekkekohast 400 meetri kaugusel. Klivlendi valitsuse andmetel hukkus tulekahjus 128 inimest ja mitmed inimesed sai vigastada (200-400 inimest) (Маршал 1989: 194).

Avarii hetkel olid kõik reservuaarid täis tangitud (LNG kogus mahutites oli 2950 tonni), ning veeldatud maagasi lahjendamise masin ei töötanud. Vastavalt tunnistajate ütlustele, umbes kell 14.40 oli tunda tugevat maapinna vibratsiooni ja kuulda korinat. Mõned pealtnägijad märkasid gaasi või vedeliku (aerosoolid) voolud, mis läks silindrilise mahuti lõuna-lõuna-ida poolt. LNG voolud liikusid ida-ida-kagu suunas järk-järgult lamades maapinnale. Maagaas kattis hooned ja liikus edasi kõrval olevatele tänavatele, kus osa LNG gaasist sattus reovee kanalisatsiooni šahtidesse. Lekke kohal tekkis aurupilv, mis liikus põhja-põhja-kiirde suunas (tuule suunas) enam-vähem samas suunas kui aerosoolipilv. Varsti juhtus õhu- ja gaasisegu süütamine. On olemas tõendeid selle kohta, et orgaanilises keskkonnas tekkisid auru-õhu segude plahvatused. Sellised plahvatused tekkisid tehase territooriumil (kaks neist kerakujuliste mahutite ringkujulises ruumis – mahuti kere ja soojusisolatsiooni vahel), samuti juhtus ka eluhoonetes ja büroohoonetes selle tõttu, et gaas sattus keldritesse. Plahvatused toimusid samuti kanalisatsiooni äravoolusüsteemis, ja selle tõttu tekkisid teedel suured

mõrad. Kanalisatsiooni kaeva plahvatusest (kaev asus neljandast reservuaarist 350 meetri kaugusel) tekkis lehter sügavusega 8 meetrit, laiusega 10 meetrit ja pikkusega 20 meetrit. Plahvatuse tõttu arenes tulekahju ja 20 minuti pärast lagunes neljas reservuaar. Selle järgi lagunes reservuaar number kolm ja 1000 tonni LNG sattus õhku, mille tulemusena õhu-gaasi segu koheselt süttis. Väidetakse, et leegi kõrgus oli 900 meetrit (kui see väide on õige siis LNG leke raadius, mille tõttu tekkis tulekahju, pidi olema 150 meetrit, kuigi sellist levikut ei saa pealtnägijate ütlustega kokku viia). Oluline materiaalne kahju oli tekitatud gaasitehase lääneosas, mis tekkis tulekahju soojuskirguse mõjul. Neljandast reservuaarist kuni selle ala piirini oli 200-400 meetrit. Tuleb märkida, et tuult selles suunas ei puhunud (Маршал 1989: 198-199).

Õnnetuse tagajärgi saab lähemalt näha gaasitehase plaanil, mis on lisatud käesoleva töö lõppu (LISA 2).

2.5.1. Veeldatud gaaside omadused

Vedelgaas on standardtingimustel (760 mmHg sammast ja 20 °C juures) gaasilises olekus (propaani keemistemperatuur on -42 °C ja butaanil -0,5 °C), kuid juba suhteliselt väikese rõhutõusu puhul läheb üle vedelasse olekusse. Kui rõhku alandada, siis läheb veeldatud süsivesinikgaas kergesti üle gaasilisse olekusse ehk aurufaasi. Nimetatud omaduse tõttu võib neid gaase vedada veeldatud olekus ja hoida mitmesugustes mahutites, balloonides ja reservuaarides ning pumbata mööda torustikke kui teisigi vedelikke. Propaani ja butaani kriitiline temperatuur on vastavalt 96,8 °C ja 152 °C (kriitilisest temperatuurist kõrgemal ei ole võimalik rõhku suurendades gaasi veeldada).

Gaasilistel süsivesinikel on suur tihedus, mis ületab õhu tiheduse tunduvalt (tihedus õhu suhtes propaanil 1,5-1,6 ja butaanil 2,05). Nad difundeeruvad atmosfääri võrdlemisi aeglaselt. Nende süttimistemperatuur, võrreldes enamike teiste põlevgaasidega, on suhteliselt madal (propaani leekpunkt on < -42 °C, butaanil -60 °C) ja plahvatuspiirid õhusegus on samuti madalad (propaani plahvatuspiirkond on 2,5%...9.5% mahu,

butaanil 1,5%...8,5% mahu). Neid on võimalik kondenseerida kas temperatuuri alandamisega kastepunktini või rõhu suurendamisega.

Vedelas olekus on nendel gaasidel suur paisumistegur, mis tunduvalt ületab bensiini, petrooleumi ja vee paisumisteguri, kõrge aururõhk, mis kasvab koos temperatuuri tõusuga, ja võrreldes veega suhteliselt väike tihedus.

2.5.2. Veeldatud gaaside süttimise eripärad

Iga gaasi jaoks on olemas hapniku sisalduse tase, mille all gaasi süttimine on võimatu. Selle peale on moodustatud põlemise mittetoetatud keskkonnad. See on tehtud tulekahjude ja plahvatuste vältimiseks.

Õhu-gaaside segu plahvatuseks on vaja järgmisi kindlaid tingimusi: 1) põleva gaasi olemasolu; 2) hapniku olemasolu (oksüdeerija); 3) piisavalt kõrge temperatuuri olemasolu (süütamisallikas) (Маршал 1989: 276).

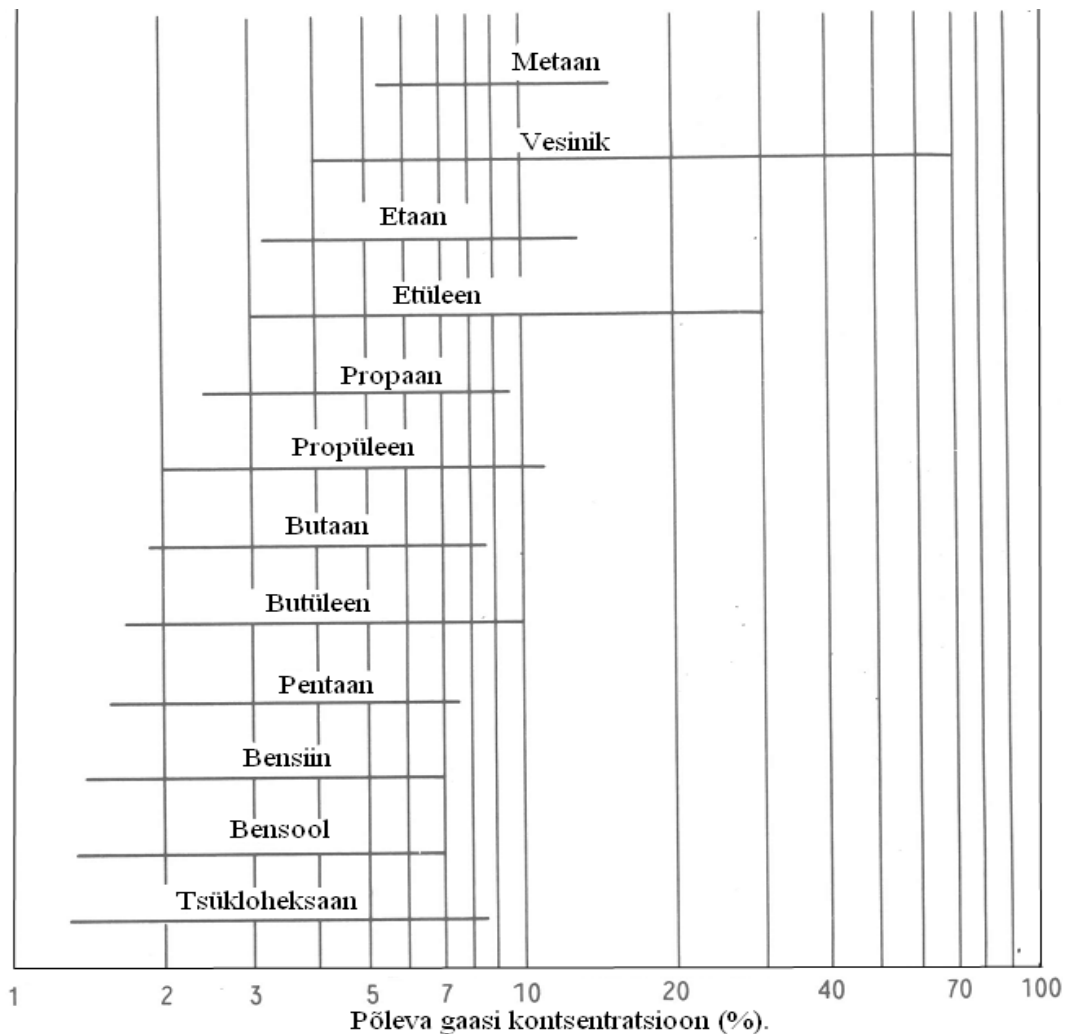
Niikaua kui gaas on mahutites ja torustikes või põleb kontrollitavates põletites, ei ole ta ohtlik. Tulekahju või plahvatuse korral muutub vedelgaas inimestele elukardetavaks ja ohustab ümbritsevaid ehitisi ja seadmeid.

Gaasi kontrollitaval põlemisel on leek peaaegu värvitu (tekkivad põlemisgaasid CO₂ ja veeaur on värvitud). Vabal põlemisel tekib lisaks eelnimetatule veel mittetäieliku põlemise saadusi (CO, imeväiksed süsinikuosakesed, lisanditest tingitud põlemisgaasid), mis värvivad leegi kollakast kuni mustani.

Plahvatus võib tekkida gaasi ja õhu segu süttimisel (peab olema süüteallikas) piiratud ruumalas: tööstusruum, kelder, kanal, reservuaar jms. Segu põlemisel antud tingimustes kuumenevad põlemisgaasid (gaasileegi temperatuur ulatub kuni 2000 °C-ni) ja paisuvad, tekitades kõrge rõhu silmapilkselt, mis purustab ehituskonstruksioone. Kuumad gaasid moodustavad tulekahjukoldeid. Gaasi-õhu segu plahvatamisel ulatub

leegi levimiskiirus mitmesaja meetrini sekundis. Sellega tuleb arvestada, kui plahvatus leiab aset avatud alal (näiteks ettevõtte territooriumil).

Kõrge temperatuuriga vedelgaasileek (propaanileegi temperatuur 2155 °C ja butaanileegil 2130 °C) põhjustab katmata kehapinnal raskeid põletusi, isegi lühiajalisel (sekundi murdosast kuni mõne sekundini) kokkupuutumisel. Leegi kestval toimel tekib süttivast materjalist ehitistel tulekahju, mittesüttivad metall- või raudbetoonkonstruktsioonid aga purunevad. Kaitsmata metallkonstruktsioonid võivad laguneda juba 15-20 minuti jooksul. Vedelgaas võib plahvatada ainult õhuga teatud kontsentratsioonis, alumise ja ülemise plahvatuspiiri vahemikus. Neid piire väljendatakse gaasi-õhu segu mahuprotsentides normaaltingimustel.



Joonis 3. Mõne gaaside ja vedelikku aurude süttivuse piirid (Маршал 1989: 113).

Temperatuuri tõustes laienevad plahvatuspiirid ning temperatuuril, mis ületab gaasi ja õhu segu süttimistemperatuuri, põleb gaas igasuguse mahulise vahekorra puhul. Tabelis 2.1 on toodud mõned LPG füüsikalised, keemilised ja tuleohtlikud omadused.

Tabel 2. Propani ja butaani füüsikalised ja, keemilised omadused (Autor)

Omadus	Propan C ₃ H ₈	Butaan C ₄ H ₁₀
Tekkesoojus, kJ/mol	103,8	-126
Põlemissoojus, kJ/mol	-2044	-2657
Tuleohtlik omadus	Põlev gaas	Põlev gaas
Leekpunkt, °C	-96	-69
Isesüttimistemperatuur, °C	470	405
Plahvatuspiirkond õhus, %maht	2,3...9,4	1,8...9,1
Plahvatuse maks.rõhk, kPa	843	843
Min.süütamisenergia, mJ	0,25	0,25
Leegi levimiskiirus, m/s	0,39	0,45

Vedelgaasi käitlev ettevõtte peab arvestama, et vedelgaas on õhust raskem (propani tihedus õhu suhtes on 1,5 -1,6, butaanil 2,05) ja lekkimise korral levib see mööda maad, täites madalamad kohad kui lohud, kaevud, augud jms. Seega võib gaas katta suure maa-ala ja süttida sadade meetrite kaugusel lekkimiskohast. Süttimiskohal tekkinud leek liigub väga kiiresti (mitusada meetrit sekundis) lekkimiskoha poole, mille tagajärjel tekivad suurel maa-alal leek ja kuumad põlemisgaasid. Tavaliselt ei ole võimalik seda leeki kustutada. Seepärast tuleb esmajärjekorras vältida gaasi lekkimist, tulenevat gaasi ja õhu segu tekkimist ning hoiduda lahtise tulega või muude süüteallikatega lähenemast kohale, kus võiks esineda gaasi lekkimist. Igal juhul, peab gaasi ja õhu segu tekkimise puhul olema valditud võimalus selle süttimiseks.

Gaasi ja õhu segu plahvatamisel tekib ruumis suurel hulgal kuume gaase, mille paisumise tõttu tõuseb rõhk. Gaasi ja õhu segu plahvatamisel maksimaalne rõhk ulatub 85 800 kgf/m² (ehituskonstruktsioonide tugevus on tavaliselt mõnesaja kgf/m² piires).

Tabel 3. Maksimaalne rõhk gaasi ja õhu segu plahvatamisel (Autor)

Gaas	Maksimaalne rõhk plahvatamisel [1 kgf/cm ² = 1 at] / [kPa]	Gaasi sisaldus segus, mis annab plahvatamisel maksimaalse rõhu (%).
Propaan C ₃ H ₈	8,58 / 841	4,6
Butaan C ₄ H ₁₀	8,58 / 841	3,6

2.6. BLEVE arvutus meetodite kirjeldus

Selles töös käsitlesin kolm arvutusmeetodit. Üks nendest on ALOHA programm (Eestis aktsepteeritav programm), V. Marshalli poolt pakutud arvutusmeetod ja vene standart ГOCT P 12.3.047-98.

2.6.1 V. Marshali arvutusmeetod

V. Marshall püüdis oma katsetes ennustada BLEVE diameetri, kestvuse aega ja võimsuse. Selleks ta pakkus järgmised arvutused.

$$D = 55 M^{1/3}, (1),$$

kus D on tulekera diameeter meetrites, M on süsivesinike mass (C_nH_{2n} valemi järgi) tonnides (Маршал 1989: 151).

$$T = 3,8 M^{1/3}, (2),$$

kus T on BLEVE kestvusaeg sekundites, M on süsivesinike mass (C_nH_{2n} valemi järgi) tonnides (Маршал 1989: 151).

Käsitledes energia vabastamist tuleb arvesse võtta vabastatud energiat ja selle vabastamise kiirust (võimsust). Kui vabastamise energia on lineaarne funktsioon M ja BLEVE kestvuse aeg on funktsioon $M^{1/3}$, siis

$$P = M^{2/3}, (3),$$

kus P on BLEVE põlemise tagajärjel tekkinud võimsus, M on süsivesinike mass (C_nH_{2n} valemi järgi) tonnides (Маршал 1989: 151).

Kasutades üleval toodud valemid võib arvutada soojuskiirguse intensiivsuse järgmise valemi järgi :

$$I_s = (P_{fb} \cdot F_r) / (4\pi R_{fb}^2) (4)$$

Kus I_s on soojuskiirguse intensiivsus (W/m^2), P_{fb} on BLEVE võimsus (Wt), F_r on soojuskiirguse osa üldenergiast (lubatakse võtta $F_r = 1$), R_{fb} on BLEVE raadius (m) (Маршал 1989: 180-181).

2.6.2 ГОСТ P 12.3.047-98 arvutusmeetod

BLEVE soojuskiirguse intensiivsuse, tulekera diameetri ja aja kestvuse arvutus „ГОСТ P 12.3.047-98“ meetodi järgi.

1. Soojuskiirguse intensiivsuse arvutus BLEVE korral tehakse järgmise valemi järgi (q , kWt/m^2) :

$$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau, (1),$$

kus E_f on soojuskiirguse leegi keskpinnaline tihedus (kW/m^2), F_q on kiirituse nurkkoefitsient, τ on atmosfääri läbilaske võime koefitsient.

2. Ef määratakse kindlaks katseandmete põhjal. Arvesse lubatakse võtta Ef vördne 450 (kW/m²).

3. F_q arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$F_q = \frac{H / D_s + 0,5}{4 \left[(H / D_s + 0,5)^2 + (r / D_s)^2 \right]^{1,5}} \quad (2)$$

kus H on BLEVE tsentri kõrgus (meetrites), D_s on BLEVE efektiivne diameeter (meetrites), r on kiiritatud objekti kaugus BLEVE maapinna keskpunktist (meetrites).

4. BLEVE efektiivne diameeter D_s arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$D_s = 5,33m^{0,327}, \quad (3),$$

kus m on põlevaine mass kilogrammides.

5. H tehakse kindlaks spetsiaalse uuringu käigus. Lubatakse arvesse võtta $H = D_s/2$.

6. BLEVE kestvuse aeg t_s (sekundites) arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$t_s = 0,92m^{0,303}, \quad (4)$$

kus m on põlevaine mass kilogrammides.

7. Atmosfääri läbilaskevõime koefitsienti t arvutatakse järgmise valemi järgi :

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s / 2) \right], \quad (5),$$

Kus r on kiiritatud objekti kaugus BLEVE maapinna keskpunktist (meetrites), H on BLEVE keskpunkti kõrgus (meetrites), D_s on BLEVE efektiivne diameeter (meetrites).

8. Tulekera kütuse massi arvutatakse järgmise valemi järgi:

$$m = V \rho \alpha, (6),$$

Kus V on mahuti ruumala (m^3), ρ on vedelafaasi tihedus (kg/m^3), α on mahuti täituvuse tase.

2.6.3 ALOHA arvutusmeetod

ALOHA (*ingl.k. - Areal Locations of Hazardous Atmospheres*) on arvutiprogramm. Programmi kasutavad inimesed, kelle kohustuse hulka kuuluvad keemiliste heitkoguste kontroll, õnnetuste planeerimine ja isiku koosseisu koolitamine. ALOHA on erinevate õnnetuste modelleerimise programm. Arvutiprogramm võimaldab koostada (modelleerida) järgmised õnnetused: toksilisuse heided, soojuskiirguse mõju, ülerõhu poolt tekitatud õnnetused, plahvatused, keemilised heided, mille tulemusena hajutatakse mürgine gaas väliskeskkonda, tulekahjud. ALOHA programmi kasutades tehakse järgmised sammud: 1) määratakse linn, kus on toimunud õnnetus, selle kuupäev ja kellaaeg; 2) ALOHA andmebaasist valitakse keemiline aine; 3) määratakse ilmatingimused; 4) pannakse paika reservuaari (mahuti) mõõdud; 5) pannakse paika aine olek ja kogus.

2.7. AS Sillamäe LPG terminal

AS Sillamäe LPG terminal on plaanis rajada Sillamäe sadama tööstustsooni. Sadam asub Sillamäe linna akvatooriumis Ida-Virumaa Soome lahe lõunarannikul Narva lahe

ääres. Kõige tõenäolisem BLEVE tekkimise oht terminali territooriumil võib tekkida järgmistel objektidel: vedelgaasi pumbajaamas, raudtee estakaadil, survealuste mahutite pargis, vedelgaasi balloonide täitmise ja autode laadimise kohas, mahutites. Planeeritav terminali võimsus on 700 000 - 800 000 tonni veeldatud gaasi aastas. Veeldatud gaaside üldkogusest propaan moodustab 15%, butaan 25% propaani-butaani segu on 60% (Linnupõld 2008: 7).

Selles töös teen BLEVE arvutused Sillamäe LPG terminali ühe suurema mahuti kohta ($V = 25\ 000\ \text{m}^3$, $D = 30\ \text{m}$, $H = 35\ \text{m}$). Kasutan selleks ALOHA, V. Marshalli ja GOCT P 12.3.047-98 arvutusmeetodid.

Ülesande lahendamiseks on toodud järgmised lähteandmed: mahuti $V = 25\ 000\ \text{m}^3$; $D = 30\ \text{m}$; $H = 35\ \text{m}$; mahutis on 5000 tonni propaani C_3H_8 ; propaani tihedus on $0,5853 - 45\ ^\circ\text{C}\ \text{g/cm}^3$ (lähteandmed iga arvutusmeetodi jaoks on samad).

Kasutades V. Marshalli arvutusmeetodit ja ülalpool toodud lähteandmeid sain järgmised tulemused:

$$D = 55 \cdot M^{1/3} = 55 \cdot 5000^{1/3} = 940\ (\text{m})\ \text{tulekera diameeter (1)}.$$

$$T = 3,8 \cdot M^{1/3} = 3,8 \cdot 5000^{1/3} = 65\ (\text{sek})\ \text{BLEVE kestvuse aeg (2)}.$$

$$P = M^{2/3} = 5000^{2/3} = 292\ (\text{GWt})\ \text{BLEVE võimsus (3)}.$$

$$I_s = (P_{fb} \cdot F_r) / (4\pi R_{fb})^2 = (292 \cdot 10^9 \cdot 1) / (4 \cdot 3,14 \cdot 470)^2 = 8380\ (\text{W/m}^2) = 8,4\ (\text{kW/m}^2)$$

soojuskiirguse intensiivsus 940 meetri kaugusel.

Kasutades GOCT P 12.3.047-98 arvutusmeetodi ja ülalpool toodud lähteandmed sain järgmised tulemused:

$$m = V \rho \alpha = 25000 \cdot 510 \cdot 0,34 = 4335 \cdot 10^3\ (\text{kg});\ \text{siin ma leidsin tulekera kütuse massi (6)}.$$

$D_s = 5,33m^{0,327} = 5,33 (4335 \cdot 10^3)^{0,327} = 789$ (m); sellest arvutusega tuli välja, et tulekera diameeter on 789 meetrit (raadius on 394.5 meetrit) (3).

$H = D_s / 2 = 789/2 = 395,5$ (m), selle arvutusega mina leidsin BLEVE keskpunkti kõrguse.

$$F_q = \frac{H / D_s + 0,5}{4 \left[(H / D_s + 0,5)^2 + (r / D_s)^2 \right]^{1,5}} = \frac{395,5 / 789 + 0,5}{4 \left[(395,5 / 789 + 0,5)^2 + (1000 / 789)^2 \right]^{1,5}} =$$

0,059. See arvutus näitas kiiritatuse nurga koefitsienti 1000 meetri kaugusel (2).

$$\tau = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{r^2 + H^2} - D_s / 2) \right] = \exp \left[-7,0 \cdot 10^{-4} (\sqrt{1000^2 + 395,5^2} - 789 / 2) \right] =$$

0,62. Sellega leidsin atmosfääri läbilaske võime (5).

$q = E_f \cdot F_q \cdot \tau = 450 \cdot 0,059 \cdot 0,62 = 16,46$ (kW/m²). See arvutus näitas soojuskiirguse intensiivsust. (E_f määrati kindlaks katseandmete põhjal; arvesse lubatakse võtta E_f võrdne 450 kWt/m²) (1).

$t_s = 0,92m^{0,303} = 0,92 \cdot (4335 \cdot 10^3)^{0,303} = 94$ (sek). Selle valemi järgi tegin kindlaks BLEVE kestvusaega (4)

Selleks, et ALOHA programmi abil oletada tulekera raadiuse, soojuskiirguse mõju ja BLEVE kestvuse aega tegin järgmised sammud. Määrasin ALOHA programmis meteoroloogilised tingimused: tuule kiirus 5 m/s (mõõdetud 10 m kõrgusel, põhja suunast), õhutemperatuur 15 °C, poolpilves ilm, keskmine niiskus 50%, inversiooni ei ole. Määrasin ülalpool toodud mahuti andmed ja aine kogus. ALOHA programm näitas järgmised tulemused: 1) BLEVE tulekera diameeter on 956 meetrit (raadius 478 meetrit); 2) BLEVE kestvuse aeg on 42 sekundit; 3) 1000 meetri kaugusel soojuskiirguse mõju on 35 kW/m².

3. BLEVE OHT

3.1. Transport

LPG gaasid transporditakse tanklaevades, terasballoonides, paakautodes (tsisterniga vedelike, gaaside vedamiseks). Kui terasballoonis olevat gaasi soojendada tõuseb vastavalt ka selle rõhk. Selline rõhu suurenemine esineb põlengu puhul ja võib olla mitmekordne. Selleks, et vabaneda kõrgetel temperatuuridel siserõhu poolt tekitatud pingest, võivad balloonid lõhkeda. Nii gaasiballoonidel kui ka -mahutitel nõutakse teenindusrõhu märgistust. Ohutuse tagamiseks ei tohi ballooni või paakautode siserõhk teenindusrõhku ületada. Kui gaasiballoon või paakauto lõhkeb, siis sellest eralduv gaas on tavaliselt süttimispiirides. Õhuga segunedes toimub isesüttimine. Kogu ümbritsev ala on leekides. Sel põhjusel loob gaasiballooni või paakauto lõhkemine üht kõige tõsisemat põlengutes ettetulevat ohtu.

Mahutid, kus hoitakse veeldatud naftagaasid, on rõhu all. Väga ohtlik olukord tekib, kui rõhu all olevate põlevgaaside (veeldatud naftagaasid, LPG) mahutid sattuvad leegi või põlengu mõjualasse. Selline olukord võib tekkida ka liiklusavarii korral, kus kütuselekkest tekib põleng. Vedelgaasi mahutites (raudtee tsisternid, paakautod jm) on raskem vedelfaas mahuti allosas, gaasiline faas vedeliku peal. Nõuetekohane ventilatsioonisüsteem ei ole põlengu juhul alati suuteline leevendama kiiret ülerõhust tingitud siserõhu tõusu. Nõrgestatud kestaehituse ja siserõhu tõusu kombinatsioon tingib mahuti purunemist ning auru (gaasi) momentaalset vabanemist ja süttimist. Selleks, et jahutada vedelgaasidega täidetud mahuti, tuleb juhtida veejuga kõige haavatavamatesse kohtadesse, mahuti ülaossa (aurufaasi alasse) ja kohta, kus leegid puutuvad kokku mahutiga.

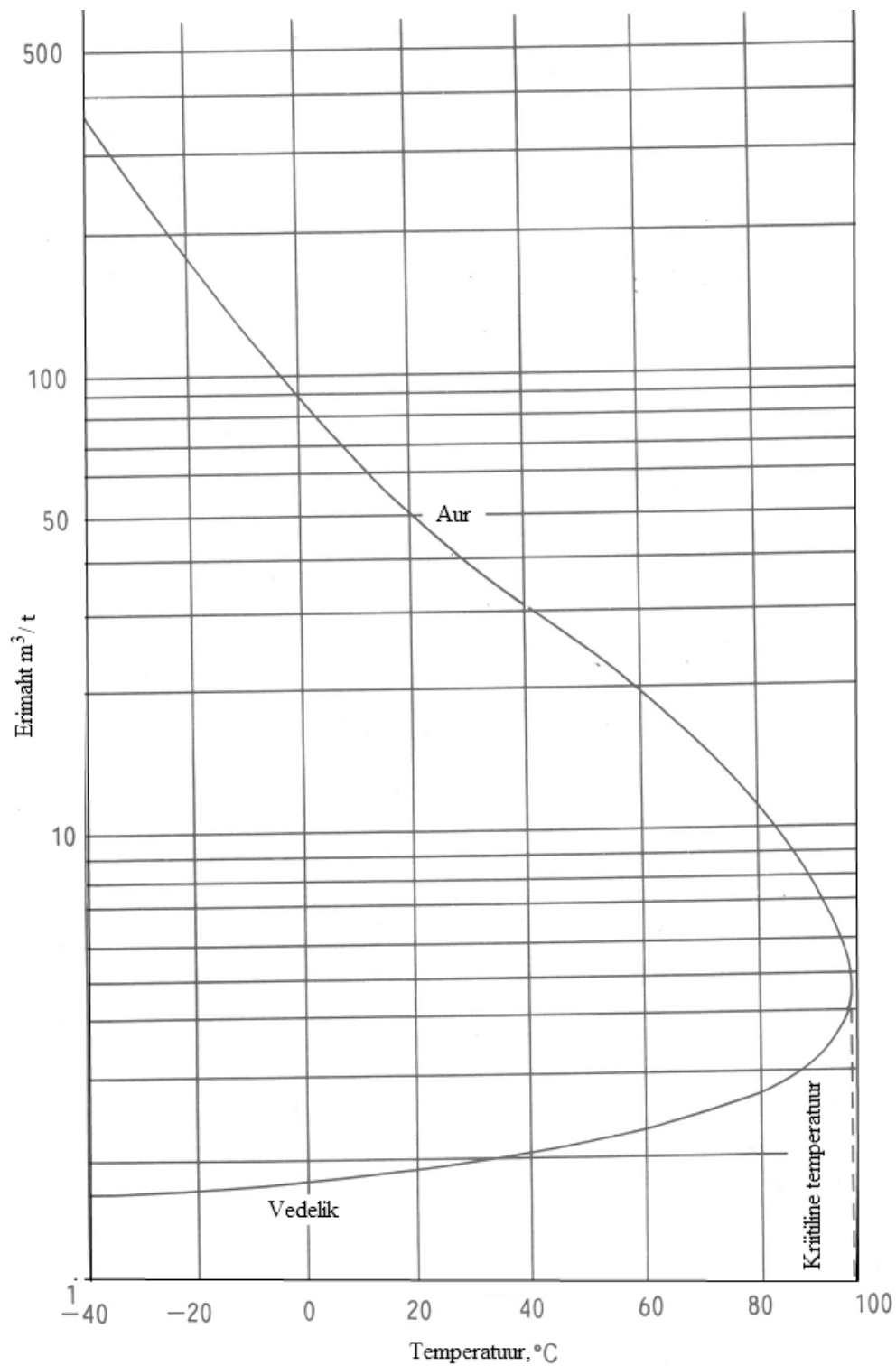
3.2 LPG ladustamine ja transportimine tehnoloogia

LPG ja LNG ladustamise ja transportimise tehnoloogia kehtestatakse vastavalt konkreetse aine omadustele (pannakse paika aineoleku diagrammi abil) ja väliskeskkonna temperatuuri diapsoonile (Маршал 1989: 71).

Väliskeskkonna temperatuuri ulatus sõltub geograafilises seisukohast. Maakeral kõigub see diapsoon $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuni $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. On selge, et iga geograafilise regiooni kohta tuleb ladustamise ja transportimise tingimused tasakaalustada vastavalt reaalsele kliimatingimustele. Aine ladustamise ja transportemise meetodid võib jagada neljaks põhiliseks kategooriaks (Маршал 1989: 72).

Esimene kategooria: ained, mille kriitiline temperatuur on väliskeskkonna temperatuurist madalam. Ained, nagu „permanentsed“ gaasid ja vedelas olekus tihti nimetatakse krüogeenseteks aineteks. Krüogeensete ainete hulgast kõigi ohtlikum (vastavalt keemiatööstuse ohtudele) võib lugeda maagaasi. LNG peamiseks koostisosaks on metaan, kuid gaas sisaldab ka väikestes kogustes süsivesinikke (kahe või enama süsiniku aatomite molekulis). Atmosfääri gaasid nagu lämmastik ja hapnik sattuvad samuti aine kategooriasse, mille kriitiline temperatuur on väliskeskkonna temperatuurist oluliselt madalam. Selle kategooria ainete ladustamine ja transportimine põhineb kvaliteetse soojustuse ja vaakumkestade kasutamisel. Tuleb märkida, et metaani, hapniku või lämmastiku hoidmine vedelas faasis (jahutamisel) on raske, sellepärast et seda võib teha veel külmema vedeliku olemasolul. Vältimatu väljakeemise tõttu tekkinud aur võib koheselt kasutada või uuesti veeldada edaspidiseks säilitamiseks, või välja lasta atmosfääri (Маршал 1989: 72).

Krüogeensete ainete käitumine lekke korral sõltub väliskeskkonna temperatuuri juurdevoolust (Маршал 1989: 72).



Joonis 4. Propani erimahu sõltuvus temperatuurist (Маршал 1989: 73).

Teine kategooria: ained, mille kriitiline temperatuur on väliskeskonna temperatuurist kõrgem ja keemistemperatuur on väliskeskonna temperatuurist madalam. Selleks, et sellised ained veeldada tuleb neid lihtsalt kokku suruda. Vedelas olekus kuuluvad need

veeldatud gaasi tähtsasse kategooriasse. Selles kategoorias on LPG gaasid, propaan, butaan, ammoniaak ja kloor. Nendel on eraldav võime ehk hetkeline aurustumine. See tähendab, et anuma lagunemisel osa vedelikust kohe aurustub ja osa vedelikust jahutatakse atmosfääri rõhu all kuni keemistemperatuurini. Selle tagajärjel võivad tekkida aurupilved, mis on väga ohtlikud keemiatööstuse jaoks. Sellised ained ladustatakse väliskeskkonna temperatuuri ja atmosfääri rõhu all, kuid neid saab ladustada ka jahutatud olekus (Маршал 1989: 73-74).

Kolmas kategooria: ained, mille kriitiline rõhk atmosfääri rõhust kõrgem ja keemistemperatuur on väliskeskkonna temperatuurist kõrgem. Selle klassi kuuluvad ained, millel on vedel olek atmosfäärirõhu all. Ained, millel on vastavalt väliskeskkonna temperatuurist madalam keemistemperatuur, võivad kuuluda teisse kategooriasse. Nii külma ilma käes kui ka atmosfääri rõhu all on butaan vedelik (keemistemperatuur on umbes 0 °C), aga etüleen sooja ilma käes on veeldatud gaas (keemistemperatuur on 13,5 °C) (Маршал 1989: 74).

Kõik ained, mis väliskeskkonna temperatuuril on tahked, sattuvad samasse kategooriasse. Tahked ained huvitavad meid ainult siis, kui nad on plahvatusohtlikud ained või õhu käes on hajutatud olekus (Маршал 1989: 71).

Neljas kategooria: ained, mida hoitakse kõrgete temperatuuride all. Kolmanda kategooria vedelikud, võivad käituda nii nagu veeldatud gaasid, kui neid hoitakse rõhu all, kuumas keskkonnas (temperatuur peab olema atmosfääri keemistemperatuurist kõrgem). Tüüpiliseks näiteks on veeaur katlas ja tsükloheksaan (keemistemperatuur on 80 °C, kriitiline temperatuur on 280 °C), mida hoitakse mõnedel ettevõtetel 9 baari juures ja selle atmosfääri keemistemperatuurist 70-80 °C kõrgemal temperatuuril (Маршал 1989: 71).

Teiste kategooriate hulka kuuluvad ained, mis on teatud keskkonna temperatuuri piires võivad kuuluda kahte eespool nimetatud kategooriasse, näiteks, kui intervall hõlmab allapiirilisi ja ülepiirilisi tingimusi. Tavaliselt, on sellised juhtumid ebatüüpilised ja nõuavad eraldi läbivaatamist (Маршал 1989: 74).

4. JÄRELDUSED JA ETTEPANEKUD

Lõputöö urimisosas kasutasin kolm arvutusmeetodit (ALOHA, ГООТ Р 12.3.047-98, V. Marshali arvutusmeetod). Võrreldes arvutamise kaudu saadud andmed maailmas juhtunud õnnetuste tagajärgedega võib eeldada, et arvutuse kaudu saadud tulemused vastavad maailmas juhtunud õnnetuse tagajärgedele.

Kriisireguleerimisbüroo tänapäeval kasutab ALOHA arvutusprogrammi, kuid see programm ei luba teha arvutusi, kus LPG mass ületaks 5000 tonni. Selles olukorras võib kasutada V. Marshali või ГООТ Р 12.3.047-98 arvutusmeetodi sest need ei oma LPG massi piiranguid.

Veeldatud naftagaaside õnnetuse korral (BLEVE ärahoidmiseks) päästetõdejuhi jaoks on oluline vältida sütteallikaid. Sütteallikaks võib olla: kuumad pinnad, leegid ja kuumad gaasid, mehaaniliselt tekitatud sädemed, elektriseadmed, uitelektivoolud, katoodkorrosioonikaitse, staatiline elekter, välg, elektromagnetväljad sagedusalas 9 kHz kuni 300 GHz, elektromagnetiline kiirgus sagedusalas 300 GHz kuni 3×10^6 GHz või lainepikkusel 1000 μm kuni 0,1 μm (optiline spekter), ioniseeriv kiirgus, ultraheli, soojusvahetuseta kompressioon, keemiline reaktsioon.

Kui gaas lekib aga põlemisprotsessi ei toimu, siis on vaja vältida plahvatusohtliku segu teket. Arvesse tuleb võtta ka seda, et LPG gaasid on õhust raskemad ja see viib selleni, et gaas koguneb madalatel aladel, hoonete keldrites või näiteks ehitise kokkupuute nurkades. Kohdades kus koguneb gaas on vaja gaasi-õhu segu viia aurude (gaasi) mitte süttimise piirini. Seda võib teha joatoru, sädemevaba suitsupumba või kompressorit kasutades, lahjendades gaasi-õhu segu õhu juurde vooluga. Päästetõõde käigus võib päästetõõtjate jaoks tekkida külmamisoht. Selle vältimiseks tuleb kasutada külmakaitse ülikonnad.

Kui jõudes sündmuskohale näevad päästetöötajad, et kaitseklapid on purunenud ja on toimumas intensiivne põlemine, siis on BLEVE risk kõrge. Antud olukorras tuleb määrata ohualad. Abiks võib olla käesolevas lõputöös tehtud arvutused.

KOKKUVÕTE

Käesoleva lõputöö eesmärgiks oli anda võimalusi päästeteenistusele matemaatilise arvutamise abil operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel ja kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks.

Lõputöö eesmärkide saavutamiseks sai kirjeldatud plahvatuste lööklaine ja soojuskiirguse mõjud, on uuritud veeldatud gaaside põlemise eripärad, on antud ülevaade veeldatud gaaside omadustest, on kirjeldatud BLEVE olemust, on teoreetiliselt uuritud ja hinnatud BLEVE tekkimise ohu ja sellega kaasnevatele tagajärgedele.

Arvutuste abil LPG gaaside näitel tegin matemaatilise mudeli selleks, et näidata võimalikud tagajärjed BLEVE tekkimise korral.

On antud ettepanekud päästeorganisatsioonile kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks ja operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel.

Empiirilise osa eesmärgi täitmiseks kasutasin kolme arvutusmeetodit: FOCT P 12.3.047-98, ALOHA, V. Marshali arvutusmeetod. Nende abil proovisin näidata ja kujundada BLEVE ohud.

Lõputöö empiiriline osa näitas päästeteenistusele, millised ohud võivad kaasneda veeldatud gaaside plahvatuse korral. Lõputöö tulemusena on tehtud ettepanekud päästeteenistusele kriisireguleerimisbüroo töö parandamiseks ja operatiivtegevuse tõhustamiseks päästetöödel.

Autori poolt tehtud ettepanekud on võimalik rakendada selleks, et arendada ja teha paremaks päästeteenistuse tööd.

РЕЗЮМЕ

Данная работа написана на тему "Влияние теплового излучения на примере взрывов BLEVE". Основная часть дипломной работы составляет 40 листов. Дипломная работа содержит 3 таблицы и 4 рисунка. Работа написана на эстонском языке и иностранный вывод на русском языке.

Эстонское государство это одно из государств, через которое перевозятся в большом количестве сжиженные газы. В Эстонии много предприятий, на которых производственные процессы требуют использования и хранения сжиженных газов. Поэтому для общей безопасности важно чтобы происшествия связанные с жижженными газами были успешно решены.

Цель дипломной работы при помощи математических вычислений дать возможность спасательной службе усилить оперативные действия, и улучшить работу бюро по чрезвычайным ситуациям.

Из исследовательских методов был выбран метод математических вычислений. Проведённые исследования дипломной работы показали, что в сравнении данных полученных путём математических вычислений с данными последствий происшествий в мире можно предположить, что результаты полученные при помощи вычислений соответствуют последствиям произошедших в мире аварий.

В результате дипломной работы делает автор предложения для усиления оперативной работы при спасательных операциях и улучшения работы бюро по чрезвычайным происшествиям..

VIIDATUD ALLIKATE LOETELU

Linnupõld, L. 2008. Nord Gas AS Sillamäe LPG terminaali asukoha valiku keskkonnamõju hindamine.

Мартинсон, Л. К; Смирнов, Л. В. 2002. Квантовая физика. МГТУ им. Н Э Баумана.

Маршал, В. 1989. Основные опасности химических производств. Москва "Мир".

Sirel, A. 2008. Soojuskirguse ja plahvatuse mõju inimestele ja ehitistele. Sisekaitseakadeemia Ferdida OÜ.

Talvari, A 2006. Ohtlikud ained . Sisekaitseakadeemia.

Talvari, A 2009. Põlevainete omadused. Sisekaitseakadeemia.

TABELITE JA JOONISTE LOETELU

Joonis 1. Soojuskiirguse vahetus; lk 12

Joonis 2. 1. Absoluutselt must keha; 2. Hall keha; 3. Tegelik keha ; lk 13

Tabel 1 . LPG kogus mahutites; lk 19

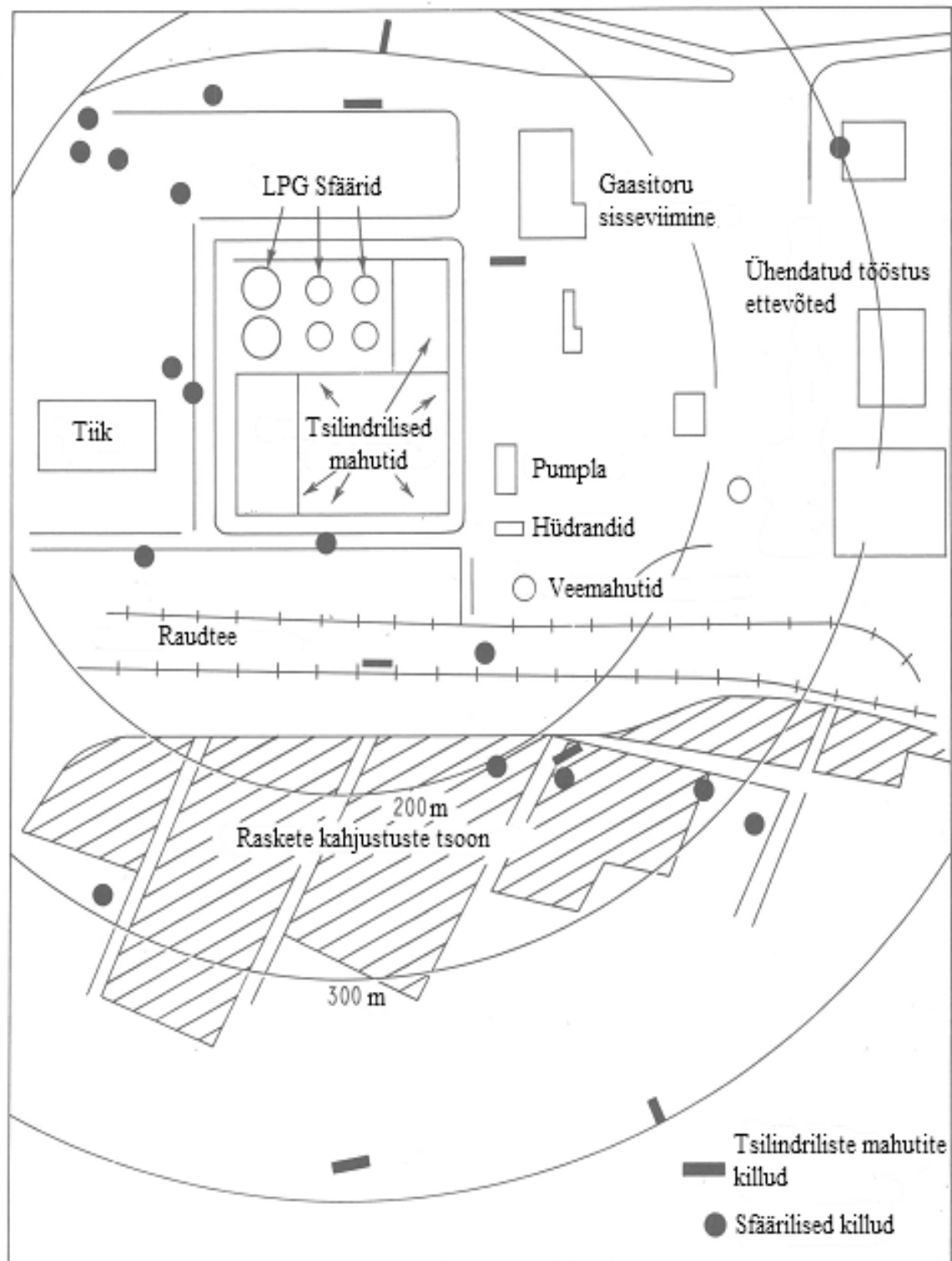
Joonis 3. Mõne gaaside ja vedelikku aurude süttivuse piirid; lk 23

Tabel 2. Propaani ja butaani füüsikalised ja, keemilised omadused; lk 24

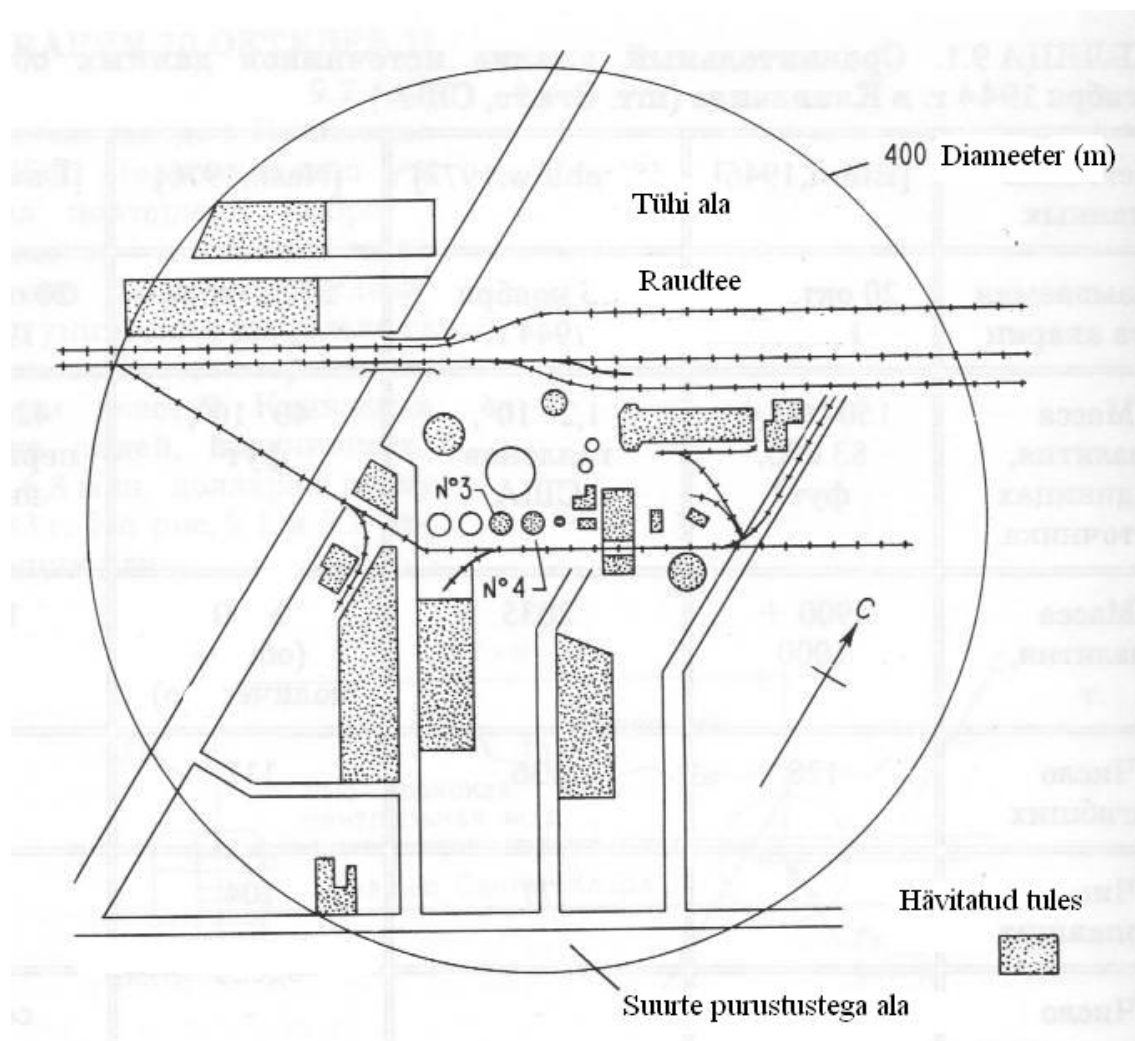
Tabel 3. Maksimaalne rõhk gaasi ja õhu segu plahvatamisel; lk 25

Joonis 4. Propaani erimahu sõltuvus temperatuurist; lk 33

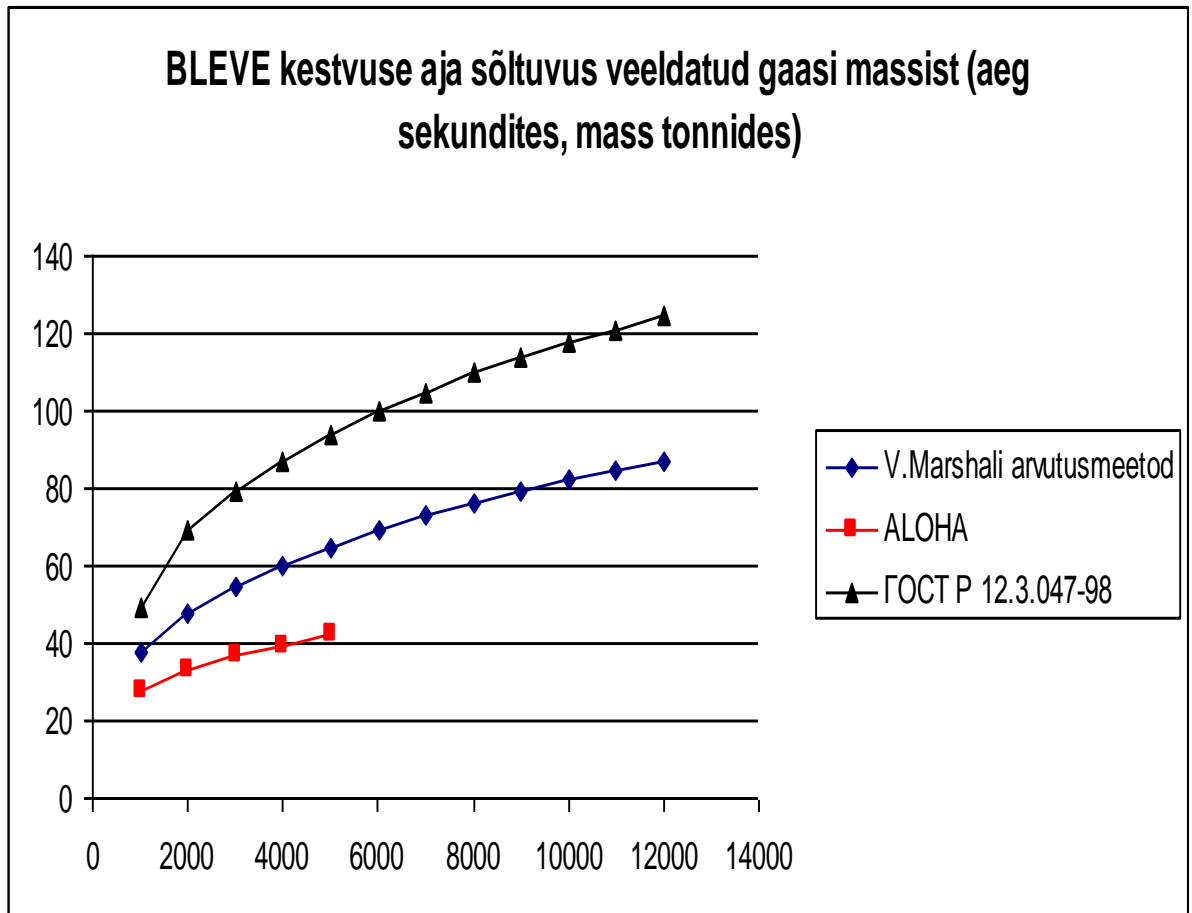
LISA 1. Tööstus ettevõtete plaan Mehhiko linnas (Meksika)



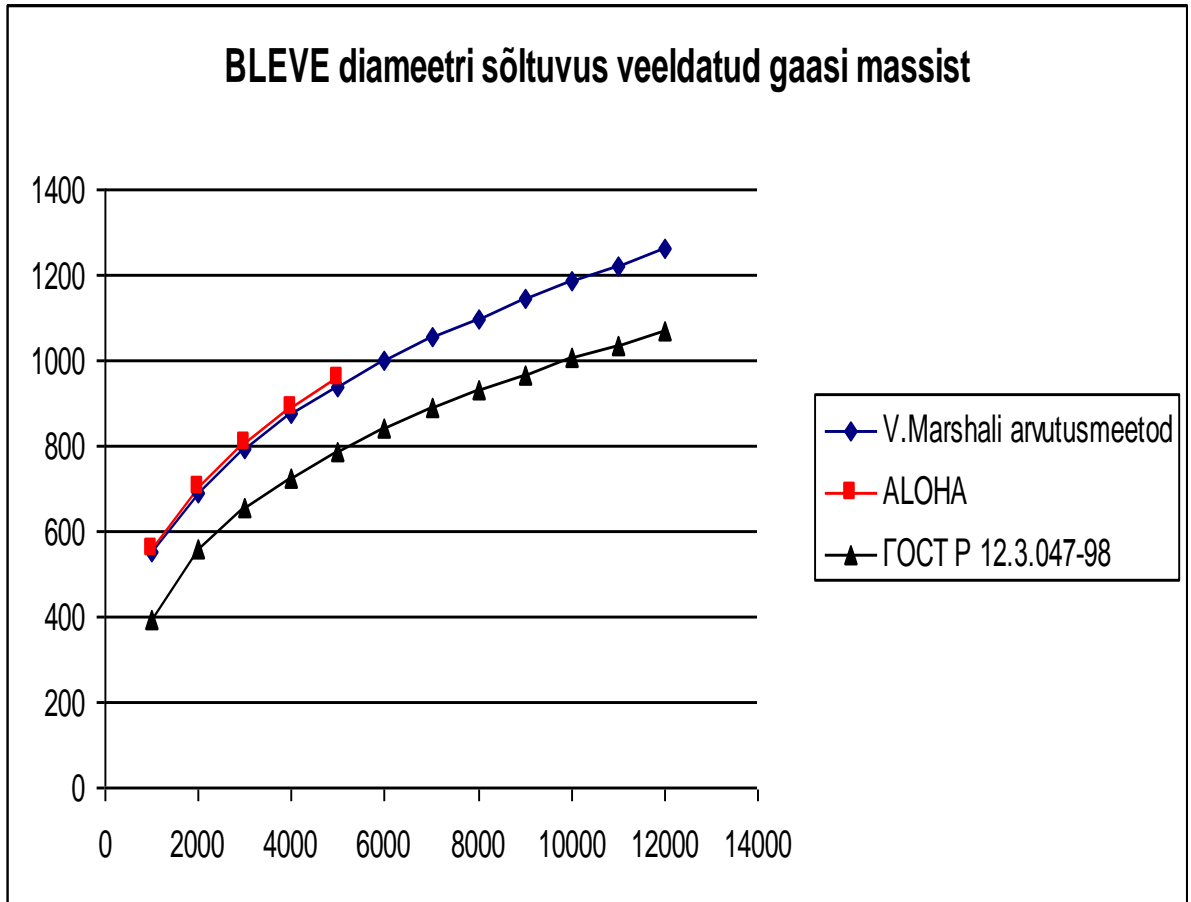
LISA 2. Gaasitehase plaan Klivlendi linnas (Ameerika Ühendriigid)



LISA 3. BLEVE kestvuse aja sõltuvus veeldatud gaasi massist



LISA 4. BLEVE diameetri sõltuvus veeldatud gaasi massist



LISA 5. Soojuskirguse sõltuvus veeldatud gaasi massist (BLEVE korral, 1000 meetrit kaugusel)

