

Česká zemědělská univerzita v Praze

Technická fakulta

Katedra mechaniky a strojnictví



Bakalářská práce

Model pohybující se nádoby s kapalinou

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Šleger, CSc.

Autor bakalářské práce: Pavel Moučka

PRAHA 2011

Vysoká škola: Česká zemědělská univerzita v Praze	Fakulta: Technická
Katedra: mechaniky a strojnictví	Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Student: **Pavel Moučka**

Studijní obor: Silniční a městská automobilová doprava

Název práce: Model pohybující se nádoby s kapalinou

Zásady pro vypracování:

Cíl práce: Vytvořit model uzavřené nádoby z částí naplněné kapalinou, pomocí kterého by bylo možné sledovat chování kapaliny v nádobě za pohybu, počítat tlaky v různých místech a síly působící na stěny nádoby.

Osnova práce:

1. Přeprava kapaliny v praxi
2. Metody výpočtu hydrostatických tlaků a sil při relativní rovnováze
3. Vytvoření modelu pohybující se nádoby
4. Výpočet tlaků ve významných místech nádoby
5. Výpočet silových účinků od kapaliny na stěny nádoby
6. Hodnocení výsledků

Metodika práce:

- vypracovat odbornou rešerši
- vybrat konkrétní nádobu používanou v praxi na přepravu kapaliny
- popsat teorii výpočtů silových účinků při relativním klidu
- vytvořit matematický model uzavřené nádoby s kapalinou
- využít model pro výpočty tlaků a sil ve významných místech
- vyhodnotit získané výsledky

Rozsah práce: 40 stran textu včetně obrázků, grafů a tabulek

Seznam doporučené odborné literatury:

Noskievič, J. a kol.: Mechanika tekutin. SNTL, Praha, 1987, 356 s.

Mathcad 12 User's Guide. MathSoft, Cambridge, 2004, 164 pp. ISBN 1-57682-297-4.

ŠLEGER, V., VRECIÓN, P.: Mathcad 7. Haar, Praha, 1998, 163 s. ISBN 80-238-1817-1.

Vedoucí bakalářské práce: doc. Ing. Vladimír Šleger, CSc.

Datum zadání bakalářské práce: 30. 11. 2008

Termín odevzdání bakalářské práce: 30. 4. 2010



prof. Ing. Radomír Adamovský, DrSc.

vedoucí katedry

prof. Ing. Vladimír Jurča, CSc.

děkan

V Praze dne 13. 1. 2009

„Čestně prohlašuji, že bakalářskou práci na téma Model pohybující se nádoby s kapalinou, jsem vypracoval samostatně, s použitím uvedené literatury a zdrojů.“

V Černošicích dne 8.dubna 2011

Pavel Moučka

Poděkování

Děkuji doc. Ing. Vladimíru Šlegerovi CSc. za odborné vedení, mnohé osobní a elektronické konzultace, cenné rady a připomínky. Dále děkuji všem spolužákům a blízkým za pomoc a podporu při zpracovávání této práce.

Abstrakt:

Záměrem této bakalářské práce je vytvoření funkčního matematického modelu pohybující se nádoby s kapalinou při stavu relativní rovnováhy. Práce je rozdělena do tří částí. První část je částí zabývající se přepravou kapalin v praxi, rozdělením cisteren do skupin se stručným popisem jednotlivých skupin a požadavky ze strany legislativy na přepravu a konstrukci cisteren. Druhá část se zaměřuje na výklad torie výpočtů hydrostatických tlaků a sil ve stavu relativní rovnováhy. Poslední třetí část je praktickým uplatněním druhé části, tedy samotné vytvoření matematického modelu pomocí počítačového programu Mathcad.

Klíčová slova: Cisterna, nádrž, tlak, hladina, síla.

Abstract:

The aim of this Bachelor thesis is creating of functional mathematical model of moving tank with water at state of relative balance. This thesis is divided in three parts. The first part deals with transport of liquids in the practice, with dividing of cisterns in the groups with brief description of every single group and with requirements for transport and cistern's construction from the legislation point of view. The second part is focused on the interpretation of theory for calculations of hydrostatic pressures and forces in the state of relative balance. The last part is putting of the second part in the practise, which means creation of mathematical model with help of computer's program Mathcad.

Key words: Cistern, tank, pressure, water level, force

ÚVOD.....	- 1 -
1. PŘEPRAVA KAPALIN V PRAXI.....	- 2 -
1.1. ROZDĚLENÍ CISTEREN.....	- 3 -
1.1.1. Cisterny podle umístění na podvozku	- 3 -
1.1.2. Cisterny podle podvozku.....	- 3 -
1.1.3. Cisterny podle přepravované kapaliny.....	- 4 -
1.1.4. Cisterny podle materiálu nádrže	- 5 -
1.1.5. Cisterny podle tvaru průřezu nádrže	- 5 -
1.1.6. Cisterny podle počtu komor.....	- 6 -
1.1.7. Cisterny podle provedení nádrže.....	- 7 -
1.2. POŽADAVKY NA CISTERNY	- 7 -
1.2.1. Legislativní požadavky na cisterny.....	- 8 -
1.2.2. Požadavky na cisterny ADR	- 8 -
1.2.3. Požadavky na cisterny hasičské.....	- 9 -
2. VÝPOČET HYDROSTATICKÝCH TLAKŮ A SIL PŘI	- 11 -
RELATIVNÍ ROVNOVÁŽE	- 11 -
2.1. DEFINICE RELATIVNÍ ROVNOVÁHY	- 11 -
2.2. PŘÍPADY RELATIVNÍ ROVNOVÁHY	- 11 -
2.2.1. Pohyb unášivý přímočarý rovnoměrně zrychlený/zpomalený.....	- 11 -
2.2.2. Pohyb rovnoměrný rotační	- 12 -
2.3. VÝPOČET HYDROSTATICKÝCH SIL PŮSOBÍCÍCH.....	- 12 -
NA STĚNY NÁDOBY	- 12 -
2.3.1. Určení tvaru a polohy hladiny pro pohyb unášivý, rovnoměrně zrychlený/zpomalený.....	- 12 -
2.3.2. Určení tvaru a polohy hladiny pro pohyb rovnoměrný rotační	- 13 -
2.3.3. Hydrostatická tlaková síla na rovinnou stěnu	- 15 -
2.3.4. Hydrostatická tlaková síla na zakřivenou stěnu	- 18 -
2.3.4.1. Složková metoda výpočtu hydrostatické síly působící na zakřivenou stěnu.....	- 18 -
2.3.4.2. Metoda náhradní roviny pro výpočet hydrostatické tlakové síly	- 19 -
3. MODEL POHYBUJÍCÍ SE NÁDOBY S KAPALINOU	- 20 -
3.1. VÝBĚR CISTERNY PRO MATEMATICKÝ MODEL	- 20 -
3.2. VYTVOŘENÍ MODELU A VÝPOČET	- 21 -
3.3. POSTUP TVORBY MATEMATICKÉHO MODELU	- 25 -
3.3.1. Kritická zrychlení	- 25 -
3.3.2. Výška průsečíku hladiny	- 26 -
3.3.3. Tlak v dolním rohu nádrže.....	- 27 -
3.3.4. Síla na stěnu nádoby.....	- 27 -
3.3.5. Zadané a vypočtené hodnoty a graf.....	- 27 -
4. ZÁVĚR	- 28 -
5. POUŽITÉ VELIČINY A JEDNOTKY	- 29 -
6. POUŽITÉ OBRÁZKY	- 30 -
7. POUŽITÁ LITERATURA A PRAMENY.....	- 32 -
PŘÍLOHA I	I
PŘÍLOHA II.....	I

Úvod

Přesun nákladní dopravy ze železnice na silnici znamenal velký rozvoj v konstrukci cisteren. Rozmach silniční nákladní dopravy si vynutil vznik několika nezávislých bezpečnostních předpisů pro přepravu po silnici. Z těch postupem času vznikl mezinárodně uznávaný a používaný předpis ADR pro přepravu nebezpečných věcí po silnici. Tento předpis je závazný pro přepravce a samozřejmě i výrobce přívěsů, návěsů a nákladních automobilů. Konstrukce nádrží cisteren se odvíjí od účelu použití, přepravované kapaliny, požadavků zákazníka a mnoha dalších parametrů. Při návrhu nádrže je jeho nedílnou součástí výpočet tlaků a sil na stěny nádrže. Tyto výpočty, včetně teorie výpočtů, a vytvoření matematického modelu pohybující se nádrže je hlavní část této práce.

1. Přeprava kapalin v praxi

Přeprava kapalin se v praxi uskutečňuje v závislosti na prostředí, kde se nachází dopravní cesta. Prostředí dopravy jsou podzemní, pozemní a vzdušné.

Podzemním dopravním prostředím rozumíme přepravu v produktovodech (ropovodech, plynovodech, ...). To je pro tuto práci nepodstatné, ale touto dopravní cestou a těmito zařízeními se uskutečňuje přeprava největšího množství kapalin na našem území.

Vzdušná přeprava kapalin se v praxi, na našem území, téměř nevyužívá pro její vysokou finanční náročnost. Výjimku tvoří speciální hasicí letadla a vrtulníky, používané při požárech ve venkovním prostředí.

Pozemní přeprava se uskutečňuje po silnicích, železnici nebo po vodních cestách.

Na vodních cestách se cisternové lodě označují jako tankery. Tankery dokáží přepravit kapaliny o hmotnosti desítek až několika stovek tun na jeden tanker. Vzhledem k omezenému rozsahu splavných vodních toků je na území České republiky tato přeprava používána na dolním toku Vltavy a následně pak na Labi.

Přeprava po železnici je vzhledem k hustotě železniční sítě a možnosti přepravy velkého množství kapalin v jedné cisterně a možnosti řazení mnoha cisteren do jednoho vlaku významná. Je ovšem zapotřebí, aby místo vykládky bylo schopno najednou pojmout velké množství kapaliny. Proto se tato přeprava uskutečňuje zejména mezi rafinériemi, nebo mezi rafinérii a meziskladem, nebo velkoskladem, pokud tuto dopravu nenahrazuje doprava produktovodem.

Vzhledem ke studijnímu oboru SMAD se těmito záležitostmi nadále nebudu zabývat.

V dalších kapitolách se budu věnovat přepravě kapalin po silnicích silničními dopravními prostředky.

Přeprava po silnicích je velice významným druhem přepravy. Její přednosti jsou zejména flexibilita, přeprava téměř jakéhokoli množství kapalin, nezávislost na ostatních druzích dopravy.

Přeprava v cisternách zastává významnou roli v přepravě ke koncovým odběratelům, jako jsou čerpací stanice, nebo také mlékárenské podniky, do kterých se cisternami sváží mléko z mnoha zemědělských podniků v okolí produkujících mléko.

1.1. Rozdělení cisteren

Cisterny můžeme rozdělit do kategorií podle:

- umístění na podvozku
- podvozku
- přepravované kapalně
- materiálu nádrže
- tvaru nádrže
- počtu komor
- provedení nádrže

1.1.1. Cisterny podle umístění na podvozku

- pevné
- snímatelné

Snímatelné nádrže cisteren jsou používány na podvozcích kontejnerových nosičů jako nádrž připevněná ke kontejnerovému rámu, který umožní její natažení a fixaci. Tento druh umožní použití kontejnerového nosiče pro převoz jiných kontejnerů, nebo odstavení kontejneru na místě a jeho používání bez potřeby vozu.



Obr. 1. Snímatelná kontejnerová cisterna pro přepravu pitné vody.[5]

1.1.2. Cisterny podle podvozku

- cisternové automobily
- cisternové přívěsy
- cisternové návěsy

To, na jakém podvozku je nádrž umístěna, ovlivňuje mnoho faktorů a následně využitelnost cisterny, nebo tažného vozidla. Všechny cisterny jsou použitelné pro přepravu určitých druhů kapalin, pro které byly konstruovány, ale zároveň volba podvozku ovlivní i možnost dalšího využití, zejména tahače návěsu pro tažení jiného návěsu i s jiným druhem kapaliny nebo jiným druhem látky, nebo použití přívěsu i v kombinaci s jiným tažným vozem, jako např. traktor, nákladní vůz.

Cisternové automobily jsou proti tomu poměrně jednoúčelové, pokud nejsou konstruovány jako kontejnerové. Cisternové automobily se používají například pro svoz mléka od jednotlivých producentů, velice často v kombinaci s cisternovým přívěsem, kdy přívěs a vůz jsou v tentýž čas plněny v různých podnicích. Některé cisterny jsou pro povahu své práce a místo použití konstruovány ve většině případů jako automobilové cisterny. Mezi ně patří cisterny hasičské, cisterny pro podtlakové vyčerpávání odpadů.



Obr. 2. Cisternový návěs pro přepravu nebezpečných kapalin.[8]

1.1.3. Cisterny podle přepravované kapaliny

- kapaliny nebezpečné
- kapaliny bez nebezpečí

Nebezpečnost kapaliny je určena výrobcem podle kritérií pro nebezpečné vlastnosti látky. Mezi nebezpečné vlastnosti kapalin patří hořlavost, prudká oxidační reakce, jedovatost, žíravost, radioaktivita a nebezpečisamovolné reakce. Cisterny pro přepravu nebezpečných kapalin jsou pak konstruovány podle požadavků předpisu ADR (viz. 1.2.2.) pro přepravu nebezpečných látek po silnici.

Na Obr. 3. je cisterna určená k přepravě benzínu. To je možné vyčíst z oranžové obdelníkové bezpečnostní tabulky na zádi vozidla (stejná je i na předku vozu, ale na obrázku není vidět). To že cisterna přepravuje nebezpečnou kapalinu ještě naznačují výstražná čtverce na koso na bocích a zádi cisterny, a předku vozu.

1.1.4. Cisterny podle materiálu nádrže

- ocel
- ocel nerezavějící
- hliník
- slitiny hliníku
- vyztužené plasty

V dnešní době je ve velké oblibě používání nerez ocele a vyztužených plastů. Jsou totiž málo náročné na údržbu. V některých případech je nutno doplnit základní materiál nádrže na vnitřní straně o vrstvu materiálu netečného k přepravované kapalině. Například pro kyseliny je na vnitřní stranu nanášena vrstva olova.

1.1.5. Cisterny podle tvaru průřezu nádrže

- cisterny kruhové
- cisterny eliptické
- cisterny oválné
- cisterny kvádrové
- cisterny kombinovaného tvaru

Cisterny kruhové, eliptické a oválné jsou často používány pro přepravu nebezpečných kapalin, protože předpis ADR stanovuje jako konstrukční podmínku velké přechody a poloměry zakřivení nádrže.

Pro přepravu některých zvláště nebezpečných kapalin je vyžadována nádrž kruhová, která je v těchto případech navrhována jako nádrž tlaková.

Kvádrové nádrže cisteren se používají pro hasičská vozidla pro potřebu maximálního využití prostoru v hasičské nástavbě.

Kombinované tvary cisteren jsou často kombinací eliptického a kvádrového tvaru, kde horní a spodní část jsou eliptické a boky kvádrové.

Kvádrový tvar nádrže má z pevnostních a konstrukčních důvodů nevýhodu v tom, že na hranách a v rozích nádrže vzniká víceosá napjatost, která tak kumuluje velké a pro výpočet složité napětí do rohu nebo hrany nádrže. Tento problém se v praxi řeší již zmíněným kombinovaným tvarem kvádr-elipsa, nebo je nutno hrany a rohy nádrže vyztužit. To ovšem znamená další technologické operace, nárůst hmotnosti a prodražení.



Obr. 3. Kombinovaný tvar nádrže s kombinací eliptického víka a dna a rovných kvádrových boků.[5]



Obr. 4. Hasičské cisterna s kvádrovou nádrží. Bok nádrže je vidět nad zadními koly, mezi přední a zadní roletou.[7]

1.1.6. Cisterny podle počtu komor

- jednokomorové
- vícekomorové

Jednokomorové nádrže cisteren se používají na přepravu menšího množství. Mezi tyto cisterny se řadí přívěsné cisterny na přepravu mléka, malé přívěsné cisterny na přepravu PHM (pohonné hmoty), cisternové automobily na dovoz a tankování stavebních a zemědělských strojů a cisterny pro podtlakové vyčerpávání odpadů.

Vícekomorové cisterny se hojně používají pro přepravu ADR s ohledem na to, že je omezeno množství přepravované kapaliny v jedné komoře. Další omezující kritérium je to, že je s ohledem na bezpečnost provozu nutné jezdit s plnou nebo prázdnou cisternou (komořou), nepřipustný stupeň naplnění podle ADR je v rozmezí 20% - 80% obsahu cisterny (komoře). Z toho důvodu jsou objemy komor takové, aby bylo možné na místě určení vypustit celou cisternu nebo komoru.

Hasičské cisterny jsou konstruovány ve většině případů jako dvoukomorové. Vyhláška číslo 49/2003 Sb. "Opodmínkách požární techniky" stanovuje, že každá hasičská cisterna musí mít s sebou pěnidlo o celkovém objemu, který je potřeba k namísení těžké pěny na dvě nádrže na vodu dané cisterny. Tato podmínka je v některých případech zajištěna přepravou pěnidla v kanystrech, a pak je cisterna pouze jednokomorová. Toto řešení se

používá pro menší cisterny o objemu cca do 2000 l nebo pro cisterny svou povahou určené pro technické a technologické zásahy.

1.1.7. Cisterny podle provedení nádrže

- nádrže jednoplášťové
- nádrže víceplášťové
- nádrže víceplášťové izolované vyhřívané
- nádrže víceplášťové izolované chlazené

Jednoplášťové cisterny jsou hasičské cisterny, cisterny pro podtlakové vyčerpávání odpadů a některé cisterny pro přepravu kapalin bez nebezpečí, u kterých nehrozí poškození nádrže cisterny, např. povětrnostními vlivy.

U víceplášťových cisteren má druhý a další plášť funkci převážně ochrannou před případnou havárií, povětrnostními vlivy, nebo zabraňují vytečení kapaliny v případě poškození nádrže.

Izolované nádrže cisteren jsou používány pro přepravu kapalin, u kterých je nutné zajistit stálou teplotu vzhledem k jejich povaze, jako např. vysoká odpařitelnost při normální teplotě nebo vysoký bod tuhnutí.



Obr. 5. Jednoplášťový cisternový přívěs pro podtlakové vyčerpávání chemicky znečištěných odpadů.[8]

1.2. Požadavky na cisterny

- požadavky legislativní
- požadavky na cisterny ADR
- požadavky na cisterny hasičské

1.2.1. Legislativní požadavky na cisterny

Legislativním požadavkem rozumíme požadavek, který vychází ze zákonů a vyhlášek dané země. V případě České republiky se jedná zejména o vyhlášku 341/2002 Sb.

"O schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích."

V této vyhlášce jsou uvedeny maximální provozní rozměry a hmotnosti vozidla a soupravy vozidel, jako jsou šířka vozidla, maximální délka soupravy tahače s přívěsem, maximální celková hmotnost vozidla nebo soupravy vozidel, přípustné zatížení jednotlivých náprav vozidel podle jednotlivých hmotnostních kategorií a rozdělení do hmotnostních kategorií.

Tyto požadavky musí konstruktér při návrhu cisterny akceptovat a cisternu jim přizpůsobit.

1.2.2. Požadavky na cisterny ADR

ADR- Mezinárodní dohoda pro přepravu nebezpečných věcí po silnici.

Účelem dohody ADR je omezit na co nejmenší mez rizika spojená se silniční přepravou nebezpečných věcí, a to sjednocením podmínek pro zařazování nebezpečných látek do příslušných tříd, požadavků na obaly a jejich značení bezpečnostními značkami, požadavků na vozidla a jejich vybavení, požadavků na příslušné průvodní doklady, požadavků na řidiče a jejich školení, požadavků na bezpečnostní poradce a podobně.

Dohoda ADR byla sjednána v Ženevě 30.9.1957. Vlastní dohoda vstoupila v platnost 20.1.1968 a její dvě přílohy o něco později dne 2.7.1968.

Bývalé Československo přistoupilo k dohodě dne 17.7.1986 na základě listiny o přístupu.

Do Československého právního řádu byla dohoda začleněna vyhláškou Ministerstva zahraničních věcí č. 64/1987 Sb. Dne 2.6.1993 oznámila Česká republika, že jako nástupnický stát po ČSFR se považuje za vázanou dohodou ADR, včetně výhrad a prohlášení.

Poslední znění dohody ADR bylo zveřejněno sdělením MZV č. 13/2009 Sb.

Důležitou součástí dohody ADR jsou její dvě technické přílohy.

Příloha A - Všeobecná ustanovení a ustanovení týkající se nebezpečných látek a předmětů (část 1-7).

Příloha B - Ustanovení o dopravních prostředcích a o přepravě (část 8-9).

Při návrhu a konstrukci cisterny na nebezpečné kapaliny je zapotřebí nejprve klasifikovat a zařadit nebezpečnou kapalinu do třídy a skupiny nebezpečnosti kapaliny. Toto řeší v příloze A část 2, kapitoly:

Kapitola 2.1. Klasifikace nebezpečných látek.

Kapitola 2.2. Zvláštní ustanovení pro jednotlivé třídy.

Následně pak v části 6 nalezneme konstrukční požadavky.

Kapitola 6.7. Požadavky na konstrukci, výrobu, inspekce a zkoušení přemístitelných cisteren a UN vícečlankových kontejnerů na plyn (MEGC).

Kapitola 6.8. Požadavky na konstrukci, výrobu, výstroj, schvalování typu, inspekce a zkoušení a značení nesnímatelných cisteren, snímatelných cisteren a cisternových kontejnerů a cisternových výměnných nástaveb s nádržemi vyrobenými z kovových materiálů a bateriových vozidel a vícečlankových kontejnerů na plyn (MEGC).

Kapitola 6.9. Požadavky na konstrukci, výrobu, výstroj, schvalování typu, inspekce a zkoušení a značení nesnímatelných cisteren, snímatelných cisteren a cisternových kontejnerů a cisternových výměnných nástaveb s nádržemi vyrobenými z vyztužených plastů (FRP).

Kapitola 6.10. Požadavky na konstrukci, výrobu, výstroj, schvalování typu, inspekce a značení cisteren na podtlakové vyčerpávání odpadů. [4]

Pro případ nehody cisterny přepravující nebezpečnou kapalinu a bezpečný zásah hasičů, policie a záchranářů je důležitá kapitola 5.3. Označování kontejnerů, MEGC, MEMU, cisternových kontejnerů, přemístitelných cisteren a vozidel bezpečnostními značkami, oranžovými tabulkami a nápisy.

Přílohy ADR A a B mají celkem 1265 stran.

1.2.3. Požadavky na cisterny hasičské

Hasičské cisternové automobily jsou konstruovány v souladu s vyhláškou 341/2002 Sb.

"O schvalování technické způsobilosti a o technických podmínkách provozu vozidel na pozemních komunikacích". Jejich účelová nástavba, případně kabina pro posádku, musí ještě splňovat vyhlášku č. 49/2003 Sb. "O podmínkách požární techniky".

Tato vyhláška rozděluje vozidla do kategorií podle celkové hmotnosti, konstrukce podvozku a skupin podle vybavení a předurčeného použití.

Jak již bylo zmíněno dříve, jsou nádrže hasičských cisteren konstruovány jako kvádrové. To proto, že kromě vody a pěnidla musí převážet ještě vybavení podle dané kategorie a skupiny vozu. Kvádrové nádrže umožňují dobré prostorové využití dané oběma vyhláškami při zachování kompaktních rozměrů zajišťujících dobrou průjezdnost a dostupnost místa zásahu pro hasičské cisterny.



Obr. 6. Hasičská cisterna-účelová nástavba. Umístění dvoukomorové nádrže je naznačeno černým obdelníkem.[7]

2. Výpočet hydrostatických tlaků a sil při relativní rovnováze

2.1. Definice relativní rovnováhy

O relativní rovnováze (vzhledem k pohybující se nádobě) mluvíme tehdy, ustaví-li se po doznění nějakého přechodového děje v kapalině stav, kdy se makroskopické částice tekutiny vzhledem k nádobě nepohybují, avšak spolu s nádobou konají unášivý pohyb. Prostor spojený s nádobou je tedy neinerciální a výsledná hmotnostní síla (resp. její intenzita) je dána vektorovým součtem síly vyvozené vnějším silovým polem (např. gravitačním) a polem setrvačných sil odpovídajících unášivému pohybu nádoby. Rovnováha může nastat pouze tehdy, má-li tato výslednice potenciál.[1]

2.2. Případy relativní rovnováhy

Podle definice relativní rovnováhy může tedy relativní rovnováha nastat pro dva případy pohybu. Jsou jimi pohyb unášivý přímočarý rovnoměrně zrychlený/zpomalený, tedy $a = \text{konst.}$, nebo pohyb rovnoměrný rotační, tedy $\omega = \text{konst.}$

2.2.1. Pohyb unášivý přímočarý rovnoměrně zrychlený/zpomalený

Na každý element hmotnosti $dm = \rho dV$ kapaliny působí vedle tíhy $d\mathbf{G} = \rho \mathbf{g} dV$ setrvačná síla $d\mathbf{D} = -\mathbf{a} \rho dV$. S ohledem na $\mathbf{a} = \text{konst.}$ je vektorové pole intenzity \mathbf{K}

$$\vec{K} = \vec{g} - \vec{a} = \text{konst.} \quad (1)$$

kde g [m/s²] je tíhové zrychlení, a [m/s²] je zrychlení unášivého pohybu.

Ekvipotenciální plochy, u nichž nulovou hodnotu potenciálu obvykle přepisujeme hladině, tvoří soustavu rovnoběžných rovin kolmých k vektoru \mathbf{K} . Prostor zaujatý kapalinou má díky nestlačitelnosti kapaliny stejný objem, jaký by odpovídal absolutní rovnováze.

2.2.2. Pohyb rovnoměrný rotační

Rovnováha v tomto případě může nastat pouze tehdy je-li osa rotace stálá a svislá. Pro řešení těchto případů je vhodné použít cylindrickou souřadnicovou soustavu O, r, φ . Při rovnoměrném rotačním pohybu působí na element kapaliny vedle tíhy $d\mathbf{G} = \rho \mathbf{g} dV$ elementární odstředivá síla $d\mathbf{O} = \rho \omega^2 \mathbf{r} dV$ jako síla setrvačná.

Intenzita silového pole je zde dána vektorovým součtem tíhového zrychlení a záporně vzatého normálového zrychlení, resp. tíhy a odstředivé síly.

$$\vec{K} = \vec{g} - \vec{a} = g - \omega^2 r \quad (2)$$

kde ω [rad/s] je úhlová rychlost, r [m] je poloměr rotace.

Ekvipotenciální plochy tvoří v tomto případě soustavu rotačních paraboloidů, nebo jejich částí v závislosti na poloze osy rotace.[1]

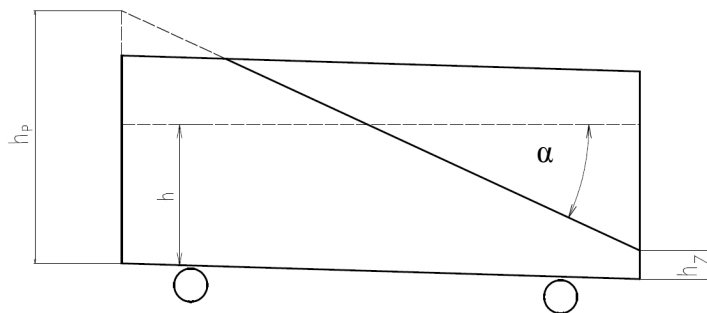
2.3. Výpočet hydrostatických sil působících na stěny nádoby

2.3.1. Určení tvaru a polohy hladiny pro pohyb unášivý, rovnoměrně zrychlený/zpomalený
Pro výpočet působících tlaků a sil na stěny nádoby musíme znát tvar a hlavně polohu hladiny, zejména pak výšku hladiny ode dna, tedy hloubku počítaného místa pod hladinou kapaliny.

V případě rovnoměrného unášivého rovnoměrně zrychleného/zpomaleného pohybu je poloha hladiny určena sklonem vektoru K od kolmice, resp. je na tento vektor kolmá.

V případě, že je nádoba uzavřená a zcela zaplněna, je nutné, vzhledem k tomu, že se hladina nemůže pohnout a naklonit, vytvořit hladinu myšlenou a protnout ji se všemi stěnami v myšlených průsečících. Toto platí analogicky i pro případ shora uzavřené nádoby zčásti naplněné v případě, že se hladina dotýká víka nádrže. Myšlená hladina nad víkem nádrže reprezentuje výšku hladiny potřebnou pro výpočet tlaku a síly působící na víko nádoby. V případě, že bychom tak neučinili, byla by hloubka víka rovna nule, a tudíž by potom i vypočtený tlak a síla na víko nádoby byly nulové, což samozřejmě není možné.

Viz obr. 7

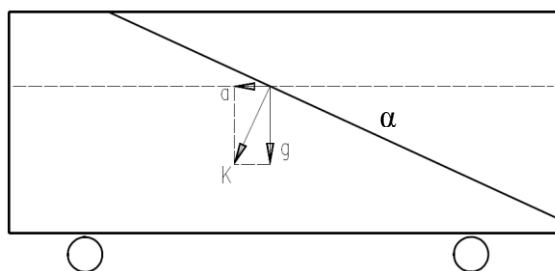


Obr. 7. Poloha hladiny skutečné a myšlené, nad víkem nádrže.

Sklon hladiny je dán jednoduchým vztahem

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{a}{g} \Rightarrow \alpha = \operatorname{arctg} \frac{a}{g} \quad (3)$$

kde a působí proti směru zrychlení, g kolmo k zemi, vektor K je kolmý na hladinu



Obr. 8 Určení sklonu hladiny

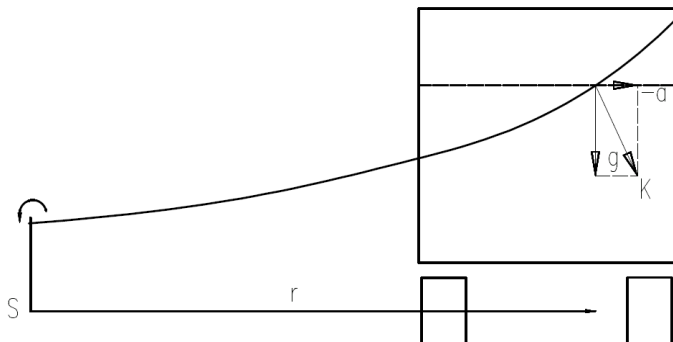
2.3.2. Určení tvaru a polohy hladiny pro pohyb rovnoměrný rotační

Pokud se podíváme na rovnice 1 a 2, tedy rovnice pro vektory vnějšího silového pole, je na první pohled patrný rozdíl mezi oběma rovnicemi, a to ve vyjádření setrvačné síly. Pro pohyb rotační je setrvačná síla O dána vztahem

$$\vec{O} = \rho \omega^2 \vec{r} \quad (4)$$

kde ρ [kg/m³] je měrná hmotnost, ω [rad/s] je úhlová rychlost

Z toho pak plyne tvar hladiny, který je tedy reprezentován rotačním paraboloidem se středem v ose rotace nádoby, nebo středu křivosti zatáčky projížděné cisternou. Viz obr. 9



Obr. 9. Tvar hladiny při průjezdu cisterny zatáčkou

Je zřejmé, že velikost vektoru K je závislá na velikosti poloměru křivosti r a na kvadrátu úhlové rychlosti ω . Z toho plyne, že rychlost průjezdu zatáčkou má zásadní vliv na tvar a sklon hladiny kapaliny, a tudíž i na bezpečné projetí zatáčky.

Nejprve zjistíme tvar hladiny, ten je možné usoudit z povahy pohybu, a polohu hladiny kapaliny v nádrži. Podle té zjistíme potřebné hloubky. Při splnění podmínek relativní rovnováhy můžeme vypočítat za použití metod hydrostatiky tlak a sílu v libovolném místě nádrže, nebo působení tlaku a síly na stěny nádoby a jiná významná místa, která jsou z konstrukčního nebo pevnostního hlediska důležitá.

V dalších částech této práce se budu věnovat již pouze pohybu přímočarému, rovnoměrně zrychlenému/zpomalenému.

Při výpočtu tlaků a sil na stěny nádrže je v první řadě zapotřebí zjistit, o jakou nádrž se jedná. Pokud je to nádrž kvádrová, je výpočet jednoduchý a reprezentovaný vztahem pro tlak p [Pa]

$$p = \rho gh \tag{5}$$

kde h [m] je hloubka řešeného místa pod hladinou

nebo vztahem pro sílu F [N] působící na plochu

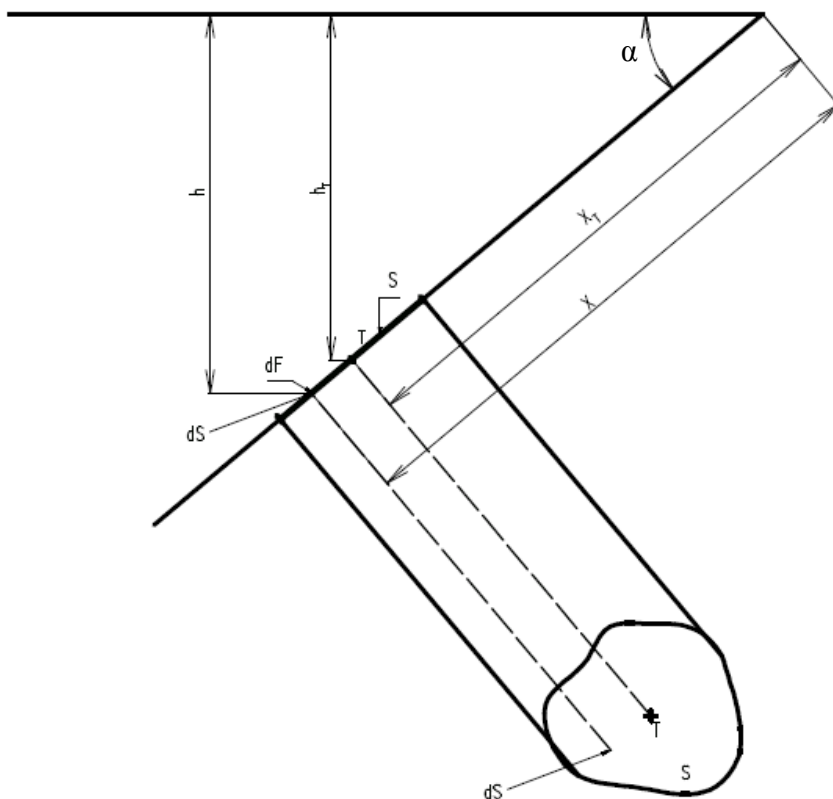
$$F = Ap_T \quad (6)$$

kde A [m^2] je velikost plochy, p_T [Pa] je tlak v těžišti této plochy

Pokud se jedná o tvar válcový, který je nejčastější, nebo některý tvar složený, je nutno použít při výpočtu metodu složkovou nebo metodu náhradní roviny.

2.3.3. Hydrostatická tlaková síla na rovinnou stěnu

Jak je již napsáno dříve, je při splnění podmínek relativní rovnováhy možno použít k výpočtům tlaků a sil v nádržích metody hydrostatiky.



Obr. 10. Rovinná stěna

Na obrázku 10 je znázorněna obecná rovinná stěna o ploše A [m^2], skloněná pod úhlem α vzhledem k vodorovné rovině hladiny. Vyberme si element plochy dA v hloubce h [m]. Na tuto plochu pak působí síla dF [N] daná vztahem

$$dF = p \cdot dA \quad (7)$$

přičemž tlak p [Pa] je dán vztahem 5: $p = \rho gh$ a hloubka h [m] pak

$$h = x \cdot \sin \alpha \quad (8)$$

kde x [m] je poloha elementu dA

po dosazení 5 a 8 do rovnice 7 dostaneme

$$dF = x \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot dA \quad (9)$$

následně pak integrací přes plochu A

$$F = \iint_A x \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot dA \quad (10)$$

úpravou dostaneme

$$F = \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot \iint_A x \cdot dA \quad (11)$$

přičemž výraz $\iint_A x \cdot dS = x_T \cdot A$ je vlastně statický moment plochy, pak

$$F = \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot x_T \cdot A \quad (12)$$

kde výraz $\sin \alpha \cdot x_T = h_T$ je hloubku těžiště h_T [m] počítané plochy pod hladinou.

Výsledný výraz je potom tedy

$$F = h_T \cdot \rho \cdot g \cdot A \quad (13)$$

neboli

$$F = p_T \cdot A \quad (14)$$

Je tedy zřejmé, že při výpočtu působící síly na rovinnou stěnu je nutné znát hloubku těžiště počítané plochy, její velikost a velikost hydrostatického tlaku v tomto těžišti.

Po výpočtu velikosti hydrostatické síly je potřeba ještě určit její působišť.

K tomuto účelu použijeme momentovou rovnici.

$$dM_y = dF \cdot x \quad (15)$$

integrací přes plochu dostaneme

$$M_y = \iint_A dF \cdot x = x_F \cdot F \quad (16)$$

dosazením za dF z 9 a za F z 12 dostaneme výraz

$$\iint_A x \cdot \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot dA = \sin \alpha \cdot \rho \cdot g \cdot x_T \cdot A \cdot x_F \quad (17)$$

který se vykrátí a zjednoduší na

$$\iint_A dA \cdot x^2 = A \cdot x_T \cdot x_F \quad (18)$$

kde výraz $\iint_A dA \cdot x^2 = J$ [m⁴] je kvadratický moment průřezu vyjádřený jako

$$J = J_T + A \cdot x_T^2 \quad (19)$$

$$J = A \cdot \left(\frac{J_T}{A} + x_T^2 \right) \quad (20)$$

kde dosazením za

$$\sqrt{\frac{J_T}{A}} = i \quad (21)$$

kde i je kvadratický poloměr průřezu, dostáváme

$$J = A \cdot (i^2 + x_T^2) \quad (22)$$

pak hledaná poloha působíště síly F je

$$x_F = \frac{i^2}{x_T} + x_T \quad (23)$$

Kvadratický moment průřezu J , případně i kvadratický poloměr průřezu i , je možné pro známé tvary jako jsou čtverec, obdélník, kruh, trojúhelník, aj. zjistit ve strojnických tabulkách, nebo odborné literatuře, či skriptech, jako mechanika, pružnost pevnost.

Při výpočtu hydrostatické síly působící na rovinnou stěnu se setkáváme se stěnami rozličných tvarů, které na první pohled vypadají jako velice obtížně řešitelné vzhledem k výpočtu polohy působíště síly. Při takovémto zadání je důležité si pozorně prohlédnout tvar stěny, a pak téměř ve všech případech zjistíme, že je možné tuto stěnu rozdělit na

jednoduché plochy, jejichž momentové charakteristiky známe. Pak použitím Steinerovy věty snadno spočítáme výslednou polohu působíště výsledné síly, která je dána součtem jednotlivých sil působících na jednotlivé plochy. [1][2]

2.3.4. Hydrostatická tlaková síla na zakřivenou stěnu

V praxi se nesetkáváme pouze s rovinnými stěnami, ale také se stěnami různě souměrně či nesouměrně zakřivenými. Tento případ pak můžeme řešit pomocí dvou metod.

Jsou jimi metoda náhradní roviny a metoda složková. Obě tyto metody ve své podstatě vedou na pomyslné vytvoření rovinné stěny, na kterou působí jedna složka hledané síly a výpočet velikosti tíhové síly, což je druhá složka hledané síly.

2.3.4.1. Složková metoda výpočtu hydrostatické síly působící na zakřivenou stěnu

Výsledná síla je složena ze dvou složek a to složky vodorovné F_x [N] a složky svislé F_y [N]

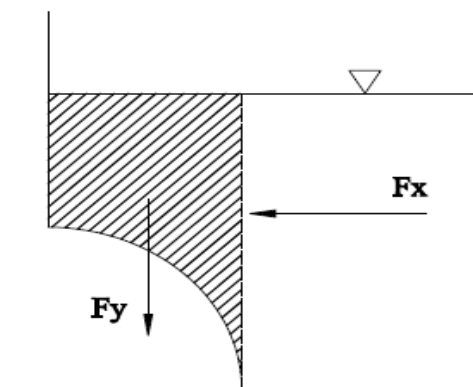
$$\vec{F} = \vec{F}_x + \vec{F}_y \quad (24)$$

Vodorovná složka tlakové síly je rovna součinu velikosti průmětu zakřivené stěny do svislé roviny a přetlaku v těžišti tohoto průmětu.

$$F_x = p_{Tx} \cdot A_x \quad (25)$$

Svislá složka tlakové síly je rovna tíze kapaliny nacházející se mezi zakřivenou stěnou a hladinou. Na obr. 11.

Složkovou metodu výpočtu použijeme tam, kde zakřivenou stěnu tvoří křivka, kterou obtížně nahrazujeme jedinou stěnou. Jedná se např. o půlkruh, zkosené stěny, atd.



Obr. 11 Složková metoda [1]

2.3.4.2. Metoda náhradní roviny pro výpočet hydrostatické tlakové síly

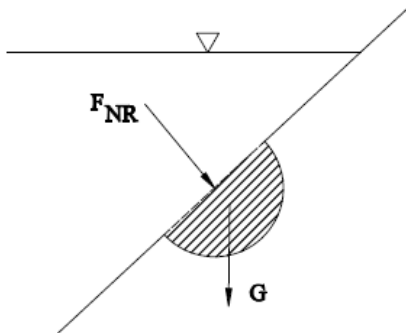
Výsledná síla je součtem síly působící na náhradní rovinu F_{NR} a tíhy kapaliny mezi náhradní rovinou a zakřivenou stěnou G .

$$\vec{F} = \vec{F}_{NR} + \vec{G} \quad (26)$$

kde $G [N] = m \cdot g$

Náhradní rovina musí zcela oddělit zakřivenou stěnu od ostatní kapaliny.

Tuto metodu použijeme tam, kde je na rovinné stěně samostatná a izolovaná stěna zakřivená, jako může například být příruba na stěně nádrže.



Obr. 12 Metoda náhradní roviny [1]

3. Model pohybující se nádobou s kapalinou

3.1. Výběr cisterny pro matematický model

Pro vytvoření matematického modelu a následný výpočet jsem vybral cisternu používanou pro hasičské účely. Její označení je CAS 20 3500/300/0 S2Z.

Význam tohoto označení je: Cisternová Automobilová Stříkačka se jmenovitým výkonem čerpadla 2000 litrů za minutu, při tlaku 1 MPa a sací výšce 3 metry, s obsahem nádrže na vodu 3500 litrů, s obsahem nádrže na pěnídlo 300 litrů a obsahem práškového hasiva 0kg.

S2Z je zařídění podvozku a v tomto případě znamená:

S - těžká hmotnostní kategorie (nad 14 000 kg),

2 - konstrukce podvozku pro smíšený provoz,

Z - základní vybavení hasičské cisterny.

Podvozek použitý pro tuto cisternu je značky Tatra, typ T815-231R55 18 325 4x4.2/411.

Nádrž použitá u této cisterny je vyrobena z nerezavějící oceli. Její provedení je dvoukomorové. Větší komora o obsahu 3500 litrů je na vodu. Nachází se v zadní části nádrže, vzhledem ke směru jízdy, těsně před čerpadlem. Součástí komory jsou vlnolamy, umístěné v jednom sloupci napříč, ve středu komory. Vlnolamy mají za úkol utlumit přechodové děje, ke kterým dochází při přechodu ze stavu rovnováhy do stavu relativní rovnováhy.

Malá komora na pěnídlo je vytvořena navařenou přepážkou v přední části nádrže a její obsah je 300 litrů. Obě nádrže nejsou vzájemně propojeny.



Obr. 13. CAS 20 - S2Z [7]

3.2. Vytvoření modelu a výpočet

Výpočtový model je proveden v matematickém programu Mathcad. [3]

Navrhovaný model nádrže rozměrově vychází z nádrže pro vodu hasičské cisterny na obr.13 a obr. 6.

Zvolené parametry nádoby

$$d = 1.5 \text{ m} \quad \text{délka nádoby}$$

$$v = 1.3 \text{ m} \quad \text{výška nádoby}$$

$$b = 1.1 \text{ m} \quad \text{šířka nádoby}$$

Konstanty

$$g = 9.807 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$\rho := 998 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Zrychlení nádoby

$$a = 6.5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

Výška hladiny

$$h = 0.9 \text{ m}$$

sklon hladiny

$$\alpha := \text{atan}\left(\frac{a}{g}\right)$$

$$\alpha = 33.537 \text{ deg}$$

kritická zrychlení

$$a_1 := \frac{2g \cdot (v - h)}{d}$$

hladina se dotkne horního rohu - hladina nad polovinou

$$a_1 = 5.23 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_2 := \frac{g \cdot v^2}{2d \cdot (v - h)}$$

hladina se dotkne dolního rohu - hladina nad polovinou

$$a_2 = 13.811 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_3 := \frac{2 \cdot h \cdot g}{d}$$

hladina se dotkne dolního rohu - hladina pod polovinou

$$a_3 = 11.768 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$a_4 := \frac{g \cdot v^2}{2 \cdot h \cdot d}$$

hladina se dotkne horního rohu - hladina pod polovinou

$$a_4 = 6.138 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

vysky skutečné, nebo myšlené hladiny pro výpočet tlaku

$$H_1 := d \cdot \tan(\alpha) + v - \sqrt{(v - h) \cdot d \cdot 2 \cdot \tan(\alpha)}$$

hladina se dostane nad horní roh -
- hladina nad polovinou

$$H_1 = 1.402 \text{ m}$$

$$H_2 := \frac{v}{2} + \frac{h \cdot d \cdot \tan(\alpha)}{v}$$

hladina se dostane pod dolní roh -
- hladina nad polovinou

$$H_2 = 1.338 \text{ m}$$

$$H_3 := \sqrt{2 \cdot \tan(\alpha) \cdot h \cdot d}$$

hladina se dostane pod dolní roh -
- hladina pod polovinou

$$H_3 = 1.338 \text{ m}$$

$$H_4 := \frac{v}{2} + \frac{h \cdot d \cdot \tan(\alpha)}{v}$$

hladina se dostane nad horní roh -
- hladina pod polovinou

$$H_4 = 1.338 \text{ m}$$

$$H_6 := h + \frac{d}{2} \cdot \tan(\alpha)$$

hladina je v polovine

$$H_6 = 1.397 \text{ m}$$

$$H_d := \text{if}(a < a_3, H_6, \text{if}(a < a_4, H_3, H_4))$$

$$H_h := \text{if}(a < a_1, H_6, \text{if}(a < a_2, H_1, H_2))$$

$$H_s := \text{if}\left[h < \left(\frac{v}{2}\right), H_d, H_h\right]$$

tlaky v dolním rohu

$$p_1 := H_1 \cdot \rho \cdot g \quad p_1 = 1.373 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_2 := H_2 \cdot \rho \cdot g \quad p_2 = 1.31 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_3 := H_3 \cdot \rho \cdot g \quad p_3 = 1.309 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_4 := H_4 \cdot \rho \cdot g \quad p_4 = 1.31 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_6 := H_6 \cdot \rho \cdot g \quad p_6 = 1.367 \times 10^4 \text{ Pa}$$

$$p_d := \text{if}(a < a_3, p_6, \text{if}(a < a_4, p_3, p_4))$$

$$p_h := \text{if}(a < a_1, p_6, \text{if}(a < a_2, p_1, p_2))$$

$$p := \text{if}(H_s < v, p_d, p_h)$$

sila na stenu

$$F_1 := \left(H_1 - \frac{v}{2}\right) \cdot \rho \cdot g \cdot v \cdot b \quad F_1 = 1.053 \times 10^4 \text{ N}$$

$$F_2 := \left(H_2 - \frac{v}{2}\right) \cdot \rho \cdot g \cdot v \cdot b \quad F_2 = 9.633 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_3 := \frac{H_3}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot H_3 \cdot b \quad F_3 = 9.633 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_4 := \left(H_4 - \frac{v}{2}\right) \cdot \rho \cdot g \cdot v \cdot b \quad F_4 = 9.633 \times 10^3 \text{ N}$$

$$F_{61} := \frac{H_6^2}{2} \cdot \rho \cdot g \cdot b \quad F_{61} = 1.051 \times 10^4 \text{ N} \quad \text{pro } H_6 \text{ je mensi nez } v$$

$$F_{62} := \left(H_6 - \frac{v}{2}\right) \cdot \rho \cdot g \cdot v \cdot b \quad F_{62} = 1.046 \times 10^4 \text{ N} \quad \text{pro } H_6 \text{ je vetsi nez } v$$

$$F_d := \text{if}(a < a_3, F_{61}, \text{if}(a < a_4, F_3, F_4))$$

$$F_h := \text{if}(a < a_1, F_{62}, \text{if}(a < a_2, F_1, F_2))$$

$$F_s := \text{if}(H_s < v, F_d, F_h)$$

Zadávané rozměry a zrychlení

$d \equiv 1.5 \cdot \text{m}$ délka

Výška hladiny

Zrychlení

$v \equiv 1.3 \cdot \text{m}$ výška

$h \equiv 0.9 \cdot \text{m}$

$a \equiv 6.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$b \equiv 1.1 \cdot \text{m}$ šířka

$H_s = 1.402 \text{m}$

Výška průsečíku hladiny se stěnou nádoby, nebo jejím myšleným prodloužením

$p = 1.373 \times 10^4 \text{Pa}$

Tlak v dolním pravém rohu

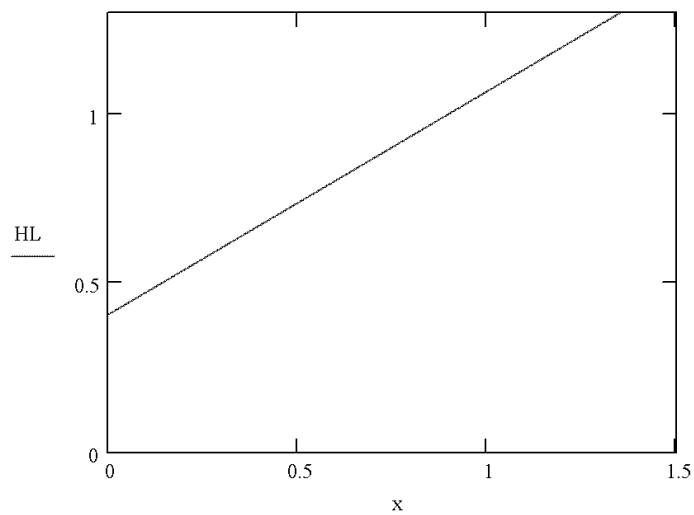
$F_s = 1.053 \times 10^4 \text{N}$

Síla působící na stěnu nádoby

$\alpha = 33.537 \text{ deg}$

Úhel naklonění hladiny

$$x := \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{HL} := \begin{pmatrix} H_s \\ H_s - d \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix}$$



3.3. Postup tvorby matematického modelu

Při tvorbě tohoto matematického modelu, tedy modelu nádoby z části naplněné kapalinou nacházející se ve stavu relativní rovnováhy, je důležité dokázat si představit, co se s kapalinou děje. Důležitý je zejména tvar hladiny a její naklonění. Tvar je v tomto případě rovinný. Pro zjednodušení představ a výpočtů můžeme zanedbat šířku nádrže a pracovat tak pouze s plochou řezu nádrže s kapalinou. Toto zjednodušení je možné pouze v případě, kdy se šířka nádrže nemění. Nádrž má tedy tvar kvádrů. Tato podmínka je v tomto případě splněna.

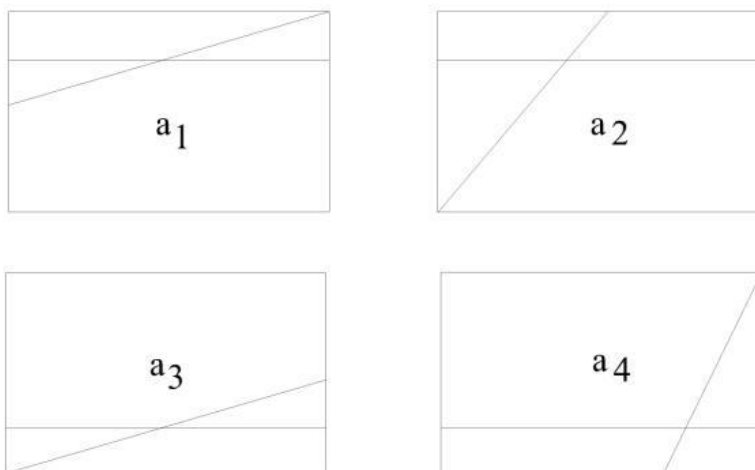
Kapalina ve stavu rovnováhy (klid, rovnoměrný přímočarý pohyb) má hladinu rovnoběžnou s dnem. Její plocha je tedy plocha obdélníka o rozměrech délka x výška naplnění. S touto plochou budeme dále pracovat a porovnávat ji s plochou trojúhelníka nebo lichoběžníka vzniklé po naklonění hladiny a to při stanovování kritických zrychlení nádrže. Pro jednodušší výpočet plochy po naklonění hladiny je v některých případech vhodné počítat s doplňkovou plochou vzduchu nad hladinou.

3.3.1. Kritická zrychlení

Nejprve je nutné určit takzvaná kritická zrychlení, při kterých se dotkne skutečná hladina víka nebo dna nádoby. To, co ovlivní, zda-li se kapalina dotkne dříve víka nebo dna, je výška hladiny v klidu, tedy to, zda-li je hladina nad polovinou výšky nádoby nebo ne. V případě, kdy je kapalina nad polovinou výšky nádoby, dojde dříve k dotyku s víkem. Pokud je pod polovinou, dojde dříve k dotyku s dnem nádoby. Tato zrychlení jsou a_1, a_3 .

Další kritická zrychlení nastanou tehdy, pokud je hladina nad polovinou výšky, a dojde k dotyku s dolním rohem nádrže, nebo pokud je hladina pod polovinou výšky a dojde k dotyku s horním rohem nádrže. Jsou to zrychlení a_2, a_4 . Tato kritická zrychlení následně použijeme v zápisu rozhodovacích rovnic pro výšku průsečíku hladiny H , tlak p a sílu na stěnu F .

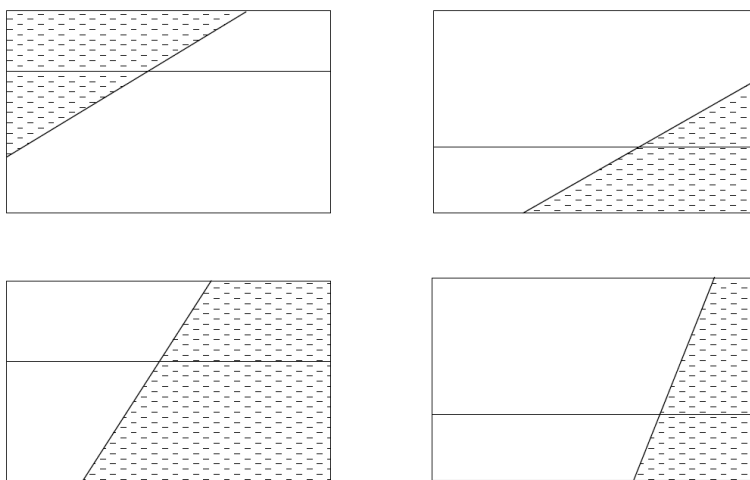
Pro určení kritických zrychlení je nutné znát plochu kapaliny nebo vzduchu v klidu. Tyto plochy jsou rovny plochám vzniklým v důsledku působení zrychlení. Rovnost těchto ploch je dána nestlačitelností kapaliny. Podle toho, jaké kritické zrychlení nastane, vznikne v řezu nádoby plocha trojúhelníková nebo lichoběžníková. Ta je rovna ploše za klidu a můžeme tak vzájemným dosazením ploch a délek odvodit vztahy pro tato kritická zrychlení. Viz obr. 14.



Obr. 14. Kritická zrychlení.

3.3.2. Výška průsečíku hladiny

Pro všechny určené nastalé případy kritického zrychlení odvodíme, ze znalosti obsahu plochy kapaliny nebo vzduchu v klidu, výšku průsečíku hladiny s čelem nádrže, nebo průsečíku myšlené hladiny s prodlouženým čelem nádrže, v případě, kdy je zrychlení větší než-li příslušné zrychlení kritické.



Obr. 15. Porovnávané plochy pro výpočet výšky.

Šrafované plochy jsou doporučené pro výpočet výšky průsečíku hladiny se stěnou nádrže.

Nyní musíme rozhodnout, jaký vztah bude použit pro vypsání skutečné výšky průsečíku H_s .

První rozhodovací rovnice rozhoduje o případě, kdy je hladina nad polovinou, a porovnává určená kritická zrychlení se zrychlením zadaným. Obdobně rozhoduje i druhá rozhodovací rovnice ale pro případ hladiny pod polovinou. Třetí rozhodovací rovnice porovnává výšku naplnění nádoby s polovinou výšky nádoby. Rozhodne, zda se použije rozhodování první nebo druhé. První i druhá rozhodovací rovnice obsahuje ještě odkaz na vztah pro případ naplnění nádrže do poloviny.

3.3.3. Tlak v dolním rohu nádrže

Tlaky pro jednotlivé výšky vypočteme jednoduše, ale je třeba je opět rozdělit podle rozhodovacích rovnic. Ty jsou obdobou rozhodovacích rovnic pro výšky průsečíku hladiny se stěnou nádrže.

3.3.4. Síla na stěnu nádoby

Vztahy pro výpočet síly není zapotřebí zvláště rozepisovat, při jejich zápisu je pouze nutné si uvědomit, zda je průsečík hladiny se stěnou skutečný, tedy pod kritickým a_1 nebo ne. Pokud je skutečný, je těžiště plochy v polovině výšky hladiny. Pokud ne, je již hladina nad víkem nádrže, a musíme polovinu výšky nádrže od výšky průsečíku odečíst, abychom dostali polohu těžiště stěny nádrže. Pak použijeme rozhodovací rovnice jako v předchozích případech, pouze vypisujeme sílu namísto výšky či tlaku.

3.3.5. Zadané a vypočtené hodnoty a graf

Na posledním listu výpisu programu Mathcad 7 jsou uceleně zapsány zadávané hodnoty a hodnoty vypočtené. Zadávané hodnoty jsou přiřazeny pomocí globálního rovnítka. To umožní zadávat tyto hodnoty až na konci dokumentu a můžeme tak pohodlně sledovat změnu vypočtených hodnot a polohu hladiny v grafu. Nemusíme tak rolovat dokumentem neustále nahoru a dolů.

4. Závěr

Přeprava kapalin cisternami představuje v dnešní době velice rychle se rozvíjející způsob přepravy. Konstrukce a návrh nádrží cisteren je problematika velice obsáhlá a řídí se mnoha různými normami a předpisy. Některé z nich jako např. předpis ADR pro přepravu nebezpečných věcí po silnici nebo vyhláška č. 49/2003 Sb. o podmínkách požární techniky jsou zde prezentovány spíše okrajově. Jejich problematiku by bylo možno zpracovat jako samostatnou práci.

Prvotním cílem této bakalářské práce je vytvořit funkční matematický model pohybující se nádoby s kapalinou při stavu relativní rovnováhy. Tento model umožňuje automatický výpočet tlaků a sil na určeném místě nádrže. Při dalším rozvětvení uvedeného matematického programu by bylo možno počítat jakékoli místo nebo plochu na nádrži.

Spíše druhotným záměrem práce je popis výpočtů tlaků a sil a dělení cisteren podle mnoha kritérií. V navazujícím magisterském studiu bych se rád zaměřil na konstrukci cisteren pro přepravu dle předpisu ADR pro přepravu nebezpečných věcí po silnici.

5. Použité veličiny a jednotky

Značka	Název	Jednotka
a	zrychlení	m/s ²
A	plocha	m ²
b	šířka	m
d	délka	m
F	síla	N
g	tíhové zrychlení	m/s ²
G	tíha	N
h,H	výška	m
i	kvadratický poloměr průřezu	m ²
J	kvadratický moment průřezu	m ⁴
K	intenzita pole	m/s ²
m	hmotnost	kg
M	moment	Nm
O	setrvačná síla	N
p	tlak	Pa
r	poloměr	m
α	úhel sklonu	°
ρ	hustota	kg/m ³
ω	úhlová rychlost	rad/s

Obr. 16. Tabulka použitých veličin

6. Použité obrázky

- Obr. 1. Snímatelná kontejnerová cisterna pro přepravu pitné vody
- Obr. 2. Cisternový návěs pro přepravu nebezpečných kapalin
- Obr. 3. Kombinovaný tvar nádrže s eliptickým víkem a dnem a s kvádrovými boky
- Obr. 4. Hasičské cisterna s kvádrovou nádrží
- Obr.5. Jednoplášťový cisternový přívěs pro podtlakové vyčerpávání chemicky znečištěných odpadů
- Obr. 6. Hasičská cisterna-úcelová nástavba
- Obr. 7. Poloha hladiny skutečné a myšlené nad víkem nádrže.
- Obr. 8. Určení sklonu hladiny
- Obr. 9. Tvar hladiny při průjezdu cisterny zatáčkou
- Obr. 10. Rovinná stěna
- Obr. 11. Složková metoda
- Obr. 12. Metoda náhradní roviny
- Obr. 13. CAS 20 - S2Z
- Obr. 14. Kritická zrychlení
- Obr. 15. Porovnávání plochy pro výpočet výšky
- Obr. 16. Tabulka použitých veličin
-
- PI 1 . Souprava cisternového automobilu s cisternovým přívěsem pro přepravu mléka
- PI 2. Cisternový přívěs pro dovoz pitné vody
- PI 3. Návěs pro přepravu kapalných potravin
- PI 4. Přívěs na přepravu pohonných hmot
- PI 5. Cisterna pro dovoz pohonných hmot, ADR
- PI 6. Armádní cisterna pro dovoz Pohonných hmot, ADR
- PI 7. Návěs pro dopravu pohonných hmot na letištích, ADR
- PI 8. Návěs pro odvoz průsakové vody ze skládek
- PI 9. Cisterna pro přepravu horkých kapalných látek
- PI 10. Nádrž CAS
- PI 11. CAS 20 S2Z(R) 3200/300/0
- PI12. CAS 20 S2R 4500/400/0

PI 13. CAS 30 S3R 9000/540/0

PII 1. $h=0,9\text{m}$; $a=6,5\text{m/s}^2$

PII 2. $h=1,1\text{m}$; $a=4,5\text{m/s}^2$

PII 3. $h=0,1$; $a=4,5\text{m/s}^2$

PII 4. $h=0,6\text{m}$; $a=6,5\text{m/s}^2$

7. Použitá literatura a prameny

- [1] Nožička, J. *Mechanika tekutin*. 1. vydání, Praha: ČVUT, Fakulta strojní, 2004, 165s, ISBN 80-01-02865-8
- [2] Noskievič, J. a kol. *Mechanika tekutin*. SNTL, Praha, 1987, 356s.
- [3] Šleger, V., Vrecion, P. *Mathcad 7*. Haar, Praha, 1998, 163s, ISBN 80-238-1817-1
- [4] Ministerstvo dopravy [online]. Dostupné z <http://www.mdcz.cz/doprava/nakladni/ADR>
- [5] SPS Slatiňany s.r.o. [online]. Dostupné z <http://www.sps.cz/hasici/cas>
- [6] THT Polička s.r.o. [online]. Dostupné z <http://www.tht.cz/vyroba/cas>
- [7] THZ-SPS Slatiňany s.r.o. [online]. Dostupné z <http://thz.cz/preprava/phm>
- [8] Kobit s.r.o. [online]. Dostupné z <http://kobit.cz/cisterny/ADR>
- [9] Schwarzmuller gmbh. [online]. Dostupné z <http://schwarzmuller.de/cz/cisterny>

Příloha I

Příloha obsahuje příklady cisteren pro různá použití, různých konstrukcí a materiálů. Každý obrázek je stručně popsán podle rozdělení v první kapitole.



PI 1 . Souprava cisternového automobilu s cisternovým přívěsem pro přepravu mléka. Nádrže obou cisteren jsou vyrobeny z ocelového plechu třídy 17. Nádrže jsou pevné, eliptické, vícekomorové, izolované, dvouplášťové. [9]



PI 2. Cisternový přívěs pro dovoz pitné vody. Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je kruhová, dvoukomorová, dvouplášťová, izolovaná, s vrchním pláštěm z vyztuženého plastu.[5]



PI 3. Návěs pro přepravu kapalných potravin.

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je pevná, kruhová, vícekomorová, dvouplášťová, izolovaná.[9]



PI 4. Přívěs na přepravu pohonných hmot.

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 11. Nádrž je pevná, dvouplášťová, neizolovaná, jednokomorová. [8]



PI 5. Cisterna pro dovoz pohonných hmot. ADR

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 11. Nádrž je pevná, kombinovaného tvaru, vícekomorová, jednoplášťová.[8]



PI 6. Armádní cisterna pro dovoz pohonných hmot. ADR

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 11. Nádrž je pevná, kombinovaného tvaru, vícekomorová, jednoplášťová.[8]



PI 7. Návěs pro dopravu pohonných hmot na letištích. ADR

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je pevná, kruhová, jednokomorová, víceplášťová.[9]



PI 8. Návěs pro odvoz průsakové vody ze skládek.

Nádrž je vyrobena z ocelového plechu třídy 11. Nádrž je pevná, konstruovaná jako přetlaková, kruhová, jednokomorová, jednoplášťová.[9]



PI 9. Cisterna pro přepravu horkých kapalných látek.

Nádrž je z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je pevná, kruhová, jednokomorová, víceplášťová, izolovaná.[9]



PI 10. Nádrž CAS

Nádrž je vyrobena z vyztuženého plastu. Nádrž je na podvozku umístěna na pevno. Nádrž je kvádrová, dvoukomorová, jednoplášťová.[6]



PI 11. CAS 20 S2Z(R) 3200/300/0

Cisterna je vybavena nádrží na obr. P9[6]



PI 12. CAS 20 S2R 4500/400/0

Nádrž na vodu je vyrobená z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je pevná, kvádrová, jednokomorová, jednoplášťová. Je viditelná nad zadním kolem.

Nádrž na pěnidlo je vyrobená z vyztuženého plastu. Nádrž je pevná, kvádrová, jednokomorová, jednoplášťová. [6]



PI 13. CAS 30 S3R 9000/540/0

Nádrž na vodu je vyrobená z ocelového plechu třídy 17. Nádrž je pevná, kvádrová, jednokomorová, jednoplášťová. Je viditelná nad zadními koly.

Nádrž na pěnidlo je vyrobená z vyztuženého plastu. Nádrž je pevná, kvádrová, jednokomorová, jednoplášťová. [6]

Příloha II

Zde jsou uvedeny výpisy z programu Mathcad, protože v tomto dokumentu není možno měnit zadávané parametry. Nemůžeme proto sledovat změnu polohy hladiny a změnu vypočtených hodnot.

Zadávané rozměry a zrychlení

$d \equiv 1.5 \cdot \text{m}$	délka	Výška hladiny	Zrychlení
$v \equiv 1.3 \cdot \text{m}$	výška	$h \equiv 0.9 \cdot \text{m}$	$a \equiv 6.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$b \equiv 1.1 \cdot \text{m}$	šířka		

$$H_s = 1.402 \text{ m}$$

Výška průsecíku hladiny se stěnou nádoby, nebo jejím myšleným prodloužením

$$p = 1.373 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Tlak v dolním pravém rohu

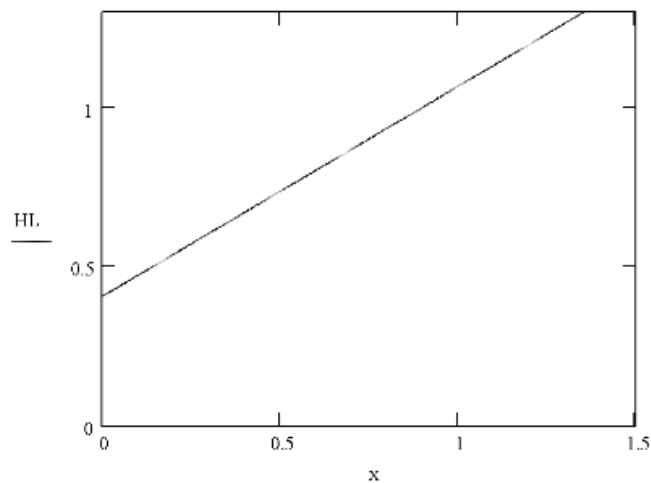
$$F_s = 1.053 \times 10^4 \text{ N}$$

Síla působící na stěnu nádoby

$$\alpha = 33.537 \text{ deg}$$

Úhel naklonění hladiny

$$x := \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad \text{HL} := \begin{pmatrix} H_s \\ H_s - d \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix}$$



P11 1. $h=0,9\text{m}$; $a=6,5\text{m/s}^2$

Zadávané rozměry a zrychlení

$d = 1.5 \cdot \text{m}$	délka	Výška hladiny	Zrychlení
$v = 1.3 \cdot \text{m}$	výška	$h = 1.1 \cdot \text{m}$	$a = 4.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$b = 1.1 \cdot \text{m}$	šířka		

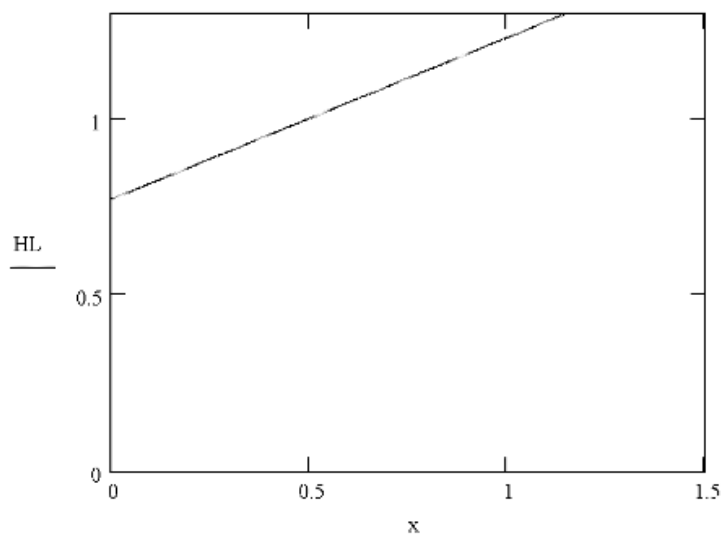
$H_s = 1.464 \text{m}$ **Výška průsečíku hladiny se stenou nádoby, nebo jejím myšleným prodloužením**

$p = 1.432 \times 10^4 \text{Pa}$ **Tlak v dolním pravém rohu**

$F_s = 1.139 \times 10^4 \text{N}$ **Síla působící na stenu nádoby**

$\alpha = 24.649 \text{deg}$ **Úhel naklonění hladiny**

$$x := \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad HL := \begin{pmatrix} H_s \\ H_s - d \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix}$$



PII 2. $h=1,1\text{m}$; $a=4,5\text{m/s}^2$

Zadávané rozměry a zrychlení

$d \equiv 1.5 \cdot \text{m}$ délka

Výška hladiny

Zrychlení

$v \equiv 1.3 \cdot \text{m}$ výška

$h \equiv 0.1 \cdot \text{m}$

$a \equiv 4.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$

$b \equiv 1.1 \cdot \text{m}$ šířka

$H_s = 0.371 \text{ m}$

Výška průsečíku hladiny se stenou nádoby, nebo jejím myšleným prodloužením

$p = 3.631 \times 10^3 \text{ Pa}$

Tlak v dolním pravém rohu

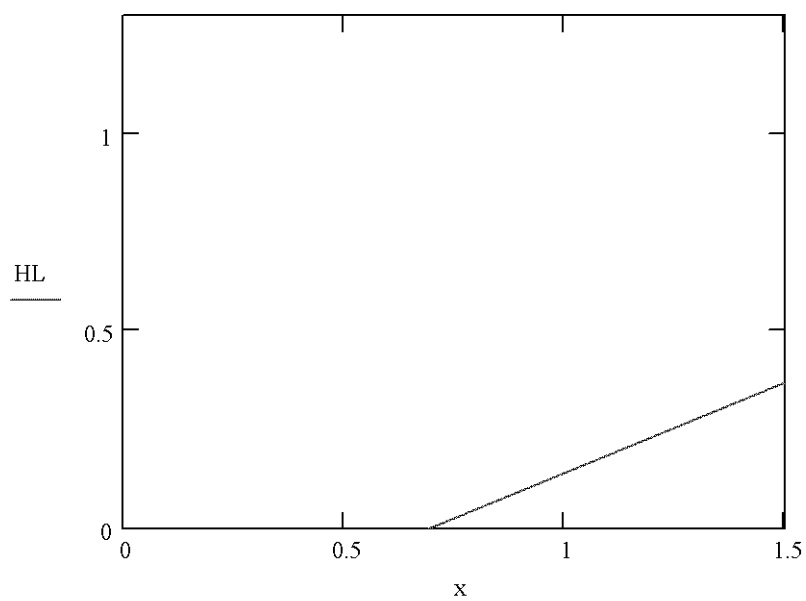
$F_s = 741.015 \text{ N}$

Síla působící na stěnu nádoby

$\alpha = 24.649 \text{ deg}$

Úhel naklonění hladiny

$$x := \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad HL := \begin{pmatrix} H_s \\ H_s - d \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix}$$



PII 3. $h=0,1$; $a=4,5\text{m/s}^2$

Zadávané rozměry a zrychlení

$d \equiv 1.5 \cdot \text{m}$	délka	Výška hladiny	Zrychlení
$v \equiv 1.3 \cdot \text{m}$	výška	$h \equiv 0.6 \cdot \text{m}$	$a \equiv 6.5 \cdot \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
$b \equiv 1.1 \cdot \text{m}$	šířka		

$$H_s = 1.097 \text{ m}$$

Výška průsecíku hladiny se stenou nádoby, nebo jejím myšleným prodloužením

$$p = 1.074 \times 10^4 \text{ Pa}$$

Tlak v dolním pravém rohu

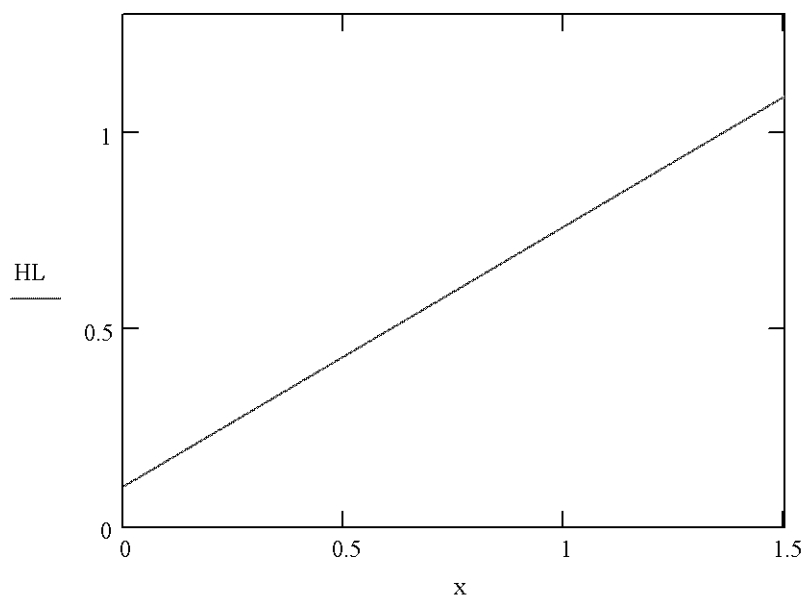
$$F_s = 6.479 \times 10^3 \text{ N}$$

Síla působící na stenu nádoby

$$\alpha = 33.537 \text{ deg}$$

Úhel naklonění hladiny

$$x := \begin{pmatrix} d \\ 0 \end{pmatrix} \quad HL := \begin{pmatrix} H_s \\ H_s - d \cdot \tan(\alpha) \end{pmatrix}$$



PII 4. $h=0,6\text{m}$; $a=6,5\text{m/s}^2$