



Получена: 20.03.2019 г.

Приета: 31.10.2019 г.

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СТОМАНЕНИ ВЕРТИКАЛНИ РЕЗЕРВОАРИ ЧРЕЗ ANSYS WORKBENCH И ANSYS MECHANICAL APDL

М. Пантушева¹, Л. Здравков²

Ключови думи: стоманен резервоар, конструкция, течност, взаимодействие, крайни елементи, ANSYS

РЕЗЮМЕ

Стоманените вертикални цилиндрични резервоари са технологични съоръжения, в които си взаимодействат сравнително коравият стоманен корпус и лесно деформируема течност. Моделирането на двата материала и на тяхното взаимодействие изисква използване на подходящи за целта програми, една от които е ANSYS. В стремежа си да отговорят на изискванията на новите потребители, ANSYS създават графичния интерфейс Workbench, който е значително по-удобен за ползване в сравнение с класическия Mechanical APDL. Характерно за Workbench е обособяването на отделни модули, всеки от които е насочен към решаване на задачи от определен дял от механиката. Моделирането и взаимното влияние на твърдите тела и флуидите обаче е интердисциплинарна задача, която може да бъде решена чрез използване на различни модули на програмата, всеки от които има различна специализация. И тук въпросът е дали можем да използваме изчислителни модули за цели, за които те не са създадени? Доколко достоверни ще бъдат получените резултати? В настоящото изследване, в опит да се даде отговор на тези въпроси, е разгледано поведението на запълнен с вода стоманен резервоар при статичен, модален и спектрален анализ в ANSYS Workbench и ANSYS Mechanical APDL. Получените резултати са сравнени с аналитични изчисления.

¹ Мария Пантушева, инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: maria.pantusheva@gmail.com

² Любомир Здравков, доц. д-р инж., кат. „Метални, дървени и пластмасови конструкции”, УАСГ, бул. „Хр. Смирненски“ № 1, 1046 София, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg

1. Въведение

Стоманените цилиндрични резервоари са технологични съоръжения, в които си взаимодействат две много различни по своите характеристики тела – относително твърд стоманен корпус и деформируема течност. Изучаването на тяхното съвместно поведение е възможно чрез създаване на натурни модели в изследователска лаборатория и/или чрез използване на специализиран софтуер за числен анализ. Такъв софтуер, широко използван в целия свят и приложим във всички области на изследователската дейност, е ANSYS. Едноименната компания е основана още през 1970 г. в Пенсилвания, САЩ. В своя класически облик ANSYS Parametric Design Language (APDL) програмата дава възможност за симулиране на всякакви сложни задачи и фино настройване на параметрите в тях. Ето защо, в тази версия е необходимо познаване в детайли на теоретичните постановки, стоящи зад моделираните процеси и много често се налага да се използват текстови команди. За съжаление обаче, този начин за въвеждане на информацията е силно остарял и отблъсква новите потребители, свикнали с интуитивен и лесен за използване графичен интерфейс, и малко мислене. В стремежа си да отговорят на новите реалности, ANSYS създават графичния интерфейс Workbench, който е доста по-удобен за ползване от младите ползватели. При него много рядко може да се наложи запис на команди в текстов вид.

Характерно за Workbench е обособяването на отделни модули, всеки от които е насочен към решаване на задачи от определен дял от механиката. Моделирането и взаимното влияние на твърдите тела и флуидите обаче е интердисциплинарна задача, която може да бъде решена чрез използване на различни модули на програмата. Чрез тях бързо и лесно могат да бъдат създадени модели на резервоара и течността, и да бъдат получени някакви резултати. И тук въпросът е, доколко те са достоверни? За да се отговори на този въпрос е проведено изследване при статичен (хидростатичен), модален и динамичен (спектрален) анализ. За целта е моделиран стоманен резервоар за вода, който е анализиран чрез различни модули на ANSYS Workbench v.19. Първоначално са използвани само възможностите за решение, които предоставя съответният модул. Оказва се, че поради комплексността на разглеждания проблем, тези базови възможности не са достатъчни за получаване на достоверни резултати. Ето защо е проведен втори етап на изследването, при който чрез потребителска намеса и добавяне на текстови команди са разширени възможностите на някои от модулите. Като трети етап, получените резултати са сравнени с решение в класическата версия ANSYS Mechanical APDL v.19 и с аналитично (ръчно) решение.

2. Моделиране

За целта на настоящото изследване, в среда на ANSYS Workbench е моделиран стоманен резервоар за вода, описан в [10]. Съоръжението е с диаметър $D = 5$ m, височина на корпуса $H = 8$ m и постоянна дебелина на стената и дъното $t = 6$ mm. То е запълнено с вода до височина $H_1 = 6,5$ m. Резервоарът е изследван в два варианта – без горен опорен пръстен (ГОП) и с наличен такъв, поставен на върха на корпуса, вж. фиг. 1.

Характеристиките на използваните материали са както следва:

а) стомана [1]

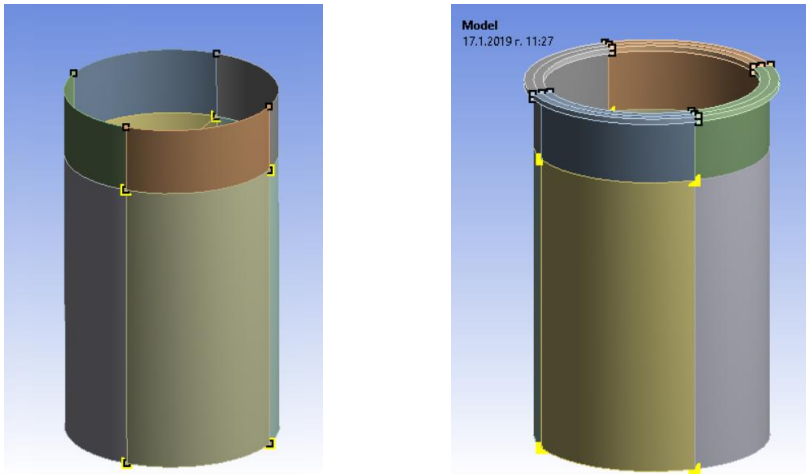
- модул на еластичността – $E = 210\,000$ МПа;
- коефициент на Poisson – $\nu = 0,3$;
- плътност – $\rho_s = 7\,850$ kg/m³.

б) вода – във всички използвани модули на Workbench, с изключение на Modal Acoustics и Static Acoustics:

- обемен модул на еластичността – $B = 2,1 \cdot 10^9$ Pa [10];
- коефициент на Poisson – $\nu = 0,4999995$. Приетият тук коефициент на Poisson се различава от посочения в [4] $\nu = 0,49999999$, тъй като при втората стойност за ν , решението в LS-Dyna не може да бъде проведено;
- плътност – $\rho_w = 1\,000$ kg/m³;

вода – в модули Modal Acoustics и Static Acoustics, във втория етап на изследването и в класическата версия ANSYS MAPDL:

- скорост на звука във вода – $v_w = 1\,482,1$ m/s;
- плътност – $\rho_w = 1\,000$ kg/m³.



а) резервоар със свободен горен край

б) резервоар с горен опорен пръстен

Фиг. 1. Варианти на изследвания резервоар

2.1. Първи етап на изследването в ANSYS Workbench

Особеностите при създаване на числените модели са, както следва:

а) стоманеното тяло на резервоара е симулирано чрез черупкови (shell) елементи;

б) тялото на водата е създадено чрез използване на:

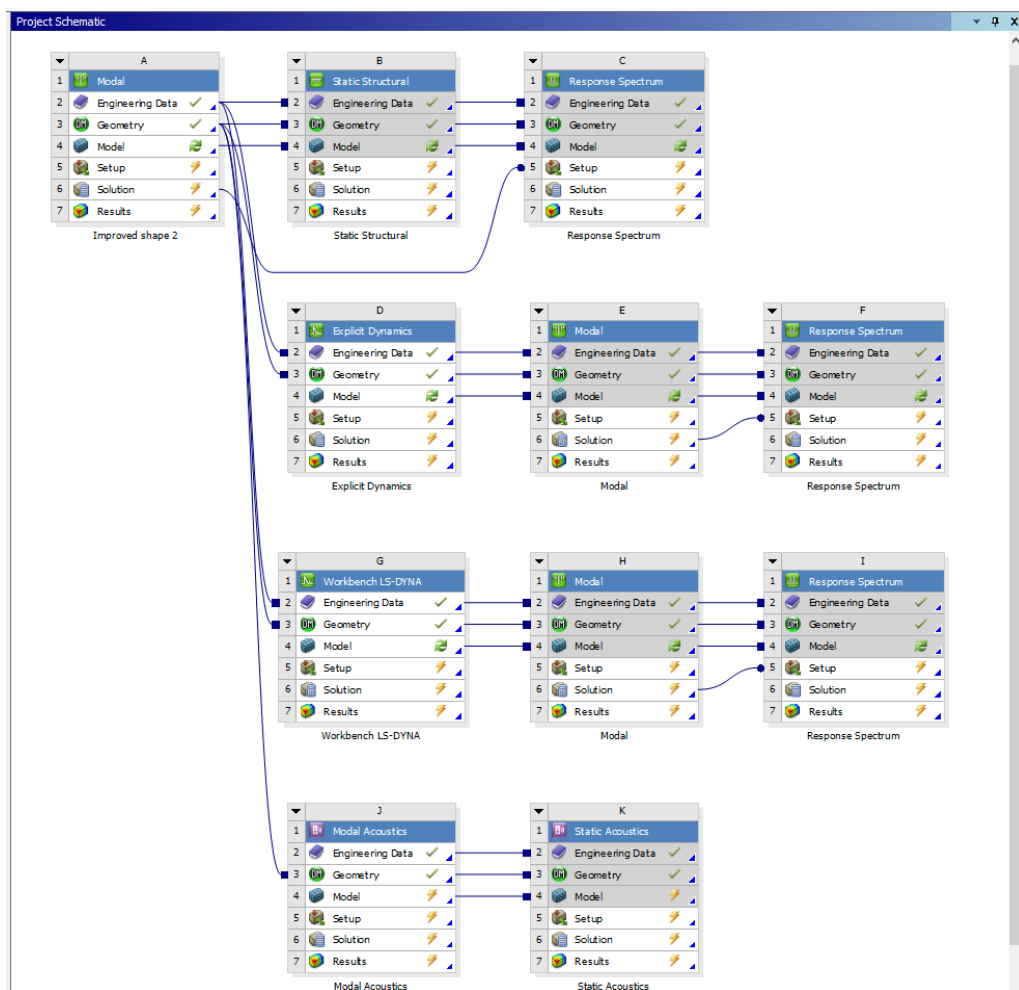
- обемни (solid) елементи при модули Static Structural, Explicit Dynamics, LS-Dyna, Modal и Response Spectrum;

- течностни (fluid) елементи при модули Modal Acoustics и Static Acoustics;

в) Workbench автоматично създава връзка между двата материала, която може да бъде с различни свойства. В настоящото изследване е прието, че двата материала ще могат свободно да се плъзгат един спрямо друг, но без да се разделят. Взаимното проникване на двата материала е ограничено до 0,1 mm;

г) течността е разделена на четири части в план, вж. фиг. 1. Така се подобрява мрежата от крайни елементи;

- д) в тялото на резервоара са обособени две зони – корпус и дъно:
- дъното е допълнително разделено на четири подзони. Тяхната форма, размери и положение отговарят на разделянето на течността;
 - корпусът е разделен на осем части, виж фиг. 1, така че срещу всеки край (ръб) на обемно тяло на течността да има край (ръб) на черупков елемент;
- е) максималният размер на краен елемент от мрежата е ограничен до 250 mm;
- ж) използваните крайни елементи имат възли само в крайните ръбове, т.е. средните възли са деактивирани;
- з) резервоарът е запънат към земната основа;
- и) навсякъде, където е възможно, е приложено земното ускорение $g = 9,807 \text{ m/s}^2$;
- й) ефектите от демпфиране на течността и на резервоара не се отчитат;
- к) използваните модули в ANSYS Workbench са Static Structural, Modal, Response Spectrum, Explicit Dynamics, LS-Dyna, Modal Acoustics и Static Acoustics, вж. фиг. 2.



Фиг. 2. Модули и последователност на използване в ANSYS Workbench

В Explicit Dynamics и LS-Dyna течността е представена като Ойлерово пространство. По този начин се осигурява голяма деформативност на мрежата на водата, която обхваща корпуса на резервоара и взаимодейства с него. Такъв подход за симулация на вода в резервоар при бързопроменящо се сеизмично въздействие е използван в [6] и [7].

2.2. Втори етап на изследването в ANSYS Workbench

Тук ще бъдат описани само разликите с вече приетите по-горе предпоставки при изготвяне на моделите от етап 1:

а) използваните тук и модифицирани модули в Workbench са само Static Structural, Modal и Response Spectrum;

б) тялото на водата е създадено чрез презаписване на използваните по подразбиране обемни (solid185) елементи и заменянето им с течностни (fluid) елементи. При това изследване е използван елемент fluid30, който представлява триизмерен акустичен флуид с 8 възела [3], т.е. възлите са само в крайните ръбове на елементите. Умишлено е избран елемент от по-нисък ред, за да се постигне по-висока скорост на решението. Целта на замяната на обем с течностен елемент е да се опише реалната механика. За разлика от твърдите тела, флуидните елементи имат една допълнителна степен на свобода – налягане (pressure). При взаимодействието между твърдо тяло и течност матриците, които описват движението, са несиметрични.

Уравнението на движение в механиката на твърдите тела се описва по следния начин [3]:

$$[M] \cdot \{\ddot{u}(t)\} + [C] \cdot \{\dot{u}(t)\} + \{F^i(t)\} = \{F^a(t)\}, \quad (1)$$

където $[M]$ е матрицата на масите на конструкцията (structural mass matrix);

$[C]$ – матрицата на съпротивленията на конструкцията (structural damping matrix);

$\{\ddot{u}(t)\}$ – вектор на ускоренията на възлите (nodal acceleration vector);

$\{\dot{u}(t)\}$ – вектор на скоростите на възлите (nodal velocity vector);

$\{F^i(t)\}$ – вектор на вътрешните сили (internal load vector);

$\{F^a(t)\}$ – вектор на приложените външни сили (applied load vector).

При наличието на флуид и конструкция в една обща система, двата елемента си взаимодействат и уравненията за движение на отделните подсистеми се променят. С отчитане на това взаимодействие и на разпличването на повърхността на течността в резервоара, уравнението за движение придобива следния вид [3]:

$$\begin{bmatrix} [M_S] & 0 \\ \overline{\rho_0} \cdot [R]^T & [M_F] + [S_F] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\ddot{u}_e\} \\ \{\ddot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [C_S] & 0 \\ 0 & [C_F] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{\dot{u}_e\} \\ \{\dot{p}_e\} \end{Bmatrix} + \begin{bmatrix} [K_S] & -[R] \\ 0 & [K_F] \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \{u_e\} \\ \{p_e\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{f_S\} \\ \{f_F\} \end{Bmatrix}, \quad (2)$$

където S е индексът и се отнася до конструкцията;

F – индексът, който се отнася до флуида;

$[K]$ – матрицата на коравините;
 $[R]$ – матрицата на граничните условия на флуида (boundary matrix);
 $[S_F]$ – акустичната масова матрица на разплискване (acoustic sloshing mass matrix);
 $\{u_e\}, \{\dot{u}_e\}, \{\ddot{u}_e\}$ – вектори на преместванията, скоростите и ускоренията във въз-
 лите на твърдото тяло;

$\{P_e\}, \{\dot{P}_e\}, \{\ddot{P}_e\}$ – векторите на акустичното налягане на флуида и неговите произ-
 водни (nodal pressure vector);

ρ_0 – константа на масовата плътност на акустичния флуид (acoustic fluid mass
 density constant);

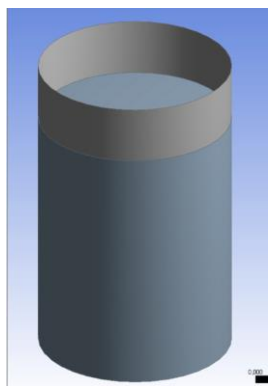
$\{f\}$ – външното натоварване.

в) взаимодействието между резервоара и съдържащата се в него течност е дефини-
 нирано посредством задаване на Fluid Structure Interaction (FSI) Flag на елементите от
 флуида, които са в контакт с резервоара, вж. фиг. 4;

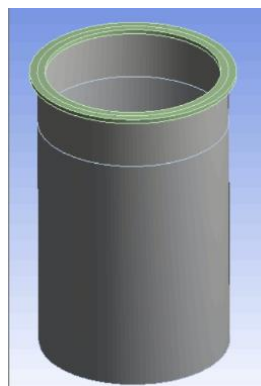
г) съгласно [3], при дефиниране на телата на течността и на резервоара като от-
 делни части и отчитане на взаимодействието между флуида и конструкцията, единствен-
 ният възможен за използване контакт е тип „залепване“ (bonded), дефиниран чрез MPC
 (Multi-Point constraint) формулировка. Чрез него се добавят гранични условия, които
 „привързват“ преместванията между контактуващите повърхности.

При дефинирането на подобен тип контактни задачи, взаимодействащите си еле-
 менти се разделят на 2 групи – контактни елементи (contact) и целеви елементи (target).
 Проникването на контактните елементи през целевите е забранено. При моделиране на
 взаимодействието между течност и твърдо тяло е необходимо като контактен елемент да
 бъде дефинирана водата, а твърдото тяло да бъде целеви елемент;

д) не е необходимо допълнително разделяне на геометрията на телата, вж. фиг. 3;



а) резервоар със свободен горен край



б) резервоар с горен опорен пръстен

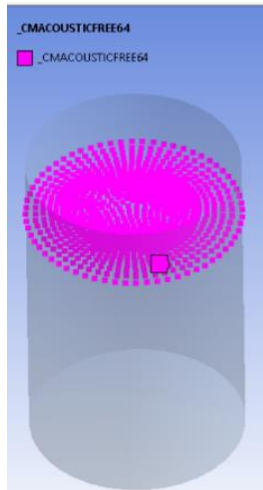
Фиг. 3. Геометрия на резервоара в етап 2 от изследването в ANSYS Workbench

е) навсякъде е приложено земното ускорение $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$, което е необходимо
 условие за наличието на свободна повърхност в течността;

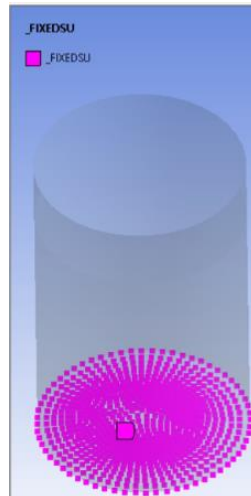
ж) за да бъдат отчетени ефектите от разплискването, е зададен “Free surface flag”
 на свободната повърхност на течността. Последното е осъществено чрез дефиниране на
 наименувани компоненти и ръчно въвеждане на команди в програмата, вж. фиг. 4;

з) премахнати са всички степени на свобода на основата на резервоара, но при този етап на изследването чрез потребителска намеса се задава допълнително условие да се реализира степента на свобода на налягане на флуида, вж. фиг. 4;

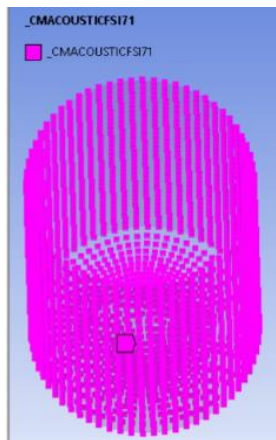
и) несиметричните матрици при дефиниране на уравнението за движение налагат използването на изчислителна процедура, която използва несиметричен алгоритъм на решение (Unsymmetric Solver).



а) компонент за задаване на свободна повърхност на течността



б) компонент за задаване на подпирането в основата



в) компонент за задаване на взаимодействието между флуид и конструкция (FSI flags)

```

/Prep7
/com,***** Elements for Body 2 "water" *****
et,matid,30
r,matid,2.e-005,101325.

/com,***** Fixed Supports *****
cmsel,s,_FIXEDSU
d,all,all
ddelete,all,pres ! release the pressure DOF for acoustics analysis
nset,all

/com,***** Create Acceleration *****
ACEL,,,9.8066

/com,***** Create Fluid Solid Interface *****
cmsel,s,_CMACOUSTICFSI71
esel,r,ename,,30
sf,all,fsi
allsel,all

/com,***** Create Free Surface *****
cmsel,s,_CMACOUSTICFREE64
sf,_CMACOUSTICFREE64,free
allsel,all

/SOLU
antype,2 ! modal analysis
modopt,unsym,500,1.e-002,,

```

г) потребителски команди за разширяване на възможностите на Workbench модулите – задаване на елемент тип “fluid”, дефиниране на гранични условия, запъване в основата, свободна повърхност и взаимодействие между течността и конструкцията

Фиг. 4. Дефиниране на гранични условия в ANSYS Workbench

2.3. Изследване в ANSYS Mechanical APDL

Дефинирането на елементите и взаимодействието между тях в ANSYS Mechanical APDL е много сходно с това, описано по-горе в т. 2.2.

Като основна разлика може да се посочи начинът на построяване на тази част от корпуса на резервоара, която е в контакт с течността. Тъй като тук липсва опцията за обединяване на отделните тела (“Form New Part”), налична в Workbench, е необходимо да се приложи друг подход за получаване на съвместима мрежа в зоната на взаимодействие между резервоара и неговото съдържание. Това се постига, като вместо да се изчертава физическа геометрия на корпуса, той се генерира автоматично след дефиниране на мрежата на течността – точно по крайните елементи на флуида. По този начин дискретизацията на двата елемента е напълно съвместима. Елементите на черупката тип shell181 се генерират чрез командата ESURF [3].

2.4. Параметри на изследването

При всеки анализ на резервоара с конкретния Workbench модул или в ANSYS APDL е търсено:

а) максималното пръстеновидно напрежение σ_{θ} , в корпуса, причинено от съхраняваната в резервоара вода, МПа;

б) максимално радиално преместване Δ_{θ} на корпуса, предизвикано от водата, mm;

в) минимална f_{\min} и максимална f_{\max} честота на собствените форми, като:

- по подразбиране са търсени 500 собствени форми;
- минималната търсена честота е 0,1 Hz.

Изследваните собствени форми в първия етап на изследването са ограничени до 500, защото дори и при дефиниране на по-висок брой, програмата не успява да определи техните стойности и решението се прекратява. Във втория етап на моделиране в Workbench, изследваните 500 форми са достатъчни за активиране на 90% от масите и получаване на достоверни резултати. В ANSYS MAPDL необходимият брой форми надвишава 500, затова са търсени 1000 собствени форми;

г) преобръщащият момент M и сръзващата сила H в основата при използване на спектрален метод за анализ, където:

- хоризонталното земно ускорение е със стойност $a_g = 2,55 \text{ m/s}^2$;
- почвата в основата на резервоара е тип „С“ съгласно класификацията на европейския стандарт EN 1998-1 [8].

3. Резултати

3.1. Резултати от първия етап на изследването чрез ANSYS Workbench

В първия етап на изследването контактът между двата материала е дефиниран по два различни начина. При първата група от модели, черупката и течността си взаимодействат както следва:

- връзката на течността с елементите на дъното е определена като “bonded contacts” – елементите на двете тела са „залепени“ едно за друго и преместване и отделяне не е възможно;

- връзката на течността с елементите на корпуса е избрана да бъде “no separation contacts” – елементите на двете тела могат да се преместват едно спрямо друго, но не и да се отделят.

Получените резултати са обобщени в табл. 1.

При втората група от модели, черупката и течността си взаимодействат чрез дефинирани навсякъде “bonded contacts”, т.е. елементите на двете тела са „залепени“ едно за друго и преместване и отделяне не е възможно.

Резултатите от проведеното изследване, при което са използвани “bonded contacts” по всички общи повърхности на двата материала, са обобщени в табл. 2.

Таблица 1. Резултати при дефинирани връзки “bonded” и “no separation”

Вид анализ (модул):		Статичен (Static Structural)		Модален (Modal)		Спектрален (Response Spectrum)	
Начален модул	Укрепване	Напрежение σ_0 , МПа	Преместване Δ_0 , mm	Честота f , Hz		В основата	
				f_{min}	f_{max}	M_y , kN.m	H_x , kN
Static structural	без	30,072*	0,35	0,176	1,118	46,41	8,962
	с ГОП	30,078*	0,36	0,176	1,122	46,47	8,977
Explicit Dynamics	без	47,24	3,08	0,16	1,095	39,65	8,523
	с ГОП	34,12	2,7	0,16	1,091	39,66	8,523
LS-Dyna	без	35,597	0,36	0,135	1,184	40,65	9,194
	с ГОП	12,52	0,5	0,135	1,101	40,48	9,023
Modal Acoustic	без	0,0395	0	0,428	64,40		
	с ГОП	0,441	0	0,428	36,79		

*Забележка: Стойностите, представени в таблицата, са получени за нормалното напрежение в средното сечение на черупката с активиране на опцията за осредняване на напреженията във възлите (averaged). При активиране на осредняване за елемента (elemental mean) или на мембранно напрежение (membrane stress), стойностите за σ_0 са съответно 27,916 МПа за резервоар без ГОП и 26,407 МПа за резервоар с ГОП.

Таблица 2. Резултати при дефинирани връзки “bonded” по всички повърхности

Вид анализ (модул):		Статичен (Static Structural)		Модален (Modal)		Спектрален (Response Spectrum)	
Начален модул	Укрепване	Напрежение σ_0 , МПа	Преместване Δ_0 , mm	Честота f , Hz		В основата	
				f_{min}	f_{max}	M_y , kN.m	H_x , kN
Static structural	без	29,85*	0,287	0,337	1,23	51,78	10,81
	с ГОП	29,85*	0,29	0,338	1,24	51,1	10,19
Explicit Dynamics	без	51,76	2	0,337	1,23	54,11	11,07
	с ГОП	53,77	3,56	0,338	1,242	51,22	10,22
LS-Dyna	без	“bonded contact” не се поддържа					
	с ГОП	“bonded contact” не се поддържа					
Modal Acoustic	без	0,0395	0	0,428	64,40		
	с ГОП	0,441	0	0,428	36,79		

*Забележка: Стойностите, представени в таблицата, са получени за нормалното напрежение в средното сечение на черупката с активиране на опцията за осредняване на напреженията във възлите (averaged). При активиране на осредняване за елемента (elemental mean) или на мембранно напрежение (membrane stress), стойностите за σ_0 са съответно 25,825 МПа за резервоар без ГОП и 26,196 МПа за резервоар с ГОП.

3.2. Резултати от втория етап на изследването в ANSYS Workbench

Резултатите от проведеното изследване, при разширяване на възможностите на съответните модули в ANSYS Workbench чрез потребителска намеса, са обобщени в табл. 3.

Таблица 3. Резултати от втория етап на изследването в ANSYS Workbench

Вид анализ (модул):	Статичен (Static Structural)		Модален (Modal)		Спектрален (Response Spectrum)	
	Напрежение σ_θ , МПа	Преместване Δ_0 , mm	Честота f , Hz		В основата	
			f_{\min}	f_{\max}	M_y , kN.m	H_x , kN
без	30,206*	0,362	0,4283	63,97	1810,90	503,97
с ГОП	30,213*	0,362	0,4283	71,79	1898,50	517,11

*Забележка: Стойностите, представени в таблицата, са получени за нормалното напрежение в средното сечение на черупката с активиране на опцията за осредняване на напреженията във възлите (averaged). При активиране на осредняването за елемента (elemental mean) или на мембранното напрежение (membrane stress), стойностите за σ_θ са съответно 26,481 МПа за резервоар без ГОП и 26,483 МПа за резервоар с ГОП.

3.3. Резултати, получени с ANSYS Mechanical APDL

Таблица 4. Резултати, получени с класическата версия ANSYS Mechanical APDL

Вид анализ:	Статичен		Модален		Спектрален	
	Напрежение σ_θ , МПа	Преместване Δ_0 , mm	Честота f , Hz		В основата	
			f_{\min}	f_{\max}	M_y , kN.m	H_x , kN
без	30,896*	0,362	0,4282	3,685	1827,22	493,36
с ГОП	30,904*	0,362	0,4282	3,812	1884,22	497,50

*Забележка: Стойностите, представени в таблицата, са получени за нормалното напрежение в средното сечение на черупката с активиране на опцията за осредняване на напреженията във възлите (averaged).

3.4. Резултати, получени чрез аналитично (ръчно) решение

3.4.1. Статичен анализ

Максималните пръстеновидни напрежения в цилиндричното тяло могат да бъдат определени чрез добре известното уравнение на Laplace (1740 ÷ 1827):

$$\frac{\sigma_x}{R_x} + \frac{\sigma_\theta}{R_\theta} = \frac{p}{t}, \quad (3)$$

където σ_x е нормалното напрежение в меридианно направление;
 σ_θ – нормалното напрежение в радиално (пръстеновидно) направление;
 R_x – радиусът на кривина на меридианното сечение;
 R_θ – радиусът на кривина на пръстеновидното сечение;
 p – стойността на нормалното налягане върху черупката;
 t – дебелината на черупката, всички в съответстващи си мерни единици.

В този конкретен случай, където $R_x = \infty$, нормалните напрежения в пръстеновидно (радиално) направление σ_θ могат да се определят чрез израза:

$$\sigma_\theta = \frac{p}{t} R_\theta = \frac{6,5 \cdot 9,8066}{0,006} \cdot 2,5 = 26559,5 \text{ kPa} \approx 26,56 \text{ MPa} .$$

При сравняване на резултата на израза по-горе и посочените в таблици 1 ÷ 4 стойности е видно, че най-близки са резултатите, получени чрез модула Static structural, при активиране на осредняване за елемента (elemental mean) или на мембранно напрежение (membrane stress).

3.4.2. Модален анализ

За сравнение на получените резултати от численото моделиране, първите две собствени честоти на течността са определени чрез израза [2]:

$$f_i = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\alpha_i \frac{g}{R} \operatorname{th} \left(\alpha_i \frac{h}{R} \right)}, \quad (4)$$

където $g = 9,8066 \text{ m/s}^2$ е земното ускорение;

$R = 2,5 \text{ m}$ – радиусът на цилиндричното тяло на резервоара;

$h = H_t = 6,5 \text{ m}$ – нивото на запълване на резервоара с вода;

α_i – коефициент, имащ следните стойности:

= $0,586 \pi$ – за първа форма;

= $1,697 \pi$ – за втора форма;

= $2,717 \pi$ – за трета форма.

Честотите на трептене на свободната повърхност на течността са както следва:

- за първа форма – $f_1 = 0,4277 \text{ Hz}$;

- за втора форма – $f_2 = 0,7278 \text{ Hz}$.

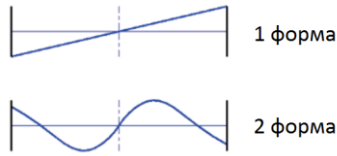
За сравнение, първата собствена честота за разглеждания резервоар при зададеното въздействие, е изчислена и съгласно предписанията на други утвърдени учени в разглежданата област, и стандартите API 650 [5], и EN 1998-4 [9]. Стойностите са показани в табл. 5.

Таблица 5. Стойности за първата собствена честота f_1 на разплискване

Източник	Уманский, [2]	Haroun, [11]	Housner, [12]	EN 1998-4 [9]	API 650 [5]
$f_1, [\text{Hz}]$	0,4277	0,4276	0,4272	0,4273	0,4298

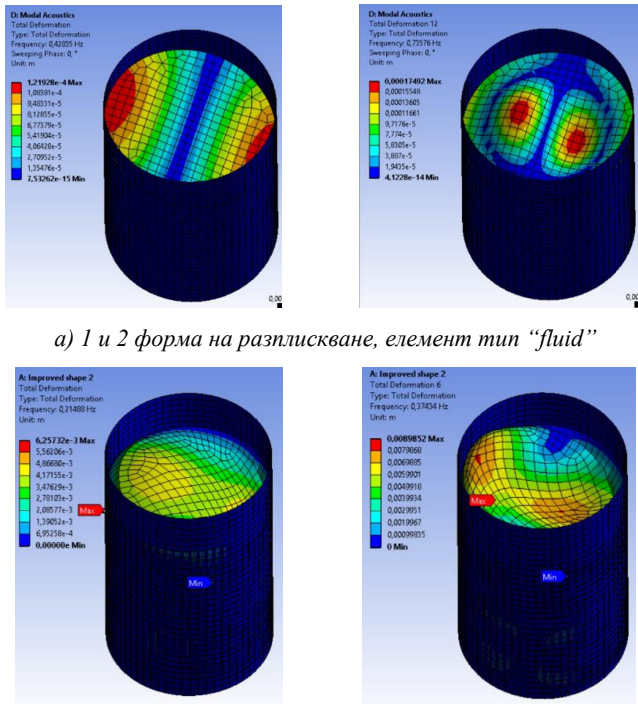
Очевидно, показаните в табл. 5 собствени честоти на течността са много близки с определените чрез модулите Modal Acoustic, Modal в Workbench етап 2 и ANSYS MAPDL, където течността е симулирана чрез елемент fluid30. Резултатите от другите модули, където водата е симулирана като обем (solid) елемент, се отличават съществено от теоретично определените.

Теоретичната форма на свободната повърхност на течността за първите две собствени честоти на разплискване е представена на фиг. 5.



Фиг. 5. Теоретична форма на свободната повърхност на течността за първите две собствени форми на разпличване

Показаната на фиг. 5 форма на разпличване на течността има много добро съвпадение с моделите, при които течността е симулирана чрез използване на елемент тип “fluid”, докато при използване на елементи тип “solid” и връзка между двата елемента тип „залепване“, формите на разпличване се различават, вж. фиг. 6.



а) 1 и 2 форма на разпличване, елемент тип “fluid”

б) 1 и 2 форма на разпличване, елемент тип “solid” и връзка между елементите тип „залепване“

Фиг. 6. Форма на свободната повърхност на течността за първите две собствени форми на разпличване при анализ а) елемент тип “fluid” и б) елементи тип “solid”

3.4.3. Спектрален анализ

Проведен е спектрален анализ с разделяне на реагирането по форми на трептене при зададено сеизмично събитие, определено от хоризонталното ускорение на земната основа $a_g = 2,55 \text{ m/s}^2$. Основата е тип „С“ според класификацията на европейския стандарт EN 1998-1-1 [5]. Сръзващата сила и преобръщащият момент, получени от спектрален анализ за разглежданото въздействие, съгласно предписанията на EN 1998-4 [9], са показани на фиг. 7.

Определяне на усилията в основата при спектрален анализ съгл. EN 1998-4

$s =$	0,006	m	дебелина на стената на рез-ра	собствени периоди на:	
$R =$	2,5	m	радиус на резервоара	$T_{imp} =$	0,061 s имп. компонент
$H =$	8	m	височина на корпус на резервоара	$T_{conv} =$	2,340 s конв. компонент
$H_L =$	6,5	m	височина от дъното на резервоара до свободната повърхност на течността		
$H/R =$	2,6000				
$\rho =$	1000	kg/m ³	плътност на течността		
$m =$	127,6	t	маса на течността в резервоара	$h_i/H =$	0,451
$m_i/m =$	0,810			$h_i =$	2,9 m ЦТ на имп. маса
$m_i =$	103,4	t	импулсна маса	$h_c/H =$	0,795
$m_c =$	24,2	t	конвективна маса	$h_c =$	5,2 m ЦТ на конв. маса
$m_w =$	5,9	t	маса на стената на резервоара	$h_w =$	4,0 m
$m_r =$	0,0	t	маса на покрива на резервоара	$h_r =$	0,0 m
$S_e(T_{imp}) =$	5,197	m/s ²	импулсно спектрално ускорение, получено от еласт. спектър на реагиране		
$S_e(T_{conv}) =$	2,272	m/s ²	конвективно спектрално ускорение, получено от еласт. спектър на реагиране		
$Q_{rw} =$	623,278	kN	$Q = (m_i + m_w + m_r) S_e(T_{imp}) = m_c S_e(T_{con})$		A.37, EN 1998-4
$M_{rw} =$	1983,107	kNm	$M = (m_i h_i + m_w h_w + m_r h_r) S_e(T_{imp}) + m_c h_c S_e(T_{con})$		A.38, EN 1998-4

Фиг. 7. Получаване на усилията в основата на резервоара при спектрален анализ съгласно европейския стандарт EN 1998-4 [9]

От данните, представени в табл. 1 ÷ 4 се вижда, че достоверни резултати за обобщените усилия в основата, породени от сеизмично въздействие, се получават само чрез потребителска намеса в ANSYS Workbench и в ANSYS Mechanical APDL. Получените стойности се различават от тези от ръчните изчисления, получени съгласно EN 1998-4. Преобръщачият момент е по-нисък с между 4% и 5%, а сръзващата сила се различава с между 19% и 21% (при сравнение с резултатите за резервоар с ГОП, тъй като тази постановка е по-близка до приеманията при ръчното аналитично решение). Подобни разлики са очаквани, тъй като предложената в нормативните документи процедура е за приблизителни изчисления. Там стената на резервоара е приета за корава, недеформируема, което предполага получаването на по-големи усилия в нея в сравнение с компютърните модели, където се отчита нейната деформативност.

4. Изводи

Изводите, които могат да се направят от настоящото изследване, могат да бъдат обобщени до:

а) за коректното определяне на собствените честоти на резервоар, пълен с течност, при използване само на графичния интерфейс на ANSYS Workbench, следва да се използва модулът Modal Acoustics. След това обаче не може да се продължи със спектрален анализ на съоръжението, тъй като модулът Response Spectrum не разпознава изчислените форми и собствени честоти;

б) достоверното изчисляване на собствените честоти на резервоар, пълен с течност, при използване на модула Modal в Workbench е възможно само когато моделът се прецизира чрез въвеждане на текстови команди. След това може да се извърши спектрален анализ на резервоара;

в) чрез модулите Explicit Dynamics, LS-Dyna, Modal Acoustics и Static Acoustics не може реалистично да се определят нормалните напрежения в стената на резервоара, предизвикани от съхраняваната в него статична течност. Същото се отнася за получените собствени честоти на трептене;

г) първата собствена честота на течността не се влияе от наличието на закоравяване по корпуса на резервоара;

д) при използване на модули Modal Acoustics и прецизирания Modal в Workbench, наличието на закоравяване (ГОП) по корпуса съществено променя честотите при висшите форми на трептене;

е) получените чрез модифициране на Workbench и ANSYS APDL преобръщащи моменти, и сръзващи сили в основата на резервоара, са близки до теоретично определените. Това би позволило тяхното използване при реални изследователски и проектантски задачи.

Благодарности

Настоящата научноизследователска разработка по договор Д-107/2018 е подкрепена финансово от Център за научни изследвания и проектиране при УАСГ. Авторите изказват своите благодарности за осигуреното финансиране.

Също така авторите биха искали да изразят своята благодарност и към Центъра за математическо моделиране и компютърна симулация (ЦММКС) на Химикотехнологичен и металургичен университет (ХТМУ) за предоставената възможност за използване на програмния пакет ANSYS v19.

ЛИТЕРАТУРА

1. БДС EN 1993-1-1:2005. Еврокод 3: Проектиране на стоманени конструкции. Част 1-1: Общи правила и правила за сгради. БИС, юни 2007.
2. Справочник проектировщика промышленных, жилых и общественных зданий и сооружений. Под редакцией проф. д-р А. А. Уманского, Издание второе. Москва, 1973.
3. ANSYS® v.19 Documentation, ANSYS, Inc.
4. ANSYS. Crush of Filled Soda Can. Introduction to ANSYS Autodyn part II. ANSYS Inc., November 2012.
5. API Standard 650: Welded Tanks for Oil Storage, Twelfth Edition, 2013.
6. *Celik, A., Akgul, T.* Stress Analysis of Cylindrical Steel Storage Liquid Tanks During the Instantaneous Loads, Proceedings of the 3rd World Congress on Civil, Structural, and Environmental Engineering. Budapest, Hungary, April 8 – 10, 2018.
7. *Celik, A., Akgul, T., Apay, A.* Plastic deformation of cylindrical steel tank both under the kocaeli and El-Centro Earthquake. International Journal of Advance Engineering and Research Development, Vol. 5, Issue 09, September 2018.
8. EN 1998-1:2004. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings. European Committee for Standardization, Brussels, 2004.

9. EN 1998-4:2006. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance. Part 4: Silos, tanks and pipelines. European Committee for Standardization, Brussels, 2006.

10. *Goudarzi, M., Sabbagh-Yazdi, S.* Numerical Investigation on Accuracy of Mass Spring Models for Cylindrical Tanks under Seismic Excitation. *International Journal of Civil Engineering*, Vol. 7, No. 3, September 2009.

11. *Haroun, M. A.* Vibration studies and test of liquid storage tanks. 11, June 1982 (1983), 179–206.

12. *Housner, G. W.* The dynamic behavior of water tanks. *Bulletin of Seismological Society of America*, 53, 1963.

NUMERICAL ANALYSIS OF VERTICAL STEEL STORAGE TANKS IN ANSYS WORKBENCH AND ANSYS MECHANICAL APDL

M. Pantusheva¹, L. Zdravkov²

Keywords: *steel storage tank, structure, fluid, liquid, interaction, finite elements, ANSYS*

ABSTRACT

Vertical cylindrical steel storage tanks are industrial facilities in which the solid steel shell and the contained deformable fluid are in contact and interact with each other. The modelling of these two mediums and their interaction requires the use of appropriate software, such as ANSYS. In an effort to meet the demands of new users, ANSYS has created the Workbench graphics interface. It is user-friendly and in that manner has an advantage over the classic Mechanical APDL appearance. Distinctive for Workbench is the differentiation of separate modules, each specialized at solving tasks from a certain mechanics field. However, the interaction between solids and fluids is an interdisciplinary problem that has to be solved by using different modules of the program. The crucial question here is whether those computing modules can be used for the purposes they were not originally created for? And moreover, how reliable would the results be? In an effort to answer these questions the current paper presents a study on the behaviour of a water-filled steel storage tank analysed by static, modal and spectral analysis in ANSYS Workbench and in ANSYS Mechanical APDL. The obtained solution results are compared with analytical calculations.

¹ Mariya Pantusheva, Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: maria.pantusheva@gmail.com

² Lyubomir Zdravkov, Assoc. Prof. Dr. Eng., Dept. “Steel, Timber and Plastic Structures”, UACEG, 1 H. Smirnski Blvd., Sofia 1046, e-mail: zdravkov_fce@uacg.bg