



**ХИМИКОТЕХНОЛОГИЧЕН И МЕТАЛУРГИЧЕН УНИВЕРСИТЕТ**

**ФАКУЛТЕТ ПО МЕТАЛУРГИЯ И МАТЕРИАЛОЗНАНИЕ**

**КАТЕДРА „ПРИЛОЖНА МЕХАНИКА”**

**инж. Николай Методиев Николов**

**МЕХАНИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА НОСЕЩИ МЕМБРАННИ  
КОНСТРУКЦИИ В ХИДРОТЕХНИКАТА**

**А В Т О Р Е Ф Е Р А Т**

**на дисертация**

**за придобиване на образователната и научна степен „доктор”  
по научна специалност 5.1. Машинно инженерство  
(Приложна механика)**

**Научен ръководител:**            доц. д-р инж. Веселин Димитров Илиев

**Научно жури:**            1. доц. д-р инж. Нина Янкова Пенкова – председател, рецензент  
                                 2. проф. д-р инж. Красимир Петров - рецензент  
                                 3. доц. д-р инж. Мария Иванова Маврова-Гиргинова  
                                 4. доц. д-р инж. Радан Иванов Ивнов  
                                 5. доц. д-р инж. Веселин Димитров Илиев

**София, 2017**

---

Дисертационният труд е написан на 116 страници, съдържа 100 фигури и таблици.  
Цитирани са 47 източника.

Представеният дисертационен труд е обсъден и приет за защита на заседание на разширен катедрен научен съвет на научното звено на катедра „Приложна механика”, състояло се на 14.06.2017г.

Публичната защита на дисертационния труд ще се проведе на 20.11.2017г. от 14:00 часа в зала 424, сграда „А” на ХТМУ.  
Материалите са на разположение на интересувашите се на интернет страницата на ХТМУ и в отдел „Научни дейности”, стая 406, етаж 4, сграда „А” на ХТМУ.

---

## **I. ОБХВАТ НА ДИСЕРТАЦИОННИЯТ ТРУД**

### **1.1. Актуалност на проблема**

В строителната практика съществува голямо разнообразие на изделия, включващи носещ мембранен елемент. Според формата и закрепването на мембранный елемент в хидротехническото строителство могат да бъдат разграничени отворени и затворени, закрепени и свободно лежащи, еднокамерни и многокамерни конструкции. Основните оразмерителни методики за хидротехническите конструкции с носещ мембранен елемент отчитат три вида натоварване: основно (статично натоварване, формирано от воден слой пред конструкцията, който може и да прелива); допълнително (статично натоварване от повишаване на водния слой); динамично (натоварване от удари с плаващи тела). Не са известни изследвания с динамично натоварване от прииждаща висока вълна, явление все по-често наблюдавано при съвременните климатични явления. Основен подход при оразмеряването на носещ мембранен елемент е той да бъде разглеждан като тънка еластична черупка, подложена на опънни усилия по основните направления на кривина. Съществуват добре развити аналитични изчислителни методики за пресмятане на равнинни сечения на мембранный елемент, докато методите за пресмятане на мембраната като тримерен обект са все още слабо развити. Това се дължи на факта, че в пространството процесите се описват с частни диференциални уравнения и проблемите се решават с числени методи. Анализа на напрегнато-деформираното състояние на пространствените носещи мембранный елементи в хидротехническото строителство е възможно благодарение на наличието на професионален софтуер и високо производителни работни станции за числено пресмятане на частни диференциални уравнения.

### **1.2. Цел и задачи на дисертационната работа**

Цел на настоящата дисертационна работа е да бъдат създадени алгоритъм и модел за пресмятане на механичното поведение на хидротехническа мембранный конструкция със затворен мембранен елемент закрепен по една образуваща в условията на прииждаща висока вълна.

За постигане на поставената цел са решени следните задачи:

1. Създаване на обща симулационна среда за анализ на механичното поведение на хидротехническа мембранный конструкция с носещ мембранен елемент, включваща: реален обект, концептуален модел, адекватен софтуер и модел за компютърна симулация.
2. Съставяне на математичен модел на прииждаща висока вълна, включващ уравнение на движение, уравнение за непрекъснатост, модел за турбулентност и модел за свободна повърхност.

- 
3. Анализ на съществуващите софтуерни кодове за решаване на проблеми свързани със съвместна работа на деформируемо твърдо тяло и флуид. Избор на подходящ софтуер.
  4. Верифициране на модела по отношение на изчислителните характеристики и условията на решението.
  5. Валидиране на модел чрез сравняване на резултатите от компютърна симулация с резултати получени от лабораторни изследвания.
  6. Моделиране и числено симулиране на хидротехническа мембранна конструкция в призматично легло с оглед определяне на натоварването при различни експлоатационни условия.

### **1.3. Аprobация на дисертационния труд**

Основните резултати в дисертационния труд са докладвани и публикувани в:

1. Николов Н., Определяне на натоварването върху затворена хидротехническа мембрана във водно течение, E-Journal Mathematical Modeling and Computer Simulation, Volume II, Number 4, Year 2014.
2. Николов Н. Илиев В., Формиране на натоварването върху водонапълняема хидротехническа мембрана при импулсно действие на прииждащо водно течение, E-Journal Mathematical Modeling and Computer Simulation, Volume III, Number 7, Year 2015.
3. Veselin Iliev, Nikolay Nikolov, Validation procedure for numerical model of hydraulic inflatable dam under pulse load, Science, Engineering & Education, 1, (1), 2016, 3-10
4. Николов Н., Динамични реакции на водонапълняема хидротехническа мембрана от импулсно натоварване. XIII научна постерна сесия за млади учени, докторанти и студенти, Химико-технологичен и металургичен университет, Май 2016;
5. Николов Н., Изследване на течение със свободна повърхност над водонапълняема носеща мембрана, X научна постерна сесия за млади учени, докторанти и студенти, Химико-технологичен и металургичен университет, Май 2013
6. Николов Н., Илиев В., Механично поведение на водонапълняема хидротехническа мембрана при спрегнати височина и дебит, XI научна постерна сесия за млади учени, докторанти и студенти, Химико-технологичен и металургичен университет, Май 2014
7. Nikolov N., Verification of results from computer simulation of a stream flow across inflated dam, Anniverary scientific conference with international participation, University of chemical technology and metallurgy, june 4 - june 5,2013;

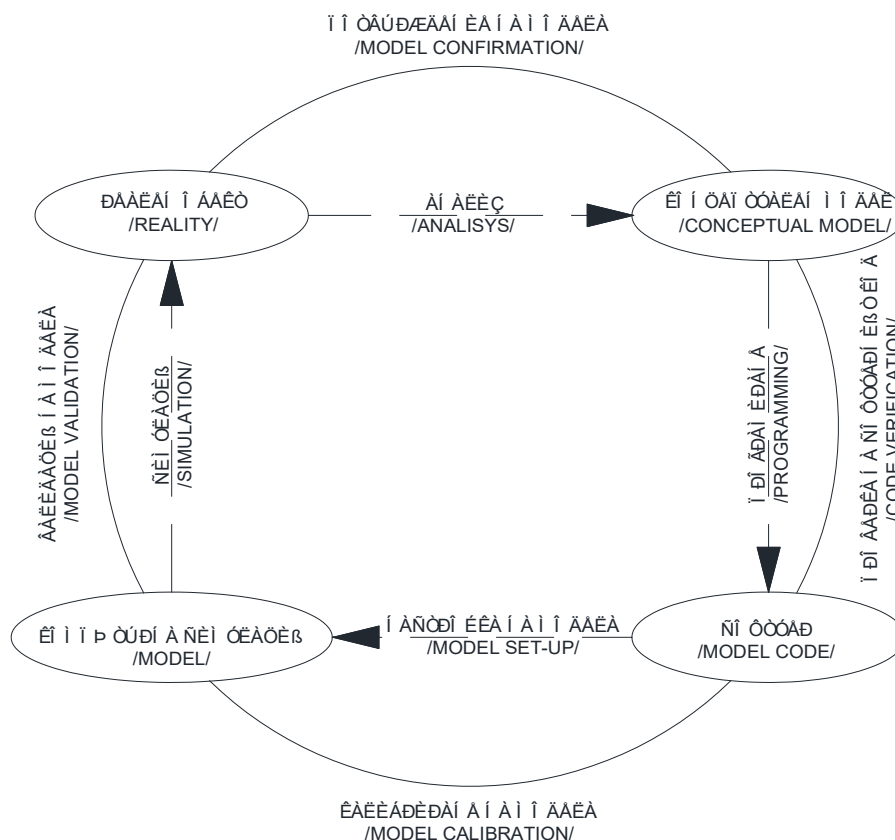
8. Nikolov N., Iliev V, Fluid Flow over Inflatable Stopper in Penstock, Proceedings of the International Conference on Heat Transfer and Fluid Flow Prague, Czech Republic, August 11-12, 2014 Paper No. 75;

9. Iliev V., N. Nikolov, Verification of results from computer simulation of a stream flow across inflated dam. World Journal of Hydraulic Engineering, v.1, 2013

## II. ТЕОРЕТИЧНИ ОСНОВИ, МЕТОДИ И СРЕДСТВА ЗА РЕШАВАНЕ НА ПРОБЛЕМА

### 2.1. Основни принципи и методологическа рамка

Следната терминология е заимствана от известна в литературата обобщена терминология, но модифицирана и разширена, за да се обхванат научните въпроси, засягащи обекта на настоящото изследване. Симулационната среда е разделена на четири основни елемента, както е показано на фиг. 2.1.



Фиг. 2.1 Елементи на симулационната среда

Вътрешните стрелки описват връзката между процесите (свързват елементи един към друг), а външния кръг се отнася за процедурите, като оценка на надеждността на тези процеси. В общи линии моделът може да се опише като опростена схема на реално съществуващата система. Въпреки това, в

---

терминологията, предложена по-долу, се прави разграничение между три различни значения на общия терминологичен модел, а именно: концептуален модел; софтуер; модел за компютърна симулация. Най-важните елементи в терминологията и техните взаимоотношения са определени, както следва:

#### **2.1.1 РЕАЛЕН ОБЕКТ**

Реалните обекти биват опознавани посредством натурни и лабораторни наблюдения. Поради липса на достъп до реални обекти, в дисертацията са използвани данни от литературни източници за натурни измервания на обекти в България и чужбина, както и данни за лабораторни изпитания.

##### **2.1.1.1 Световна практика**

Идеята за приложение на мембранни структури във водното строителство съществува още от древността. Първата реална конструкция осъществена със съвременни технически средства е от 1965г., когато Норман Имбертсон регистрира патент US3173269A „Collapsible dam” . В този патент идеята е пресъздадена с реални технически средства за реализиране на изделието, включващи обща конфигурация на мембранна конструкция, средства за закрепяне по дъното, средства за напълване и изпразване.

По този патент са изградени редица язове с предназначение за предотвратяване на навлизането на солена вода от океана в сладководния басейн на река Лос Анджелис в Калифорния. По-късно през 1967 г. патентът е откупен от японския концерн Sumitomo, който за периода до 1981 г. построява 700 такива конструкции. Тези темпове се запазват, като понастоящем конструкциите на Sumitomo известни като Sumigate наброяват няколко хиляди. За отбелязване е баража на река Иваки с дължина 150m и баража на река Огамиго с височина 10m.

Други значителни производители на такива конструкции са „Бриджстоун, САЩ”, в Европа „Рубена, Чехия”, „Пластеко, Италия” и „Хидроконструкт, Австрия”.

В бившия съветски съюз приложението на мембранните структури се развиват от Южен научноизследователски институт по Хидротехника и мелиорации в Новочеркасск. Поради спецификата на реките и напоителните канали в руското водно стопанство изследванията са насочени към мембранни структури образувани главно от отворени мембранни елементи. В лабораторията на института са изследвани редица конфигурации на такива структури като резултатите са подробно описани в сборника на института. Практическата реализация се основава на редица нормативни документи създадени въз основа на резултатите от научните изследвания.

---

### **2.1.1.2    Практическа реализация в България**

През 1984 г. колектив от Химикотехнологичен и металургичен университет – София под ръководството на проф. Попова започва работа върху проблемите, свързани с механичното поведение на гъвкавите мембранни материали и конструкции. Създадени са изчислителни методики въз основа, на които ДСО “Водно стопанство” започва проектиране и изпълнение на такива конструкции. До 2009 г. по темата са публикувани 16 статии в наши и чуждестранни научни издания, изнесени са доклади на 8 научни конференции и конгреси с международно участие и са защитени 3 дисертации. През 1984 г. СЕП «София окръг» проектира и изпълнява първата стационарна мембранна хидротехническа конструкция на р. Макоцевска (фиг.2.2).



*Фиг.2.2. Стационарна мембранна хидротехническа конструкция на р. Макоцевска*

През следващите години в системата на ДСО «Водно стопанство» и «Енергопроект» са създадени 12 проекта на отворени и затворени стационарни хидротехнически мембранни конструкции, като 7 от проектите са реализирани. След 1989 г. работата по внедряването на тези конструкции в системата на водното стопанство се прекратява. От 1988 г. започва работа и върху мобилните свободнолежащи водонапълняеми мембранни конструкции. Разработени са математичен модел и изчислителна методика за определяне на напрегнато-деформираното състояние на носещите елементи и на условията, при които тези конструкции могат да поемат значителни натоварвания без външно закрепване.

По договор с «Гражданска защита», съвместно с ТУ-София е създадена технология за конфекционироване на двукамерни и трикамерни хидротехнически мембранни конструкции с голяма дължина, подходящи за защита на територии от наводнения и замърсяващи разливи. Изработени са пилотни двукамерни и трикамерни мембранни конструкции, с които са проведени експериментални

---

изследвания за валидиране на изчислителните модели и са проведени демонстрации пред «Гражданска защита». Въпреки решаването на поставените задачи и успешните изпитания, след завършването на проекта не се стига до практическа реализация на предложените конструкции. През последните години примерите за добри практики в останалите държави на ЕС и появата на европейския пазар на някои от големите чуждестранни производители дават надежда, че работата по въвеждане на тези конструкции в практиката по защита на териториите от наводнения може да бъде възобновена.

### **2.1.1.3    Лабораторни изследвания**

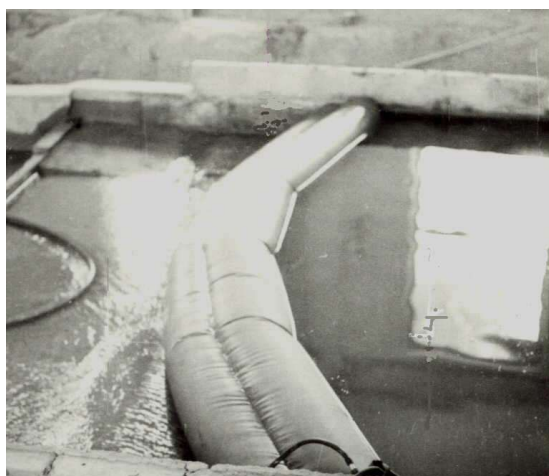
Първи опит за изследване на напълняемите хидротехнически мембранни конструкции в лабораторни условия е направен от Ануар през 1967г. и от тогава този подход широко се използва за установяване на хидравличните и геометричните характеристики на конструкциите. Въз основа на резултати от лабораторни изследвания, японският институт по ХМС представя емпирична формула за преливното водно количество при различни конструкции от водонапълняем или въздухонапълняем тип. През 1997г. Chanson изследва траекторията на преливащата струя при свободно падане в енергогасител след напълняема конструкция, с цел да установи разликите при напълване с въздух и вода. Една от характеристиките на въздушното напълнените надуваеми язове е, че тялото им се свива, когато вътрешното налягане пада, оформя местна деформация и предизвиква ефект на т.н. V-преливане.

Друг голям експериментален център за лабораторно изследване на напълняеми хидростатически мембранни конструкции се намира в ЮжНИИГиМ, Новочеркасск, Русия. Освен описаните вече по-горе теоретични изследвания, в този център се провежда и интензивна лабораторна работа във връзка с приложението на напълняеми преливници в хидроенергийното строителство и напълняеми язове в хидромелиоративното строителство. Определено е влиянието на механичните свойства на мембранный материал върху формообразуването на конструкцията, както и коефициента на преливното водно количество при различна степен на запълване вода/въздух и при конструкции с корав щит.

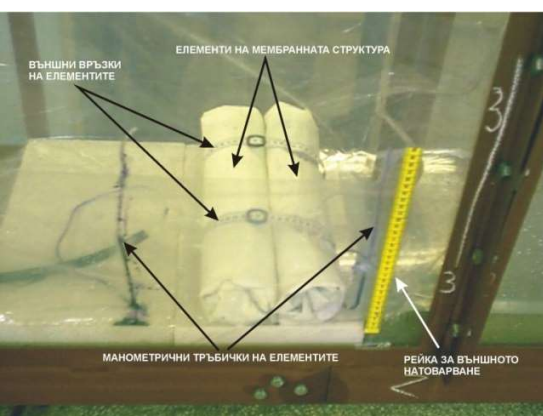
В България експериментално изследване на напълняеми мембранни конструкции са провеждани в лабораторията на кат. Приложна механика на ХТМУ, за определяне на механичните свойства и формообразуването на носещата мембрана при хидростатично налягане (фиг. 2.3), в лабораторията на Институт по хидротехника към БАН (фиг.2.4), за определяне на хидростатичното поведение на многокамерните мембрани и в лабораторията по хидротехника на УАСГ (фиг.2.5) за определяне на след критичната устойчивост на напълняемите конструкции.



Фиг. 2.3. Лабораторен експеримент за определяне на механичните свойства и формообразуването на носещата мембрана при хидростатично налягане



Фиг. 2.4. Лабораторен модел за определяне на хидростатичното поведение на многокамерните мембрани



Фиг. 2.5. Лабораторен модел за определяне на следкритичната устойчивост на напълняемите конструкции

#### 2.1.1.4 Обект на изследването

Въз основа на разгледаните натурни модели и лабораторни изследвания може да се определи посоката към която ще се развие обекта на изследването.

Направеното литературно проучване показва, че в световната научна литература съществува достатъчна теоретична база, позволяваща успешно провеждане на анализ на основните типове хидротехнически мембранни конструкции. На базата на наличните литературни източници за разработките, проведени в България на тази тема от 1984 г., може да се направи заключение, че

са поставени основите на школа със собствен подход към теоретичното и експериментално изследване на обекта (носещи мембранни конструкции и материали). Съществуващите литературни източници са база за анализ на основните типове конструкции и натоварвания. Съществуват редица различни конфигурации от отворени и затворени елементи, подложени на външно и вътрешно натоварване от различен тип (статични, динамично, хидростатично, хидродинамично, температурно), за които няма изведена изчислителна методика в завършен вид.

Едно от перспективните направления, в които биха могли да продължат научните разработки е изясняването на механичното поведение на затворените хидротехнически мембранни конструкции в реални условия на обтичащ флуид при наличие на колебание на водното ниво и динамично натоварване.

Направлението прието в дисертационният труд се основава на поведението на затворена хидротехническа мембранна конструкция в условия на обтичащ флуид при динамично натоварване в правоъгълен канал. Поради липсата на реални обекти, основното наблюдение се базира върху лабораторни изследвания.

### 2.1.2 КОНЦЕПТУАЛЕН МОДЕЛ

Концептуалният модел представлява описание на реалността посредством словесни изрази, уравнения, регулиращи взаимоотношенията или природни закони. Така той включва както математическо описание на процесите, така и описания на носещата мембрана като твърдо тяло (стационарна или мобилна), на експлоатационната среда (въздушна или водна), процеса на обтичане, теренните и геоложки дадености, силовите връзки и закрепващите елементи, които са необходими за конкретното предназначение на моделирането. Най-обща схема на концептуалния модел е дадена на фиг.2.6.



Фиг. 2.6. Концептуален модел

---

### 2.1.3 **СОФТУЕР**

След създаването на концептуалният модел се пристъпва към изграждане на симулационен модел, който сам по себе си не може да съществува без софтуерна среда, в която да се реализира. За разлика от изследователската практика на 60-70 те години, когато за целите на изследването се е налагало разработването на нарочен, уникален компютърен код, описващ геометрията на изследваната област и решаващ управляващите уравнения със собствена изчислителна част, съвременната изследователска практика включва използването на съществуващ софтуер, описващ общите страни на процеса, който се надгражда към уникалните за конкретната задача характеристики. Така на базата на съществуващ софтуер се изгражда уникален за процеса симулационен модел.

В повечето случаи при създаването на симулационен модел е необходимо използването на повече от един софтуер за постигане на по-точна и прецизна симулация на дадения обект.

#### **2.1.3.1   *Графичен софтуер***

Като първа стъпка може да се приеме, че се започва с графичен софтуер, чрез който се изобразява графично изследвания обект. За целите на настоящото изследване бяха използвани продуктите AutoCAD и Autodesk Inventor.

#### **2.1.3.2   *Софтуер за симулация***

Следващата стъпка е прехвърлянето на графичният модел в софтуера за симулация. Софтуерите за симулация са строго специализирани в зависимост от задачите, които е необходимо да бъдат решени. Съществуват развойни компании, които с цел повишаване на качеството на услугата обединяват тези елементи за получаването на нов многофункционален софтуер, в който решаването на отделни задачи от един обект се извършва едновременно и свързано. За целите на настоящото изследване беше избран програмен продукт ANSYS, която е многоцелева програма, базирана на метода на крайните елементи и метода на крайните обеми, за решаване на широк спектър от инженерни проблеми. С нейна помощ могат да бъдат провеждани анализи в следните инженерни направления: конструкции, топлинни процеси, електрически полета, магнитни полета и флуиди.

Програмата ANSYS съдържа специализирани опции, които позволяват третиране на голямо разнообразие от нелинейности: пластичност, големи деформации, хипереластичност, контактни задачи и др.

Възможно е изследване едновременно в две направления като Structural и Fluid, Structural и Thermal и др. Софтуерът за инженерни симулации ANSYS е разработен така, че да осигури възможност на потребителите си да изчисляват

---

(анализират) поведението на частите под въздействието на различни физични въздействия едновременно.

#### **2.1.3.3    *Методология***

Във всички подходи се следва една основна процедура за решаването на дадена задача, която включва:

- Предварителна обработка (Preprocessing).

При тази дейност се определя и моделира геометрията на задачата. Елементите на геометричния модел се разделят на отделни клетки (мрежа). Мрежата може да бъде еднородна (изградена от един тип елементи) или нееднородна. В рамките на всяка клетка се дефинират необходимите уравнения за решаването на поставения проблем.

Определят се граничните условия. Това включва уточняване поведението и свойствата на флуида по границите на изследваната област.

Задават се начални стойности на участващите в уравненията величини.

- Решаване на уравненията (Solution)

Тази дейност включва итеративните процедури даващи устойчиви резултати за търсените величини в цялата област на изследване.

- Анализ на резултатите (Postprocessor)

При тази дейност се визуализират и анализират получените резултати.

#### **2.1.3.4    *Изчислителен модул (Solver)***

Всеки софтуер за компютърна симулация на процеси включва изчислителен модул, в който системите частни диференциални уравнения се трансформират в обикновени алгебрични уравнения и се решават. Всички изчислителни модули са изградени на основата на дискретизация на изследваната област – разделяне на геометричния модел на клетки в рамките, на които процесът се с прости уравнения и малко неизвестни.

Стабилността на избраната дискретизационна процедура обикновено е установена числено (емпирично) вместо аналитично. Специално внимание трябва да се обърне на дискретизационните похвати за да се гарантира, че решението е сходящо и няма да прекъсне.

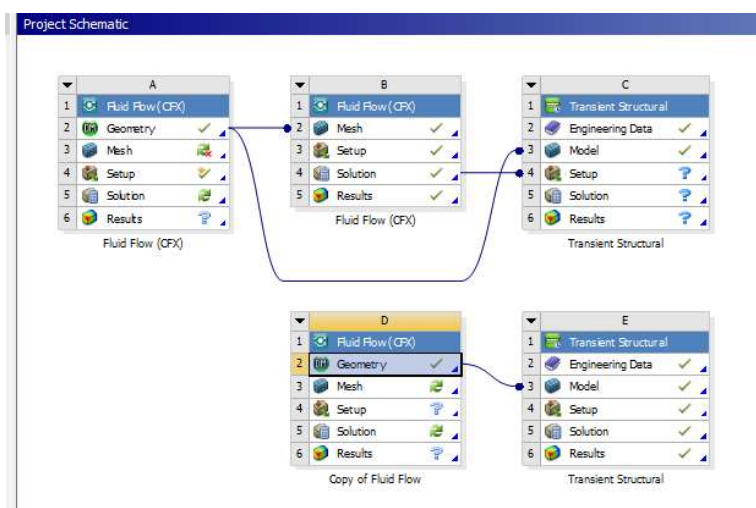
Използват се два основни метода за дискретизация - Метод на крайните обеми (МКО) и Метод на крайните елементи (МКЕ)

#### **2.1.4    КОМПЮТЪРНА СИМУЛАЦИЯ**

За целите на дисертацията е съставен подробен модел, състоящ се от много на брой съставни елементи, отговарящи на елементите на конструкцията. В процеса на работа елементите, които не влизат в обхвата на изследването или са

с второстепенно значение, са опростени като геометрия или окрупнени с цел намаляване обема на работа на изчислителната машина. Необходимостта от тези мерки е предизвикана от огромният ресурс, с който за сега не разполагаме, необходим за моделирането на всеки един детайл и елемент, от най – малката гайка до основният носещ елемент на конструкцията.

Тъй като изследваният проблем включва система от твърдо тяло (носеща мембрана с прилежащите и закрепващи елементи) и флуид (вода с плаващи и влачени наноси), то за неговото решаване е създаден проект от изчислителни модули за различните типове задачи (твърдотелни или флуидни). На фигура 2.7 е показана примерна схема на проект, използван в настоящите изследвания, при който резултатите от флуидната задача (напрмер: преливане на водата над мембранната конструкция) са вкарани като натоварване в твърдотелната задача (определяне на напрегнатото и деформирано състояние на носещата мембрана).



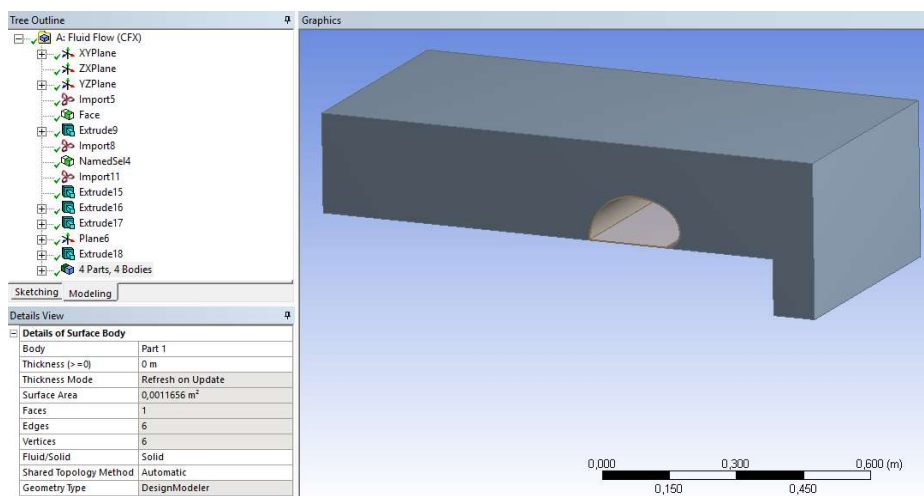
Фиг.2.7. Схема на проекта

#### 2.1.4.1 Геометричен модел

Геометричният модел е първата стъпка при изграждането на симулационният модел. При нея се използват основно два подхода:

- Вмъкване на геометрията изготвена чрез графичен софтуер (AutoCAD, Inventor или друг продукт).
- Изчертаване на геометрията в симулационният софтуер (ANSYS). В случаите с по сложни модели се използват готови геометрии, предварително изработени в някой графичен продукт.

В настоящите изследвания е използван първият подход (фиг 2.8).

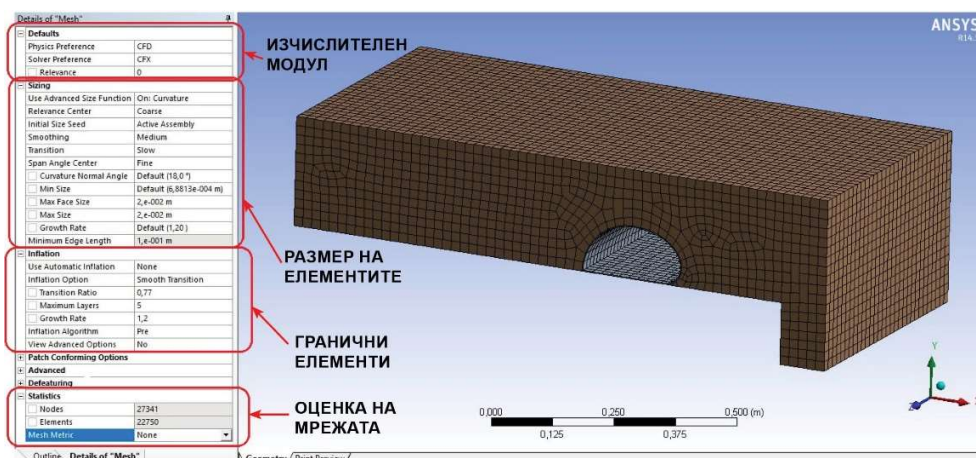


Фиг.2.8.  
Геометричен модел

#### 2.1.4.2 Мрежа (Mesh)

С опцията Mesh се извършва дескретизация на изследваната област. Като резултат се получава мрежа от крайни елементи или крайни обеми. В общия случай точността на решението на дадената задача зависи от гъстотата на мрежата. На колкото повече крайни елементи се раздели дадено тяло, толкова по точно се очаква да е решението на задачата. Големият брой елементи обаче води до утежняване на изчислителната процедура и до голям ресурс от процесорно време. Поради това се препоръчва да се направи верификация на модела по отношение на гъстотата на елементната мрежа. Елементите на мрежата могат да бъдат с различна геометрична форма, която се избира според типа на решаваната задача. Както гъстотата, така и геометричната форма на елементите определя точността на решението, особено при флуидните задачи, и също подлежи на верификация при съставяне на симулационния модел.

В процеса на създаване на елементната мрежа се посочва изчислителния модул, който ще бъде използван при решаване на уравненията (CFX, Fluent, Multiphysics, Mechanics и др.), размера на елементите, наличието на особени гранични елементи и необходимите данни за оценка на мрежата (фиг. 2.9)

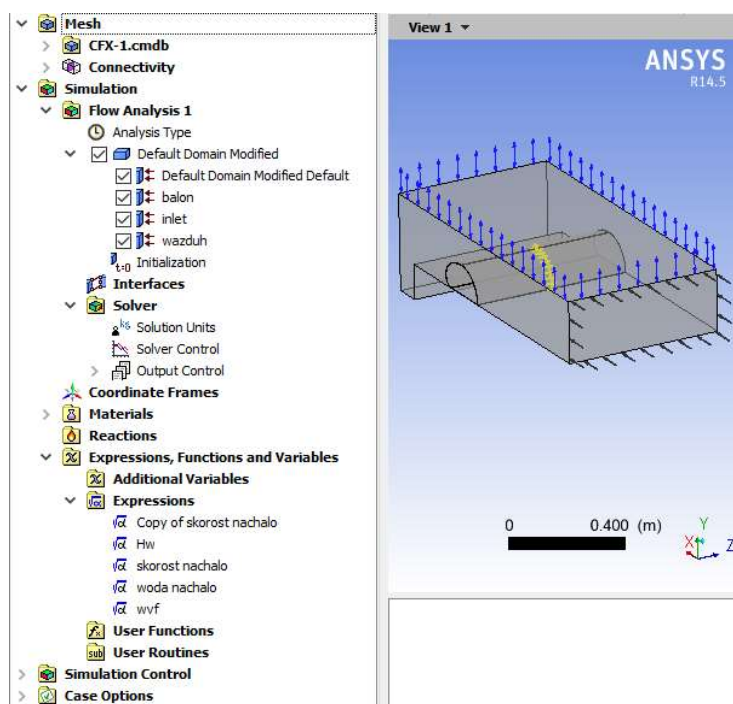


Фиг.2.9.  
Мрежа от  
крайни  
елементи

### 2.1.4.3 Настройка (Setup)

Използвайки инструмента настройка (Setup), могат да бъдат определени натоварванията, началните и граничните условия, както и да се зададат характеристиките на анализа. Предоставен е пълен набор за автоматично генериране на гранични условия, включително вход, изход, отворена повърхност, равнина на симетрия, равнина на периодичност, заедно с възможност за потребителско въвеждане на гранични условия при модели за пренос на маса и топлина и периодичност при флуидни модели.

Основния изглед на инструмента с настройки е показан на фиг.2.10. На таблицата в ляво се виждат някои от основните менюта на инструмента.



Фиг. 2.10. Прозорец на инструмента за настройки

### 2.1.4.4 Решение (Solution)

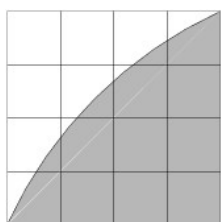
В този етап се активира изчислителният модул на системата, който трансформира системите частни диференциални уравнения в обикновени алгебрични и ги решава. В инструмента за решение (Solution), може да се получи и достъп до базата данни за резултати от предишни решения и може да се обменят данни с други системи по веригата (например, може да бъде избрано решение от един анализ като резултатите от него могат да бъдат дефинирани като входни

условия за друг анализ). В последните версии на изчислителния модул съществува възможност за дистанционен изчислителен процес (Remote solver).

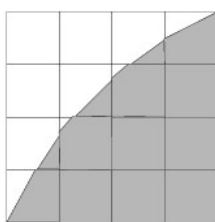
Една от най-важните характеристики на ANSYS CFX е използването на свързани решения, при което всички хидродинамични уравнения се решават като единична система. Свързаното решение е по-бързо от традиционните отделеното решаване и са необходими по-малко повторения, за се получи на решение за общите потоци.

Последната настройка на програмата е Run definition. Тук се задава началната позиция, от която да започне решението на задачата (началните условия, дефинирани в текущия анализ, или външна база данни, Initialization option), определя се дали задачата е самостоятелна или е продължение на прекъснат по рано изчислителен процес.

Използваният от ANSYS CFX метод на крайните обеми изисква преносните и дифузионните потоци през стените на контролните обеми да бъдат изчислени и балансирани (уравновесени) по отношение на източниците в самия обем. В случая на две фази се налага да бъде извършена специална (различна от тази в останалата област) интерполация на функциите на променливите в клетките (контролните обеми) при контакта на двете фази. Прилагат се три основни схеми, геометрично изобразени на фиг.2.11.



а) действителна форма на контакта



б) схема „геометрична реконструкция“



в) схема „донор-приемник“

Фиг.2.11 Схеми за изчисляване на границата между фазите

- Схема „геометрична реконструкция“

При този подход, когато клетката е изцяло запълнена с една или друга фаза, за получаване на потоците през границите на клетката се използват стандартните интерполационни схеми. Когато клетката е в близост до връзката между две фази, се използва схемата на геометрична реконструкция.

Схемата за геометрична реконструкция представя контакта между течната и газовата фази с помощта на частично непрекъснат линеен подход. В ANSYS тази схема е от най-точните и е приложима за общи неструктурирани схеми на омрежване. Предполага се, че границата между двете фази е линейна в рамките на всяка клетка, и тази линейна форма се използва за изчисляване на преноса на флуида през границите на клетката. Първата стъпка в тази схема е изчисляването

---

на позицията на линейния контакт спрямо центъра на всяка частично напълнена клетка, въз основа на информация за обемния дял на фазите и неговите производни в клетката. Втората стъпка е изчисляване на преносното количество през всяка граница с помощта на изчисления линейен контакт и информация за нормалната и тангенциална компоненти на скоростите върху границите. Третата стъпка е изчисляване на обемния дял на фазите във всяка клетка с помощта на баланса на потоците, изчислени по време на предишната стъпка.

- Схема „донор-приемник“

При този подход, когато клетките са в близост до границата между две фази, една клетка се определя като донор на количество флуид към друга съседна клетка, а съседната клетка се определя като приемник на същото количество флуид. Количеството флуид от една фаза, която може да премине през границата на клетките е ограничено от най-малко две стойности: напълнената част от обема на донорната клетка или свободния обем в клетката-приемник. Ориентацията на контакта също се използва за определяне на потоците през границите. Ориентацията на контакта е или хоризонтална или вертикална, в зависимост от посоката на градиента на обемната част на фазата в една клетка и на тази в съседната клетка, която споделя въпросната граница. В зависимост от ориентацията на границата, както и нейното движение, стойностите на потока се получават от чиста *upwind* интерполационна схема, от чиста *downwind* схема, или някаква комбинация от двете. Ако  $\varphi_f$  е обемният дял в клетката-приемник,  $\varphi_d$  - обемния дял в клетката-донор,  $\beta$  - коефициент на наклона и  $\nabla\varphi_d$  - градиента на обемния дял в клетката-донор, схемата може да се изрази със следната зависимост:

$$\varphi_f = \varphi_d + \beta \nabla\varphi_d \quad (2.1).$$

Коефициентът на наклона  $\beta$  може да бъде обобщен по следния начин:

$\beta = 0$  – *upwind* интерполационна схема от първи ред,

$\beta = 1$  – интерполационна схема от втори ред,

$0 < \beta < 1$  – смесена интерполационна схема.

Акцентът е върху математическото моделиране на потока на свободната повърхност на течността. За тази цел се използва методът „обем на частите“ (VOF), на базата на концепцията за фракционен обем на течността. В схемата на изчисление се въвежда параметърът на обемна фракция (VFRC) за определяне на степента на заетост на елемента с течност. Границата между празните (VFRC = 0) елементи и пълните елементи (VFRC = 1) определя полигон, преминаващ през елементите със стойност VFRC между единица и нула (фиг.2.12).

|   |     |   |   |   |
|---|-----|---|---|---|
| 1 | 0   | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.2 |   | 0 | 0 |
| 1 | 0.5 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 0.8 | 0 | 0 | 0 |
| 1 | 1   | 1 | 1 | 1 |

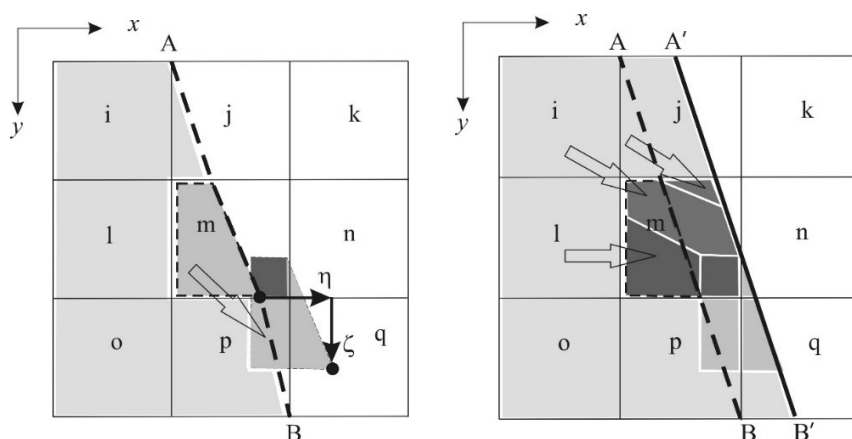
Фиг.2.12. Границата между празните и пълните елементи

Първата стъпка на изчислителната процедура е да се реши системата от уравнения на Навие-Стокс в 2D средата XOY и да се получат скоростите на полето  $V_x$  и  $V_y$ . Следващата стъпка е да се изчислят уравненията на Лагранж за преместванията  $\zeta$  (по X) и  $\eta$  (по Y), използвайки имажинерна времева стъпка  $\delta t$ :

$$\zeta = \int_t^{t+\delta t} V_x dt \quad (2.2),$$

$$\eta = \int_t^{t+\delta t} V_y dt \quad (2.3).$$

Чрез получените премествания могат да бъдат изчислени новите места на върховете на полигона (фиг.2.13).

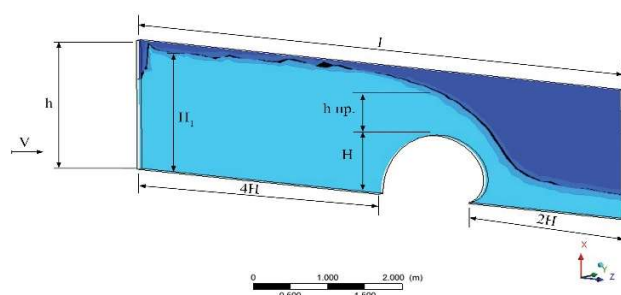


Фиг.2.13

### III. СИМУЛАЦИОНЕН МОДЕЛ НА ЗАТВОРЕНА ХИДРОТЕХНИЧЕСКА МЕМБРАННА КОНСТРУКЦИЯ

Математичният модел и подхода за реализиране на компютърна симулация са използвани за създаване на симулационен модел на затворена хидротехническа мембранна конструкция, закрепена по една образуваща и натоварена с разпределен товар, формиран от преминаващ над нея поток.

Тъй като задачата се решава по метода на крайните обеми, с получения сплайн се изгражда обем чрез задаване на минимална дебелина на мембраната. Геометричният модел на изследваната област с дължина  $l$  и височина  $h$  (фиг. 3.1), освен носещата мембрана, включва и част от водното течение (обикновено с дължина 4 пъти височината  $H$  на мембраната пред конструкцията и 2 пъти височината след конструкцията). Анализът на съществуващите изследвания показва, че тази дължина е достатъчна за елиминиране на влиянието на мембраната върху граничните условия. Височината на изследваната област се определя от височината на подприщване  $H_1$ , като обикновено над нея се добавят от 20cm до 40cm за оформяне на въздушен слой. Анализът на досегашните изследвания показва, че дебелината на този въздушен слой е достатъчна за да се елиминира влиянието на граничните условия, задавани на горната граница на областта, върху горната повърхност на водният поток.



Фиг.3.1. Геометричен модел

### 3.1. Симулационен модел в двумерна геометрична среда.

#### 3.1.1 ВЕРИФИКАЦИЯ НА МОДЕЛА

Преди използването на симулационният модел е необходимо да бъде извършена неговата верификация.

Верификацията е етап от създаването на модела, в който се дава отговор на въпроса „дали моделът е съставен по правилния начин“. На този етап с модела се правят редица пробни симулации на изследвания процес, целта на които е да проверят наличието на всички необходими части на модела и да потвърдят заложените в модела характеристики (използваните уравнения, методи за пресмятане, диферентна схема, итерационна схема).

За нуждите на настоящите изследвания е извършена верификация по отношение гъстотата на елементната мрежа и малки смущения в началните условия.

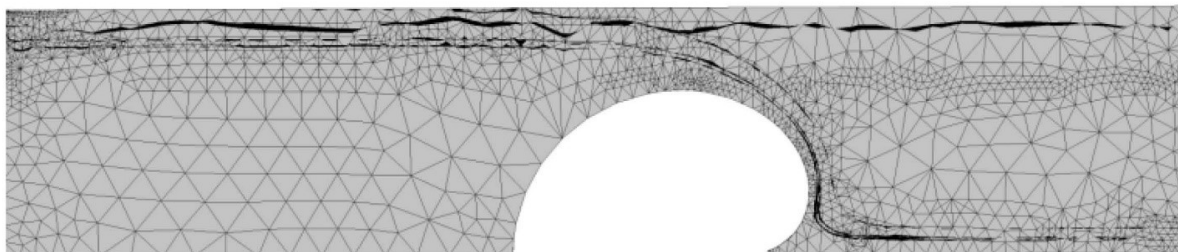
#### 3.1.2 ВЕРИФИКАЦИЯ ПО ОТНОШЕНИЕ ГЪСТОТАТА НА ЕЛЕМЕНТНАТА МРЕЖА

За целта на верификацията е дефинирана стандартна задача за определяне на преливния воден слой.

На фиг.3.2 е представена постановка на задачата. Изследваната област е приета с габаритни размери  $l=8\text{m}$  и  $h=2\text{m}$ . и описваме реалната картинка. След изчисление на координатите на хидротехническата мембранна конструкция тя е моделирана, чрез графичен софтуер (AutoCAD) и вмъкната в модела. Височината

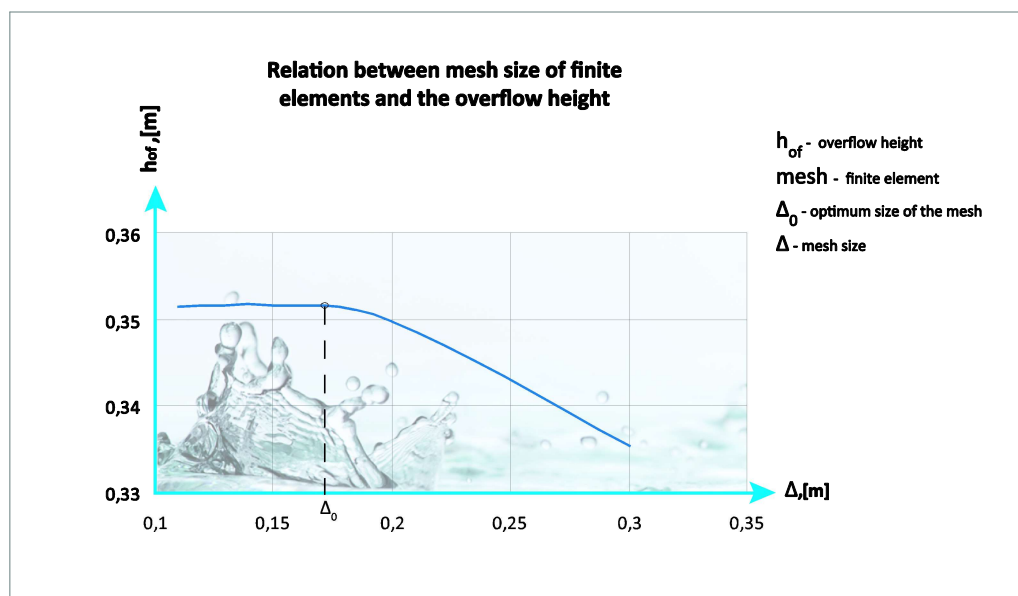
на конструкцията е приета  $H=1\text{m}$ . Моделирано е течението преди мембраната с дължина 4m, а след нея 2m.

Извършени са поредица от решения на задачата, съгласно гъстотата на обемните елементи с включена функция *Adobtion mesh size* с която се извършва сгъстяване на мрежата на границата между водната и въздушната среда фиг.3.2.



Фиг.3.2 Мрежа от крайни елементи

След поредица от решения на задачата са получени резултати, които са обединени и представени в следващата фиг.3.3.



Фиг. 3.3.

Връзка  
между  
размера на  
мрежата  
от крайни  
елементи и  
преливната  
височина.

От графиката се вижда, че са направени изчисления на задачата при големина на размерите на елементите от мрежата от 0,3m до 0,1m. Резултатите показват, че в интервала от 0,3m до 0,18m решението на задачата не е устойчиво, тъй като при промяна на размера на елементите на мрежата се получават големи отклонения в преливната височина. Следователно в този интервал на големина на мрежата решението е неточно.

В интервалът от 0,18 до 0,1 се вижда, че графиката минава в хоризонтален участък, което означава, че при промяна на мрежата от крайни елементи в този диапазон преливната височина почти не променя своята стойност. Тази устойчивост на резултатите показва, че в този интервал решението на задачата преминава от неустойчиво в устойчиво. На графиката е отбелязана оптималната големина на мрежата, която е достатъчна да се реши задачата с достатъчна степен

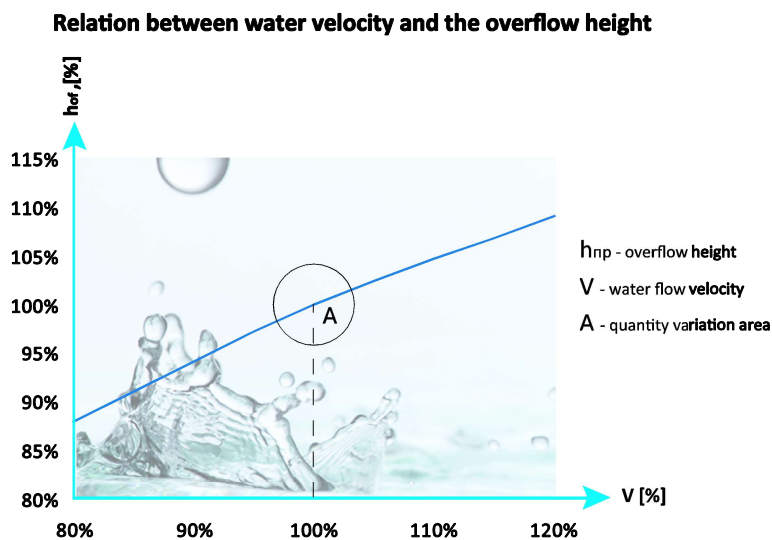
на достоверност. Сгъстяването на мрежата показва, че след тази точка решението запазва своята точност но се повишава броя от крайни елементи, от което пък следва удължаване на времето за решаване на задачата.

Разглеждайки казаното до тук може да заключим, че верификацията по отношение на размера на крайните елементи е важно и необходимо условие при решаване на задачи чрез симулационни модели.

### 3.1.3 ВЕРИФИКАЦИЯ ПО ОТНОШЕНИЕ НА МАЛКИ СМУЩЕНИЯ В НАЧАЛНИТЕ УСЛОВИЯ

За верификация на задачата по отношение на малките смущения в началните условия е взет същия модел, както в предходната точка с вече избраната оптимална мрежа от крайни елементи. Направени са редица решения, като за целите верификацията е променяно едно от входните условия на задачата - скоростта на водното течение.

След решаване на редица случаи с промяна на скоростта на водното течение са получени резултати, които са обобщени и представени на фиг. 3.4.



Фиг. 3.4. Връзка между скоростта на течението и преливната височина.

Разчитането на тази графика показва, че при постепенно покачване на началната скорост на течението преливната височина плавно расте. Тъй като не се забелязват скокове в графиката и хоризонтални премествания, може да се обобщи, че решението на задачата е вярно и моделът е верифициран.

Общото заключение от последните две точки показва, че верификацията на симулационните модели е необходима част за получаване на адекватни и точни решения в процеса на решаване на следващите задачи с модела.

---

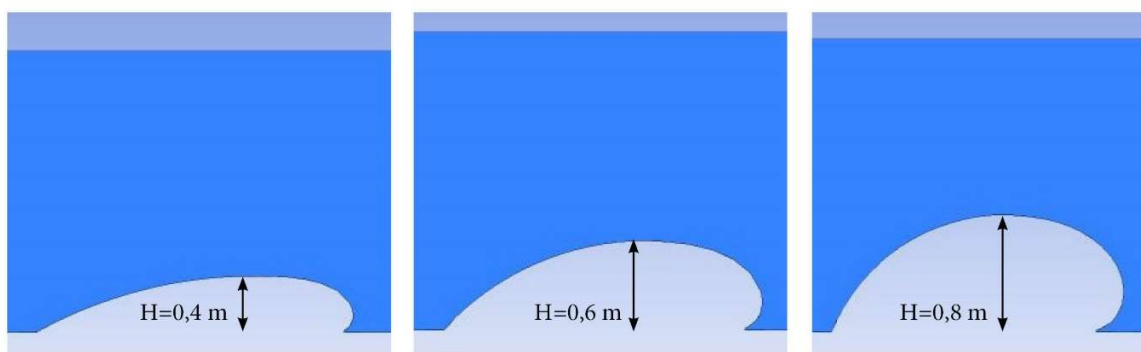
### **3.2. Определяне на натоварването при различни експлоатационни условия**

Основните измерителни методики за този тип конструкции отчитат три вида натоварване: основно статично натоварване, формирано от воден слой пред конструкцията, който може и да прелива; допълнително статично натоварване от повишаване на водния слой; динамично натоварване от удари с плаващи тела. Тази схема на натоварване отговаря на ситуация, при която водното ниво плавно се покачва до максималната си стойност, след което експлоатационните условия остават относително постоянни. През последните години в редица райони на България се наблюдава една друга картина при наводнение на териториите – прииждане на водата във вид на висока вълна. При това, водното ниво от нула достига максималната си стойност за няколко секунди, което най-вероятно се дължи на обезлесяване на водосборната област на реките и на аварии на неподдържаните съоръжения на малките язовири с местно значение. Това налага създаване на изчислителна методика, която да отразява новите експлоатационни условия на мобилните прегради за защита на териториите от наводнение. В настоящата работа е представен анализ на механичното поведение на водонапълняема хидротехническа мембрана, подложена на импулсно натоварване от воден поток. Анализът е проведен с помощта на системата ANSYS Workbench, при използване на модула CFX за флуидния анализ и Transient Static за деформационния. Представени са резултати за движението на потока, формираната схема на натоварване и деформационното поведение на конструкцията при постоянна височина на подприщване и различна стойност на вътрешното налягане.

#### **3.1.4 ОПРЕДЕЛЯНЕ НА НАТОВАРВАНЕТО ВЪРХУ ЗАТВОРЕНА ХИДРОТЕХНИЧЕСКА МЕМБРАНА ВЪВ ВОДНО ТЕЧЕНИЕ**

##### ***3.1.4.1 НАТОВАРВАНЕ при различни височини на мембранната конструкция***

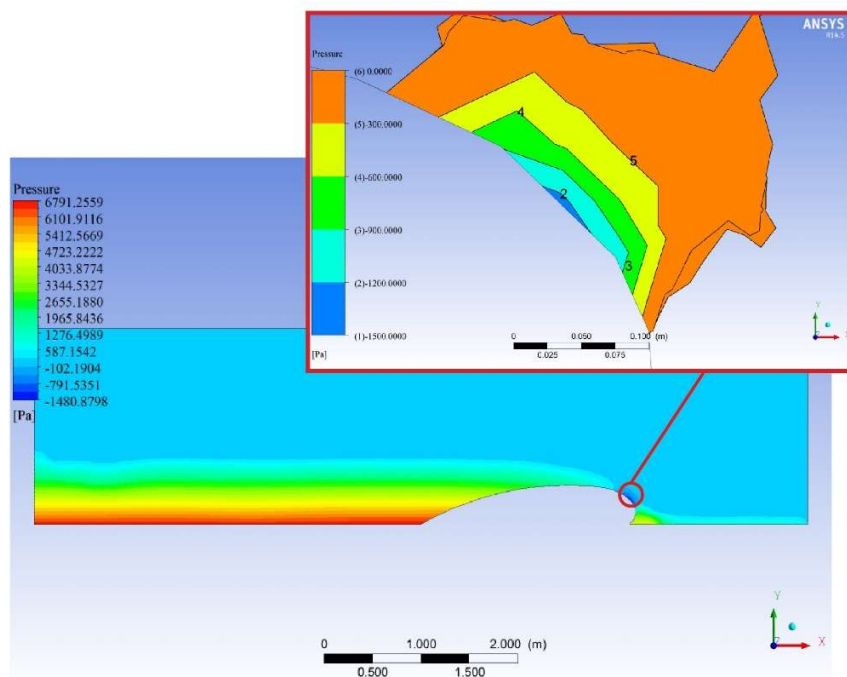
Една от основните характеристики на закрепените хидротехнически мембранни конструкции (за разлика от свободно лежащите), е че работят с преливащ воден слой. Освен хидростатичното натоварване, формирано от собственото тегло на водата, преливащият воден слой формира и скоростен напор. Тъй като формата на мембраната е твърде различна от формата на стандартните корави преливници, скоростния напор трудно може да бъде определен по някоя от възприетите в хидротехниката емпирични формули. Това налага в този случай да бъде проведена компютърна симулация на процеса на преливане при различни форми на мембраната. За целта са създадени три типови форми за височина на конструкцията ( $H=0.4\text{m}$ ,  $H=0.6\text{m}$  и  $H=0.8\text{m}$ , фиг. 3.5).



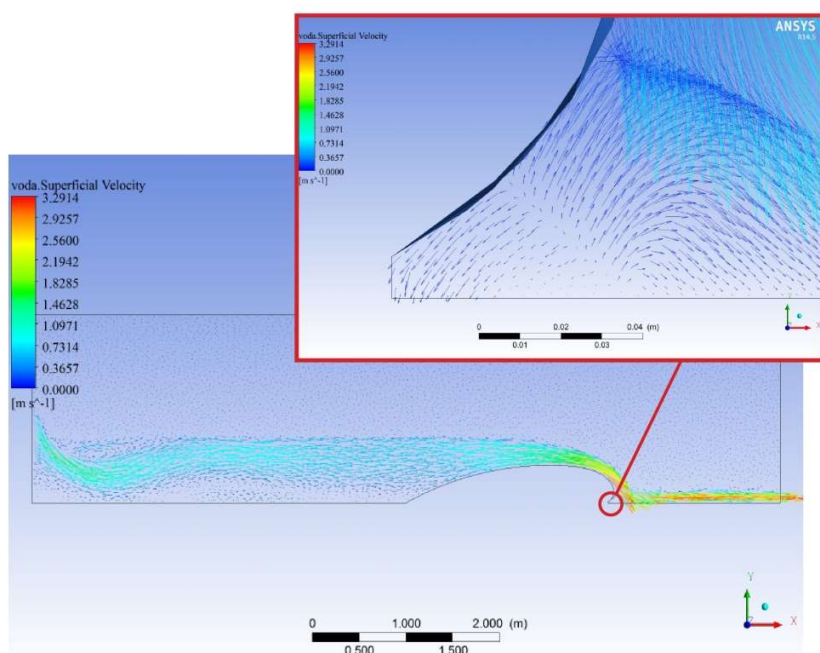
Фиг.3.5. Напречен профил на водонапълняемата мембрана при различни височини.

Задачата е решена като на входа е зададено хидростатично налягане отговарящо на водно течение с дълбочина 1,4m и постоянна скорост  $v=5\text{m/s}$ .

При критерий за сходимост на решението - средно квадратично отклонение в резултатите на две съседни итерации  $1 \times 10^{-4}$ , са получени разпределения на налягането (фиг.3.6) и скоростите (фиг.3.7) в изследваната област.



Фиг.3.6.Разпределение на налягането над хидротехническа мембранна конструкция при височина  $H=0,4\text{m}$



Фиг.3.7.Скоростно поле над хидротехническа мембранна конструкция при височина  $H=0,4m$

Особено внимание трябва да се отдели на зоните с отрицателно налягане, показани на фиг.3.6. На фигурите се вижда, че при задната част на конструкцията се получава подналягане, което расте с повишаването на височината на конструкцията. Това подналягане води до вакуум върху повърхността на мембраната, а той от своя страна до неблагоприятни вибрации и трептения на хидротехническата конструкция. В практиката се използват различни техники за премахване на опънните напрежения върху хидротехническата мембранна конструкция, следователно и за премахване на вибрациите и трептенията.

Някои от основните техники са:

- Да се залепи въже от край до край по дължина на конструкцията, като местоположението се определя така, че да е преди зоната на вакуум, за да се получи отлепване на водната струя в зона на образуване на вакуум и той да се предотврати.
- Отделни каучукови елементи се залепят върху мембранната конструкция, непосредствено преди зоната с отрицателно налягане. Функцията им е да разбият потока на отделни струи и да редуцират скоростта на течението.

Първият тип се използва предимно в Русия, а втория се използва в САЩ и други западни държави.

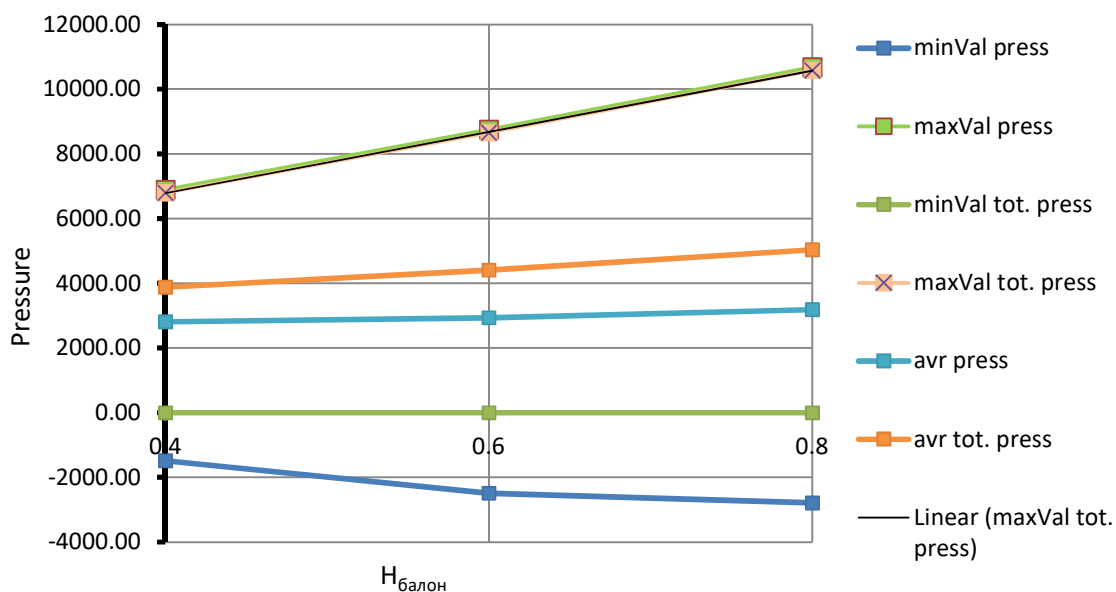
При скоростните полета на течението се наблюдава поведение, подобно на това при налягането (фиг.3.7). В долната задна част на мембранната конструкция се наблюдава завихряне на течението, което също води до образуването на

вибрации в конструкцията. Вижда се, че при увеличаване на размера на балона, завихрящата сила расте. Основните техники за справяне с този проблем се препокриват до голяма степен с разгледаните по горе техники за отлепяне и разбиване на водната струя над преливния ръб.

Получените резултати за хидростатичното и пълното налягане (хидростатичното налягане + скоростния напор,  $P = P_{hs} + \alpha \cdot \rho \cdot v^2 / 2$ ) върху мембранната конструкция са представени на фиг. 3.8 и са обобщени графично на фиг. 3.9.

| $H_{\text{балон}}$ | Pressure      |            |               | Total Pressure |            |               |
|--------------------|---------------|------------|---------------|----------------|------------|---------------|
|                    | <i>minVal</i> | <i>avr</i> | <i>maxVal</i> | <i>minVal</i>  | <i>avr</i> | <i>maxVal</i> |
| 0,4                | -1480,88      | 2808,91    | 6791,26       | -1,65          | 3879,69    | 6792,90       |
| 0,6                | -2487,62      | 2938,64    | 8654,28       | -1,17          | 4403,27    | 8654,29       |
| 0,8                | -2781,63      | 3179,81    | 10580,20      | -0,50          | 5035,97    | 10580,20      |

Фиг.3.8. Резултати от хидростатичното и пълното налягане върху хидротехническа мембранна конструкция с различна височина.

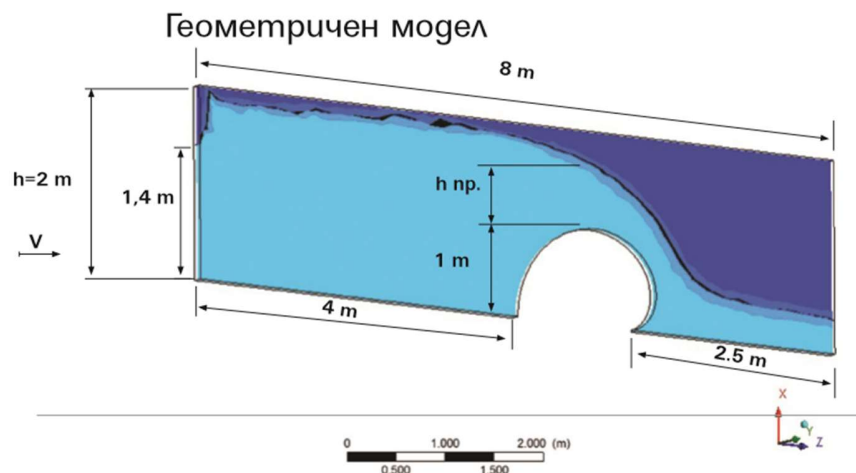


Фиг.3.9..Графично представяне на резултатите при различни височини на конструкцията

### 3.1.4.2 Натоварване при различни скорости на течението

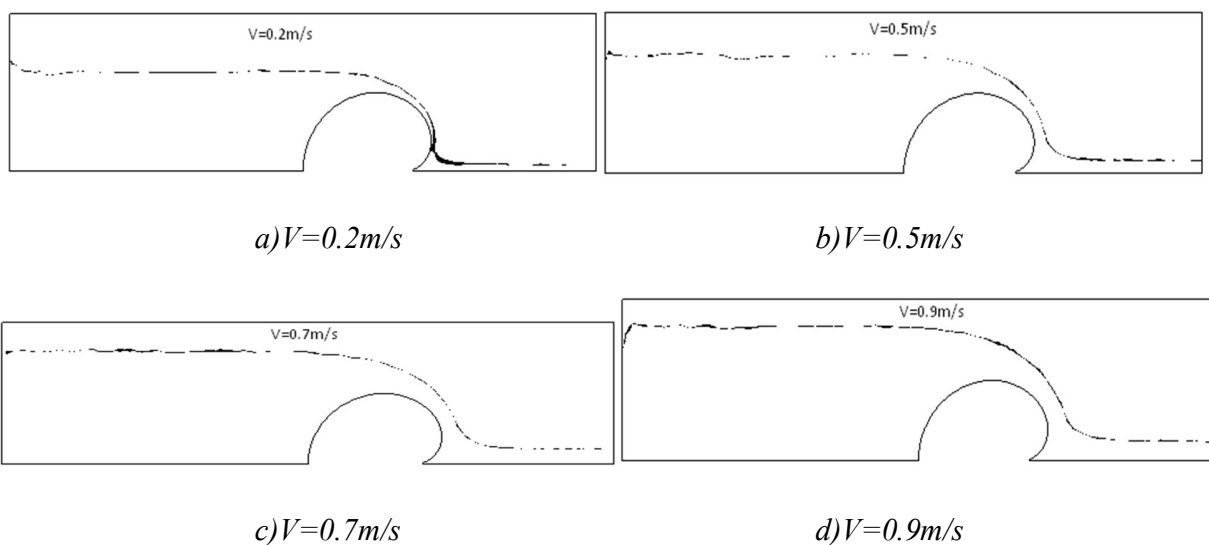
Съществена част от натоварването върху хидротехническите мембранни конструкции се формира от преливния воден слой. В настоящата точка са разгледани различни скорости на движение при стационарно течение.

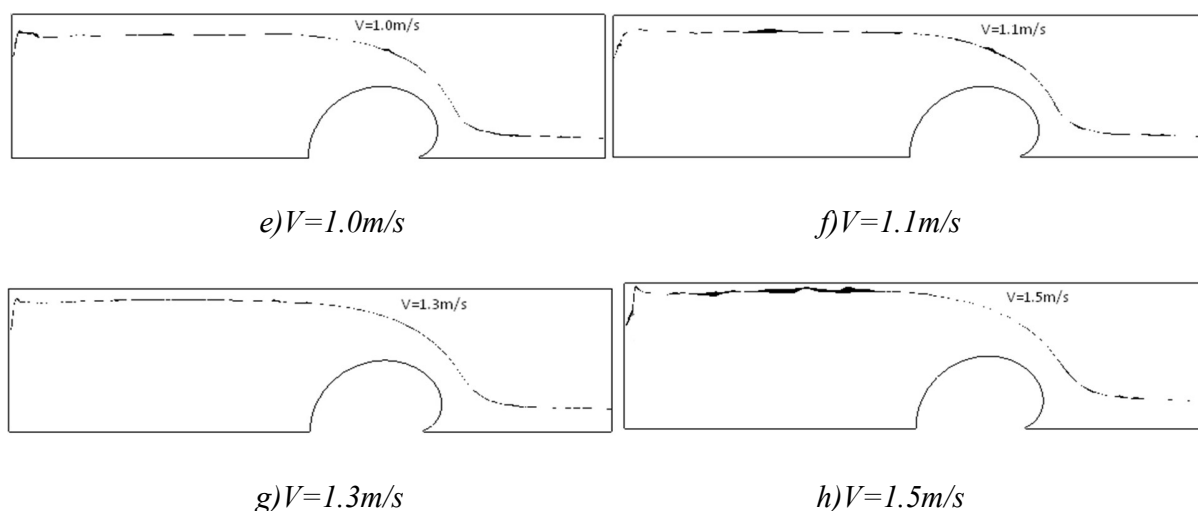
За реализиране на изследването е разгледана 2D задача на стационарно течение над хидротехническа мембранна конструкция (фиг.3.10) с фиксирана височина.



Фиг.3.10. Геометричен модел на стационарно течение над хидротехническа мембранна конструкция

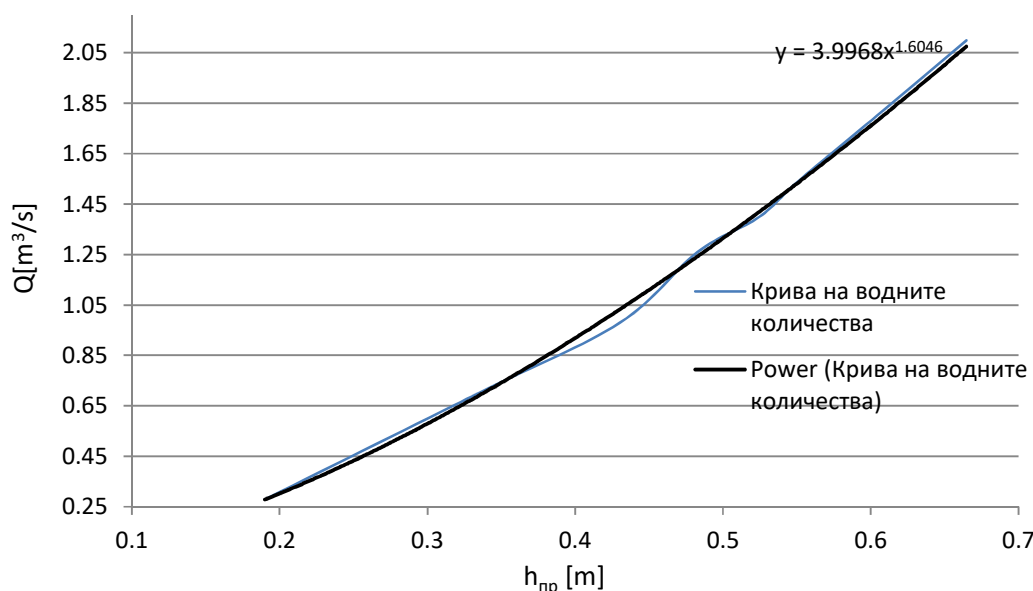
Прието е изменение на скоростта на течението в границите от  $0.2\text{ m/s}$  до  $1.5\text{ m/s}$  (фиг. 3.11).





Фиг.3.11. Промяна на преливния воден слой на хидротехническа мембранна конструкция при течение с различни скорости

От направените изчисления за всеки от анализиранияте случаи са отчетени преминаващото водно количество вода и преливната височина над мембранната конструкция. С получените параметри е построена ключова крива на отношението между преливното водно количество и преливната височина над мембранната конструкция (фиг 3.12) и е изведено уравнение на ключовата крива (Power).



Фиг.3.12. Ключова крива на водните количества

След получаване на графичните резултати може да се приеме, че преливното водно количество е в пряка връзка с преливната височина и получените решения за ключовата крива да се ползват и за други задачи. Границите могат да бъдат

---

удължени, чрез задаване на по-голям диапазон на преливното водно количество във вече полученото уравнение на ключовата крива.

От разгледаните две точки 3.2.1.1 и 3.2.1.2 може да се направят обобщени заключения:

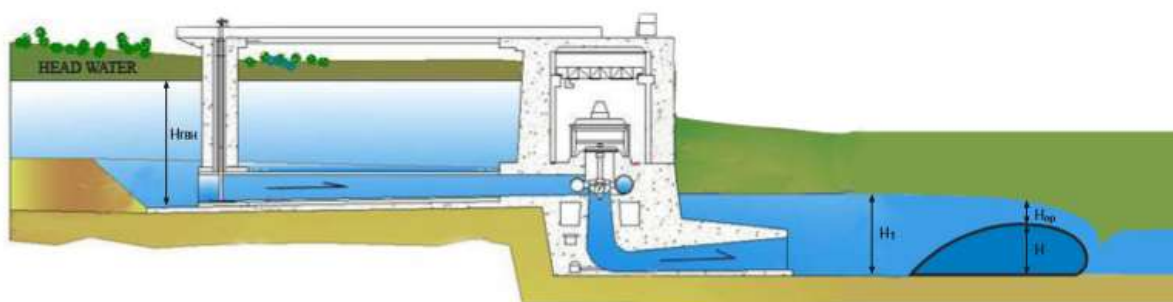
- Промяната на височината на затворена мембранна конструкция, подприщваща водно течение със свободна повърхност, води до промяна на натоварването върху носещата мембрана с различна тенденция за различните видове натоварвания. От резултатите, представени на графика 3.3, може да се направи заключение, че при увеличаване на височината на конструкцията, минималната стойност на натоварването ( $\min Val\ press$ ) намалява, като след 0.5 м добива отрицателна стойност, която може да доведе до вибрации. При анализа на максималните стойности на натоварването ( $\max Val\ press$ ) се наблюдава тенденция на тяхното значително увеличаване с увеличаване на височината, което трябва да бъде отчетено при избор на материал.

- Необходимо е да се проверяват хидротехническите конструкции за завихряния в долното водно течение в максимална близост до конструкцията и отрицателни напрежения в задната част на мембраната. При наличие на такива явления е необходимо да се извършат мерки за предпазване на конструкцията от вибрации и трептения.

- При разглеждане на други хидротехнически задачи може да използваме ключовата крива на водните количества и преливната височина, получена от компютърна симулация, с цел намаляване обема на работата на терен.

#### **3.1.4.3 Механично поведение на водонапълняема хидротехническа мембрана при спрегнати височина и дебит**

Едно от основните предназначения на водонапълняемите хидротехнически мембрани е да служи като преграда при подприщване на водни течения. При традиционните, добре изследвани случаи, с мембраната се поддържа постоянно горно водно ниво при променлив дебит на течението или променливо горно водно ниво при постоянен дебит. При тези решения се отчита съществуващата зависимост между дебита на течението и преливната височина. В практиката съществуват и случаи, когато се налага да бъде поддържана постоянна разлика между горно ( $H_{ГВН}$ , фиг.3.13) и долно водно ниво ( $H_1$ ) при променлив дебит. Така дебитът на течението попада в зависимост от общата височина на конструкцията ( $H_1 = H + H_{пр}$ ), която от своя страна, посредством преливната височина ( $H_{пр}$ ), зависи от дебита.



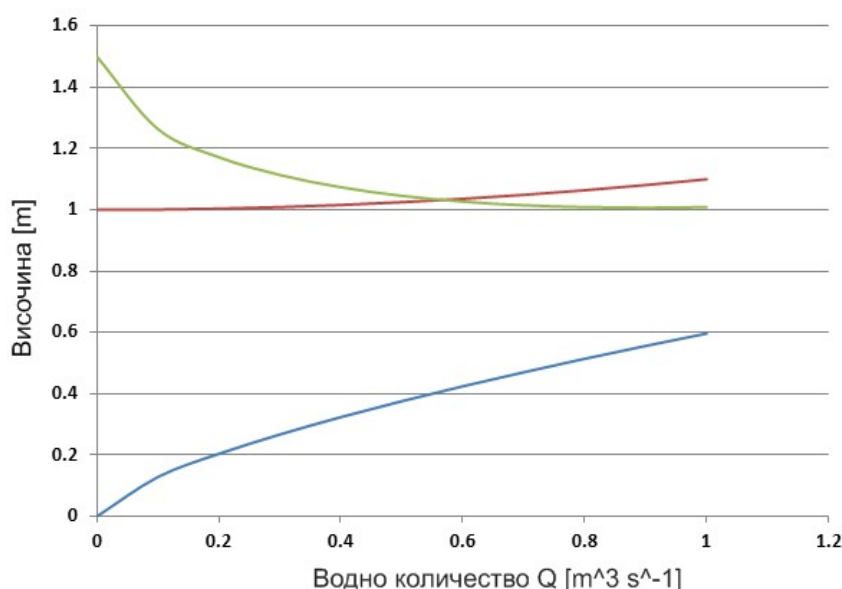
Фиг.3.13 Връзка между водните нива при водно електрическа централа (ВЕЦ)

За схемата на една малка ВЕЦ, представена на фиг.3.13, експлоатационните условия включват водното количество  $Q$ , преминаващо през турбината, ключовата крива за горно водно ниво (ГВН) и разликата  $\Delta H$  между ГВН и долно водно ниво (ДВН= $H_1$ , фиг. 3.13). Търси се вътрешното налягане  $H_0$ , при което се формира желаната  $\Delta H = H_{ГВН} - H_1$ . Решението се реализира в средата на програмата MAPLE посредством програмен код, който е изведен от изчислителната схема, използвана в постановката от предната точка 3.2.1.2 (фиг.3.10). Приета е промяната във водното количество да е в диапазона от 0 до  $1 \text{ m}^3/\text{s}$ .

При традиционните решения с ключова крива за ДВН, при изискване за постоянно  $H$  линиите на  $H_1$  и  $H_{пр}$  са успоредни. При изискване за постоянно ДВН линията на  $H_1$  е хоризонтална. Показаните на фиг 3.14 резултати са за изменението на вътрешното налягане  $H_0$  в зависимост от водното количество  $Q$  и преливна височина изчислена:

$$H_{пр} = \left( \frac{Q}{m.b.\sqrt{2.g}} \right)^{2/3} \quad (3.1)$$

и височина на подприщване  $H_1 = 1 + 0,1.Q^2$ .



Фиг.3.14. Връзка между преливната височина и вътрешното налягане

Получената крива на изменение (фиг.3.14) може да бъде апроксимирана с полином от вида

$$H_0 = \sum_{i=0}^n A_i \cdot Q^2 \quad (3.2)$$

#### **3.1.4.4 Движението на флуиден поток над преливаема хидротехническа мембранна конструкция в трапецовиден канал**

В тази точка взаимодействието между флуидния поток и хидротехническата мембранна конструкция е изследвано въз основа на компютърната симулация в средата ANSYS Workbench. Мембранната конструкция се състои от прегъната на две гумена мембрана, фиксирана върху стените и дъното на трапецовиден канал. Под въздействието на вътрешното хидростатично налягане и гъвкавостта на материала конструкцията придобива цилиндрична форма. Дву-дименсионалният модел на напречното сечение на преградата в равнина OXY е генериран в средата на MAPLE по процедурата в приложение 1, въз основа на равновесие на безкрайно малък елемент на мембраната по свободната повърхност на потока:

$$x = \left( \frac{2T}{H_0} - H_0 \right) \cdot F(k, \psi) + H_0 \cdot E(k, \psi) \quad (3.3)$$

$$y = H_0 - \sqrt{H_0^2 + 2T \cdot (\cos \varphi - 1)} \quad (3.4)$$

където

$H_0$  е вътрешното налягане в мембраната,

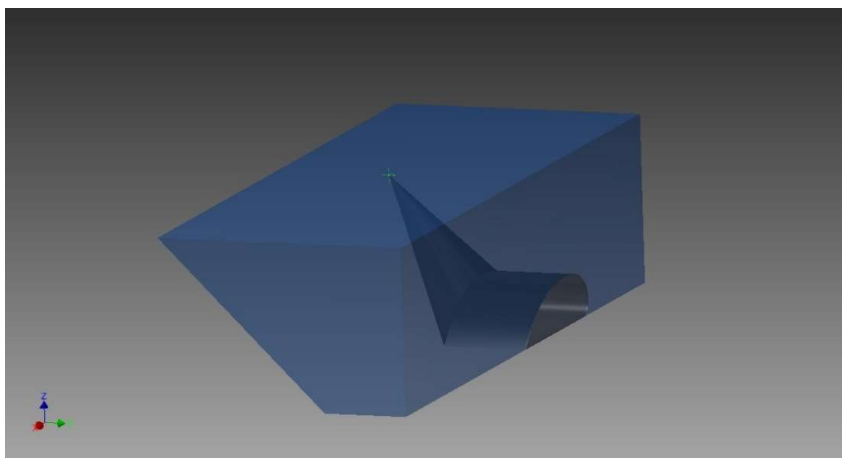
$T$  е опънната сила в мембраната,

$\varphi$  е ъгъла между тангентата на водният откос и дъното на канала,

$F$  и  $E$  са елипсовидните интегрални от първи и втори ред, с  $k = \sqrt{4T/H_0^2}$  и  $\psi = 0,5\varphi$ .

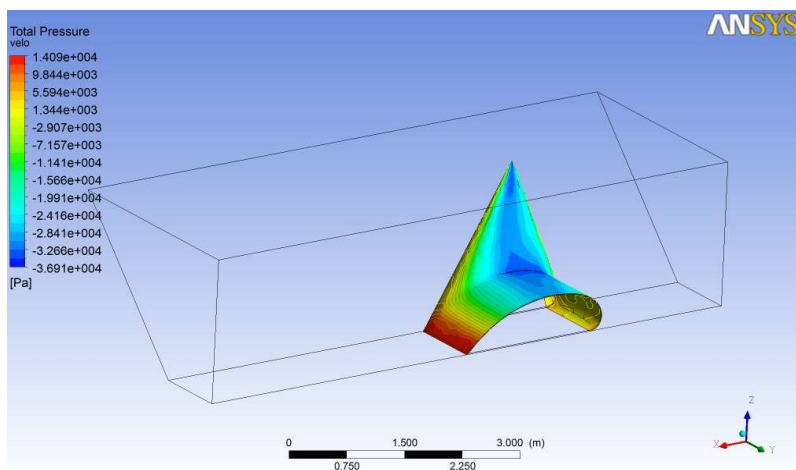
3D моделът на мембраната е реализиран чрез продуктът AutoCAD (фиг 3.15).

Течността е хомогенна, плътността на вода е между 998 кг/м<sup>3</sup> и 1150 кг/м<sup>3</sup> и динамичен вискозитет между 0.001 Pa.s и 0.01 Pa.s.

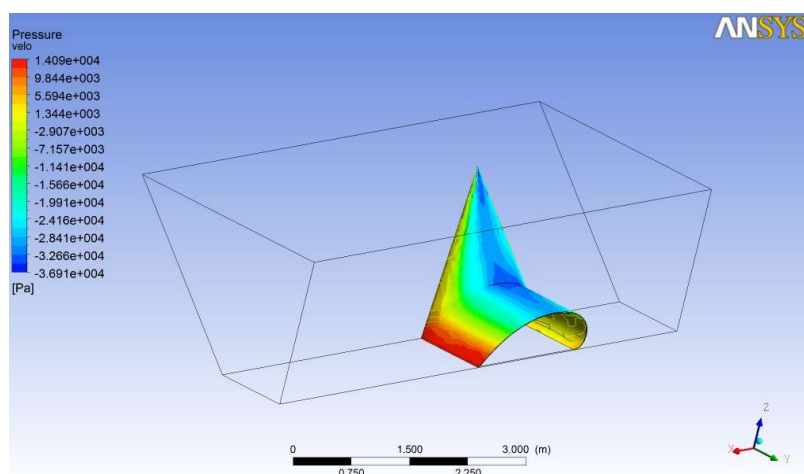


Фиг. 3.15. 3D модел на хидротехническа мембранна конструкция в трапецовиден канал

Анализът на поведението на преливния поток над яза се основава на уравненията на Навие-Стокс в познатата им форма, решени по метода на крайните обеми чрез софтуера CFX в среда на ANSYS Workbench. Потокът е с ниска турбулентност, моделиран чрез стандартен модел k-epsilon. Граничните условия за скоростта на входа и налягането на изхода са определени като начални гранични състояния (гранични условия на Дирихле). Проверката на модела се извършва въз основа на два критерия: малки вариации на входните променливи трябва да бъдат причина за малки промени в резултатите; промяна на размера на мрежата не трябва да предизвиква промени в резултатите. Останалите характеристики на решението (тип на диференчната схема, модел за пренос и стъпка на итерационната процедура) са оставени по подразбиране за системата. След извършване на поредица от изчисления на модела с промяна на плътността и динамичният вискозитет са получени резултати за налягането, действащо върху мембранната конструкция (фиг.3.16), и за скоростта на флуида при преливане над конструкцията (фиг.3.17).

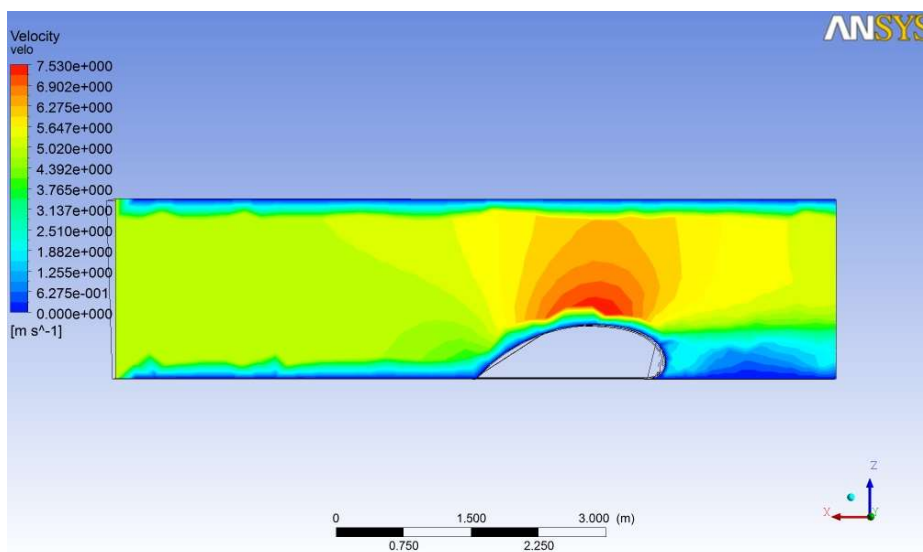


*а) пълно налягане*

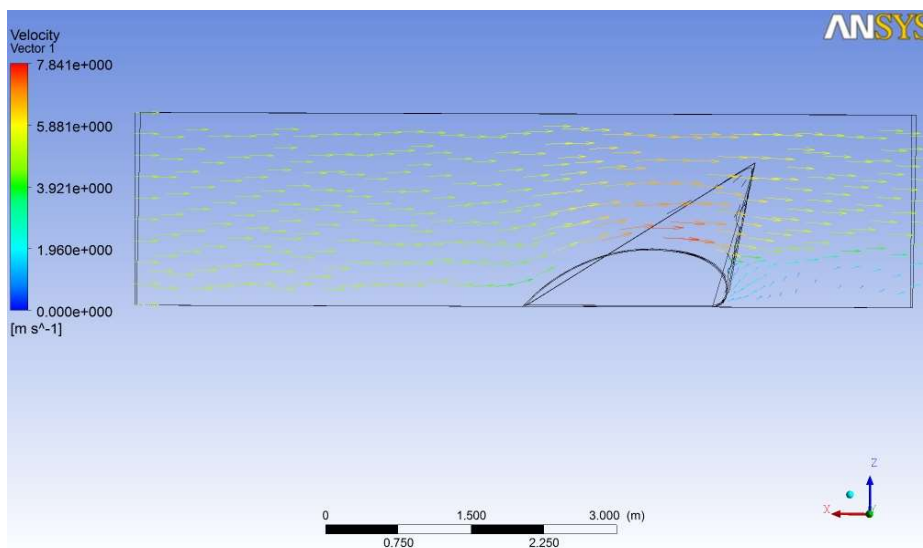


*б) нормално налягане*

*фиг. 3.16. Нормалното и пълното налягане върху хидротехническа мембранна конструкция в трапецовиден канал*



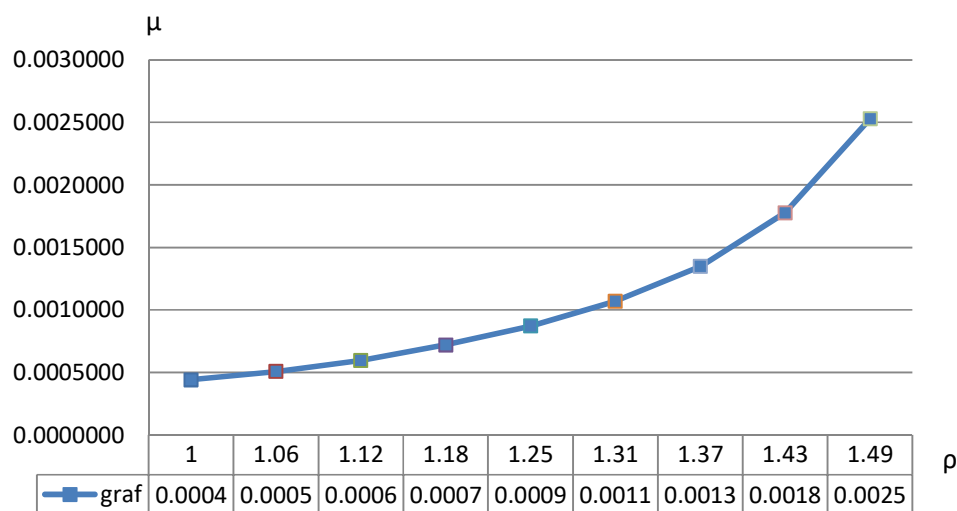
а) изолинии на  
скоростта



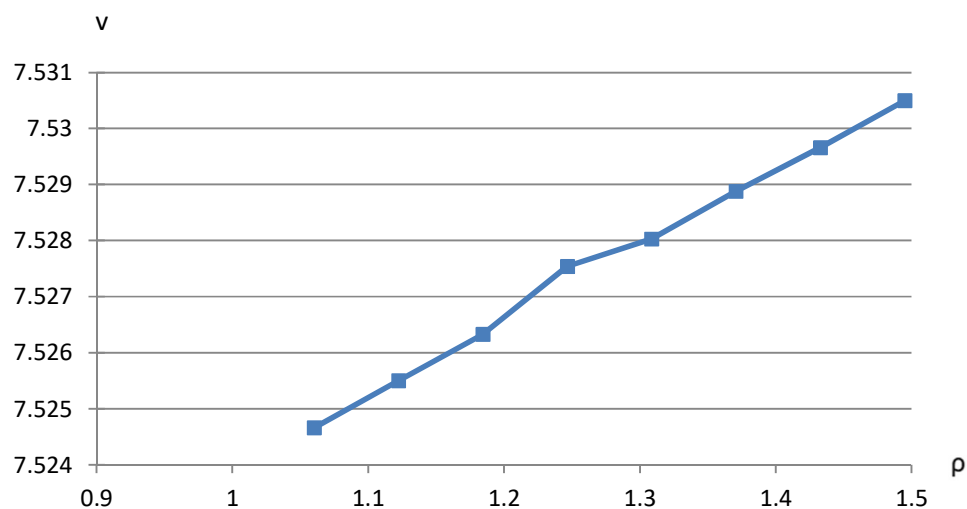
б) вектор на  
скоростта

фиг. 3.17. Скоростта на флуида

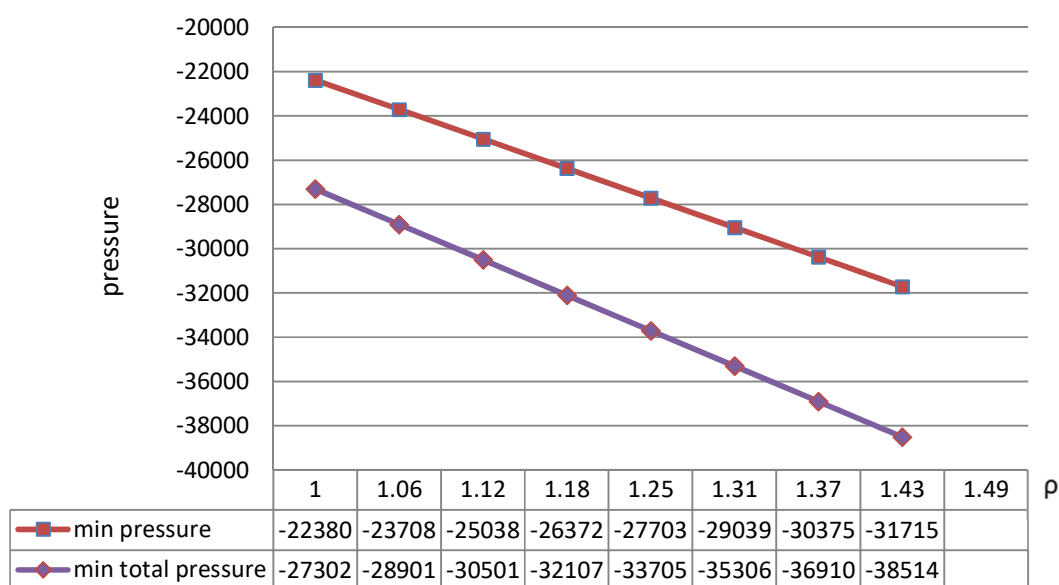
Създаденият модел е използван за изследване на връзката между налягане, скорост на потока, вискозитет и плътност на флуида в процеса на преливане. Резултатите са представени в следващите фигури (фиг 3.18-3.21).



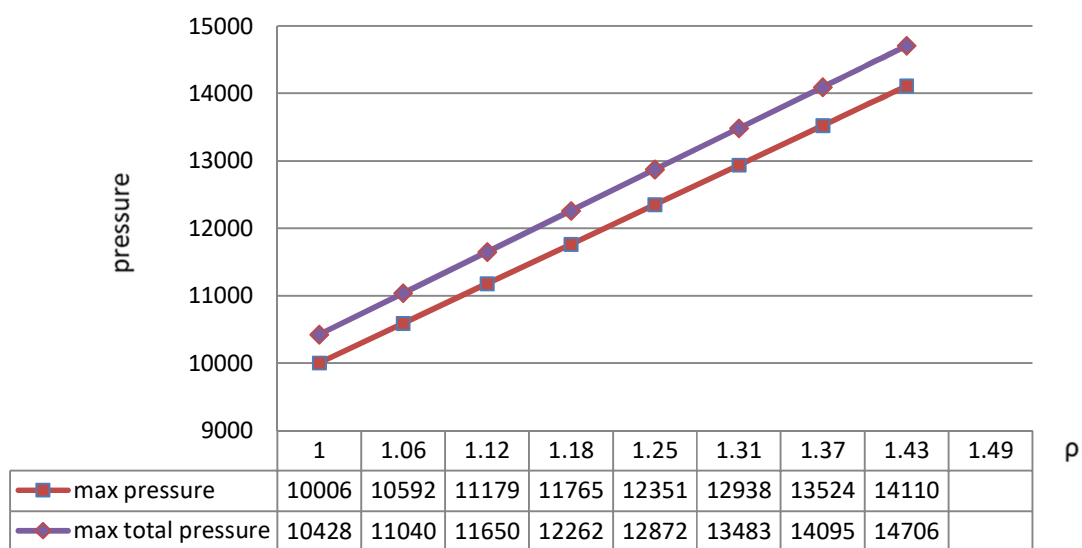
Фиг.3.18. Връзка между вискозитета и плътността на флуида. (проф. Ив. Иванов - „Методически указания за хидравлични изчисления на напорни пулпопроводи, транспортиращи отпадъци от ТЕЦ, работещ на твърдо гориво“.)



Фиг.3.19. Връзка между скоростта и плътността на флуида.



Фиг.3.20. Връзка между минималното налягане и плътността на флуида.



Фиг.3.21. Връзка между максималното налягане и плътността на флуида.

От получените резултати се вижда, че при увеличаване на мътността и вискозитета на течността, правопрпорционално нараства скоростта на потока над балона. От там нарастват правопрпорционално и напреженията в носещата мембранна. Разликите на скоростта и напреженията са доста незначителни при тези размери и физични характеристики на симулационния модел и се предполага, че няма да укажат голямо влияние върху хидравличните и статичните оразмерявания на конструкцията, от където следва, че могат да се пренебрегнат. Но при оразмеряване на големи съоръжения е необходимо да се отчита наличието

---

на възможност за повишаване на мътността в канала и да се направи проверка за тези случаи.

### **3.1.5 ФОРМИРАНЕ НА НАТОВАРВАНЕТО ВЪРХУ ВОДОНАПЪЛНЯЕМА ХИДРОТЕХНИЧЕСКА МЕМБРАНА ПРИ ИМПУЛСНО ДЕЙСТВИЕ НА ПРИИЖДАЩО ВОДНО ТЕЧЕНИЕ**

Изчислителната методика в предните точки отчита два вида натоварване: основно статично натоварване, формирано от воден слой пред конструкцията, който може и да прелива, и допълнително статично натоварване от повишаване на водния слой. Тази схема на натоварване отговаря на ситуация, при която водното ниво плавно се покачва до максималната си стойност, след което експлоатационните условия остават относително постоянни. В настоящата точка сме разгледали натоварване на хидротехническа мембранна конструкция от импулсен товар (висока вълна).

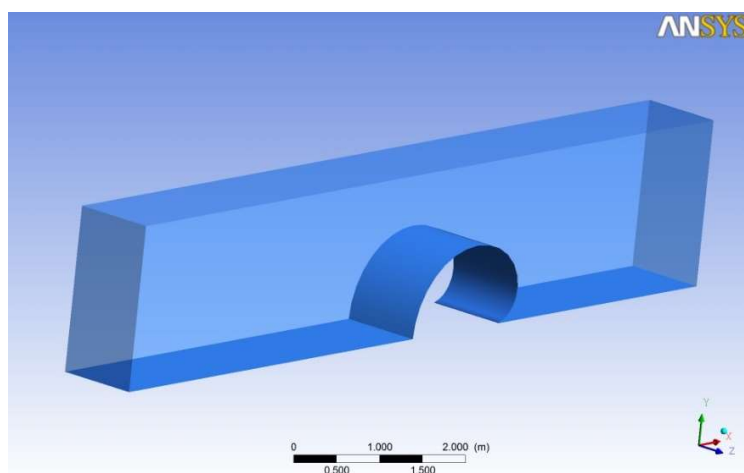
По своето действие високата вълна, формирана при дъжд в обезлесени водосборни области и при аварии на язовирни съоръжения, може да бъде оприличена на морските вълни, но за разлика от тях имат еднократно действие. Освен това профилът на вълната се определя от различни условия, сред които вятърът играе незначителна роля.

#### **3.1.5.1 Импулсен товар от полегата вълна**

В настоящата точка е представен анализ на механичното поведение на водонапълняема хидротехническа мембрана, подложена на импулсно натоварване от воден поток във формата на полегата вълна. Представени са резултати за движението на потока, формираната схема на натоварване и деформационното поведение на конструкцията при различна стойност на вътрешното налягане при постоянна височина на подприщване.

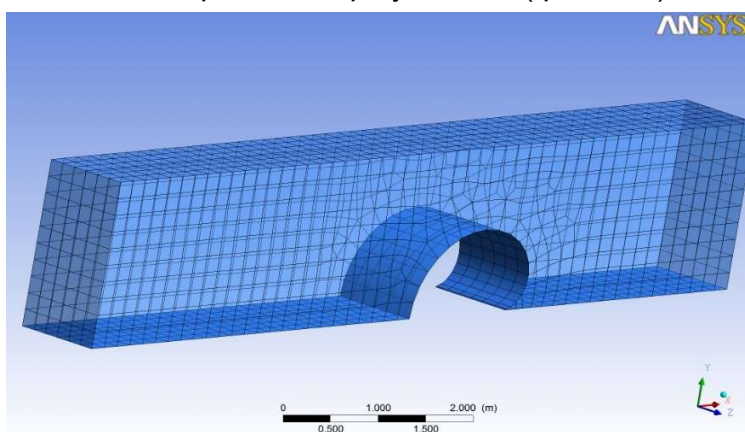
Натоварването върху носещата мембрана е определено посредством компютърна симулация на течението. Разглежда се 1 м от дължината на съоръжението в неговата централна цилиндрична част (фиг. 3.22). На входа се задава водно течение с височина, отговаряща на дълбочината на ретензираното водно течение и скорост, отговаряща на скоростта при съответния хидравличен наклон. Грапавостта на дъното е зададено по модела на пясъчните зърна в порядък 0,5 см. При симулацията основната равнина се запазва хоризонтална, а ъгълът на наклона  $\alpha$  се моделира посредством задаване на две компоненти на земното ускорение  $g$ :

$$g_x = g \cdot \sin(\alpha); \quad g_y = g \cdot \cos(\alpha).$$



Фиг. 3.22. Геометричен модел

Компютърната симулация е проведена по процедурата описана в точка 3.1.2.4 с елементна мрежа тип “polyhedron” (фиг.3.23).

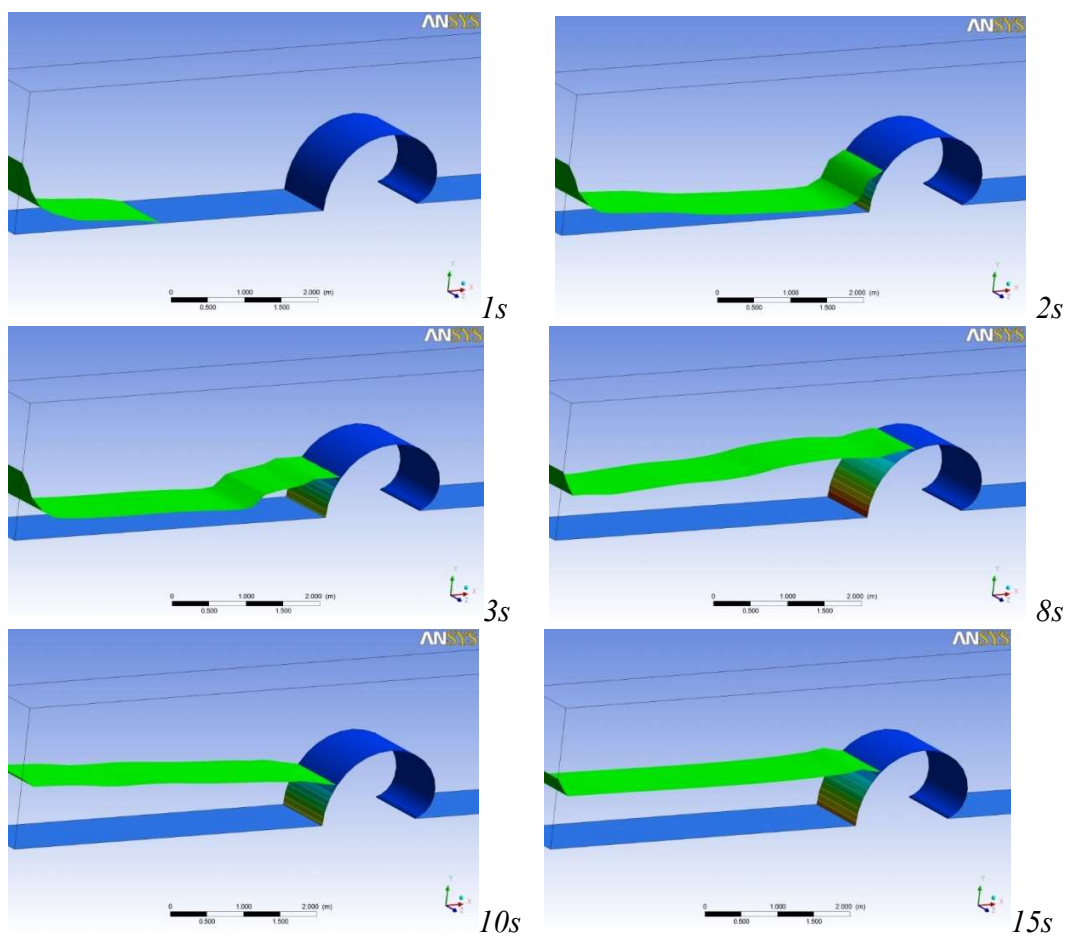


Фиг. 3.23. Елементна мрежа

Времето за наблюдение е 15s, като стъпката на итеративната процедура е 0.1s, с пет итерации за всяка стъпка и запис на резултатите на всяка секунда. По предната повърхност на мембраната, където се очаква контакт с водното течение, са създадени точки за наблюдение през 10 cm по височина в средата на разглежданата област. Наблюдаваната величина е пълното налягане  $p_{tot}$  на водния поток, формирано от хидростатичното налягане  $p_{stat}$  и хидродинамичния напор по уравнението на Бернули:

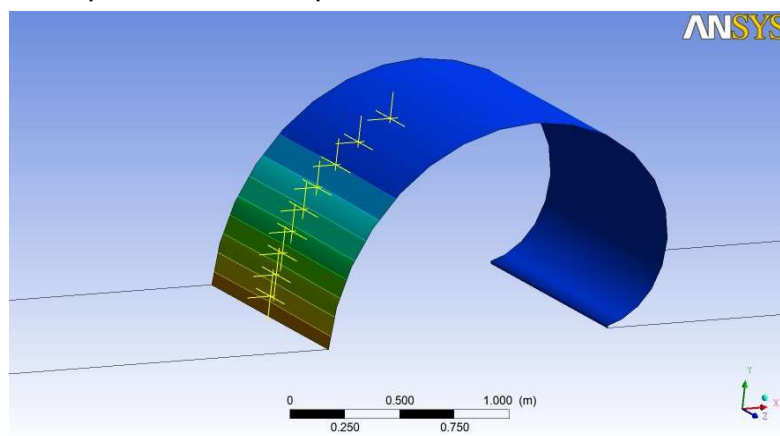
$$p_{tot} = p_{stat} + 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (3.5)$$

При извършените пресмятания са записани резултати на всяка 10-та стъпка (на всяка кръгла секунда). За създаване на представа за процеса на формиране на натоварването е създадена изо-повърхнина по отношение на налягането, която разделя водния и въздушния обем (водна повърхност). На фиг.3.24 е показана формата на тази повърхност (оцветена в зелено) за различни моменти от процеса на прииждане на водното течение.



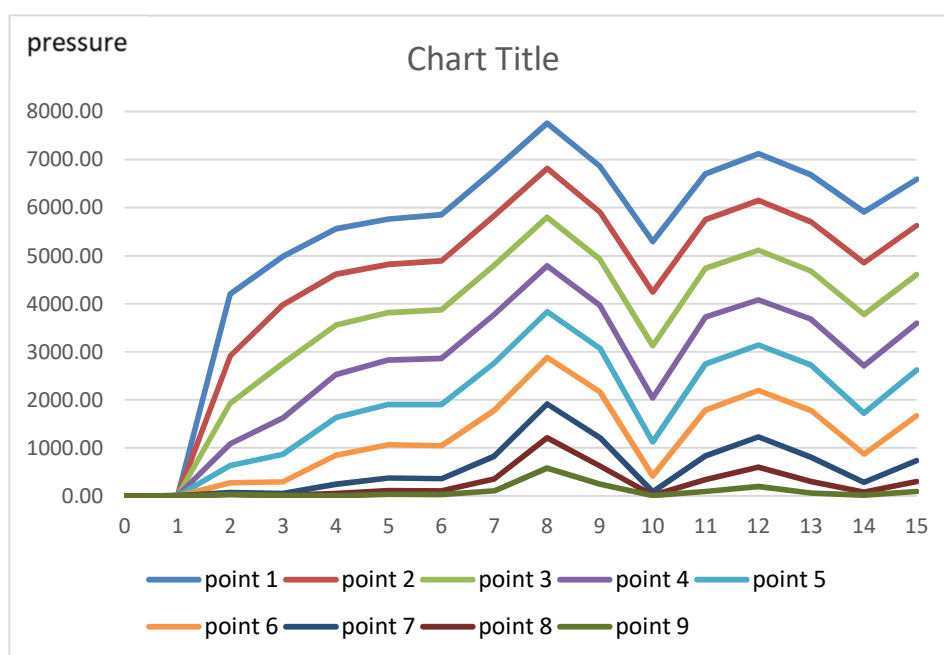
Фиг. 3.24. Форма на приливната вълна

Въздействието на водния поток върху мембраната може да бъде наблюдавано посредством създаване на цветни контури за областите с еднакви стойности за съответната величина. На фиг.3.25 е показан такъв контур за пълното налягане на водния поток по уравнението на Бернули, получен за еднакво налягане върху контактната повърхност на мембраната.



Фиг. 3.25. Натоварване от външното налягане върху мембранната конструкция

За получаване на конкретни стойности за налягането са дефинирани 9 наблюдателни точки (жълтите кръстчета на фиг.3.25), в които при всяка изчислителна стъпка по времето се записват резултати за наблюдаваните величини. На фиг. 3.26 са представени графично резултатите за пълното налягане в наблюдателните точки, получени в процеса на прииждане на водното течение.



Фиг.3.26. Резултати за пълното налягане в наблюдателните точки

Изводи: При използването на водонапълняемите хидротехнически мембранни конструкции за защита от наводнения и преграждане на водни течения, върху тях се формира динамично натоварване от прииждане на водата във вид на висока вълна. Анализ на натоварването в различните точки от контактната повърхност на мембраната може да бъде направен с помощта на програмната система ANSYS Workbench с използване на модул CFX. Създадената методика за изследване позволява да бъде получена връзка между параметрите на мембранната конструкция и водния поток от една страна и характеристиките на натоварването от друга.

### 3.1.5.2 Импулсен товар от висока вълна с фронт

За разлика от предишната разглеждана полегата висока вълна (точка 3.2.2.1), която предимно се получава в случаите на обилни валежи в области които са обезлесени, в настоящата точка ще разгледаме друг вид висока вълна (с фронт). Тя се образува предимно в неподдържани речни корита, в които буйната растителност подприщва прииждащата вода, която в даден момент се отприщва

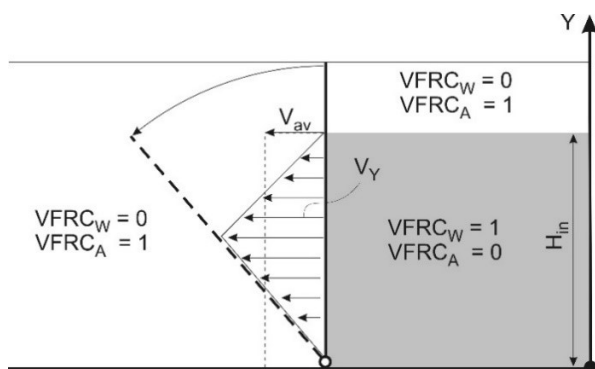
във формата на висока вълна. Такава вълна се получава и при аварии на язовирни стени и диги.

За целта на изследването е разгледан симулационен модел, като този в точка 3.2.2.1, при който е променено началното условие за високата вълна (симулирана е вместо полегата вълна, вълна с фронт).

Началното условие за моделиране на високата вълна е направено чрез математичен модел на VFRC. За ясно разграничаване между частта на обема, който е зает от вода, и този, който е зает от въздух, двата материала са приети като хомогенни флуиди. В изходна позиция (като начално условие) целия обем на изследване се приема като запълнен с въздух, (въздух VFRC = 1), но на входа се задава височината на входящата граница за водата. В този случай това се постига чрез задаване на VFRC за водата (VFRC<sub>W</sub>) и за въздуха (VFRC<sub>A</sub>) по височината на входната част (фиг.3.27).

$$(VFRC_W) = \text{step}(H_{in}-Y),$$

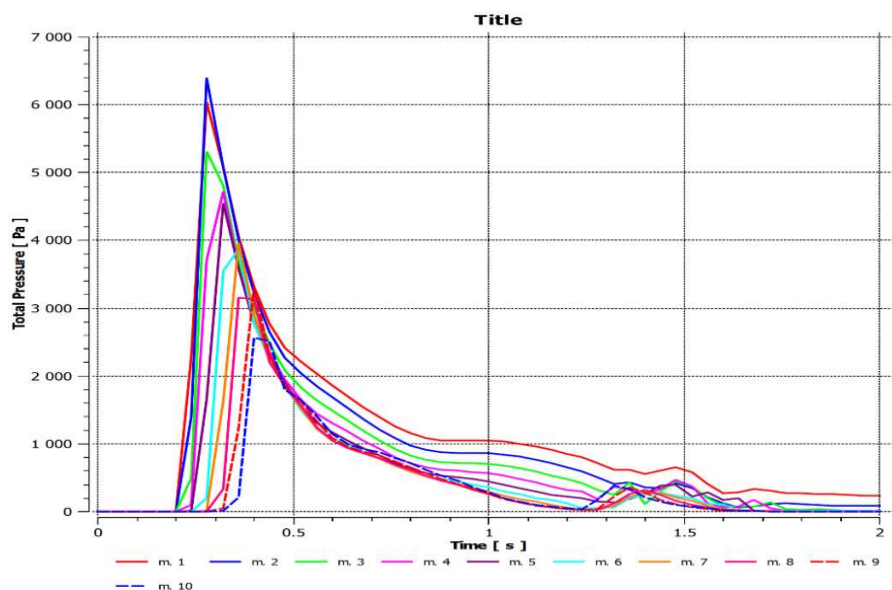
$$(VFRC_A) = 1-(VFRC_W).$$



Фиг.3.27. Модел за образуване на висока вълна с фронт

Върху хидротехническата мембрана са определени 10 наблюдателни точки за получаване на данни от натоварването от висока вълна.

Получените резултати (фиг 3.28) от проведената симулация на висока вълна с фронт над хидротехническа мембранна конструкция са използвани за съставяне на обобщено уравнение на импулсното натоварване.



Фиг.3.28.  
Резултати за  
наляганията  
върху мембранна  
конструкция от  
висока вълна с  
фронт

Проведеният регресионен анализ по метода на най-малките квадрати с помощта на програмния продукт Table Curve показва, че за описание на резултатите може да бъде използван следният полином от четвърта степен по отношение на времето  $t$ :

$$y=(a+c.t+e.t^2+g.t^3+i.t^4)/(1+b.t+d.t^2+f.t^3+h.t^4) \quad (3.6)$$

Коефициентите на полинома за всяка от наблюдателните точки са дадени в таблица на фиг 3.29.

| №  | $a$    | $b$   | $c$      | $d$   | $e$      | $f$    | $g$       | $h$   | $i$      |
|----|--------|-------|----------|-------|----------|--------|-----------|-------|----------|
| 1  | 242,11 | -8,08 | -4653,60 | 19,70 | 20674,51 | -12,01 | -17227,56 | 2,41  | 4106,76  |
| 2  | 309,36 | -8,09 | -4922,95 | 19,96 | 19360,11 | -13,91 | -14882,03 | 4,85  | 3331,54  |
| 3  | 346,56 | -8,03 | -4915,18 | 20,08 | 17142,44 | -16,76 | -9882,87  | 10,17 | 1508,25  |
| 4  | 133,51 | -9,53 | -1596,52 | 33,56 | 3921,06  | -54,73 | 1941,40   | 40,67 | 679,31   |
| 5  | 173,85 | -8,50 | -2284,58 | 25,77 | 7993,77  | -34,13 | -6802,46  | 20,50 | 2670,39  |
| 6  | 16,95  | -9,42 | 131,08   | 33,68 | -2431,29 | -56,10 | 6954,82   | 38,84 | -2135,22 |
| 7  | 21,70  | -8,76 | -42,79   | 28,95 | -1209,07 | -44,31 | 4385,43   | 28,27 | -1663,75 |
| 8  | 3,07   | -8,48 | 170,41   | 27,11 | -1639,17 | -39,68 | 3921,68   | 23,54 | -1487,58 |
| 9  | -5,67  | -8,10 | 230,66   | 24,66 | -1583,90 | -34,16 | 3287,36   | 18,96 | -1252,35 |
| 10 | -25,74 | -7,83 | 446,55   | 23,11 | -2216,76 | -31,11 | 3781,96   | 16,72 | -1374,15 |

Фиг.3.29. Таблица със стойности на параметрите на уравнение (3.6)

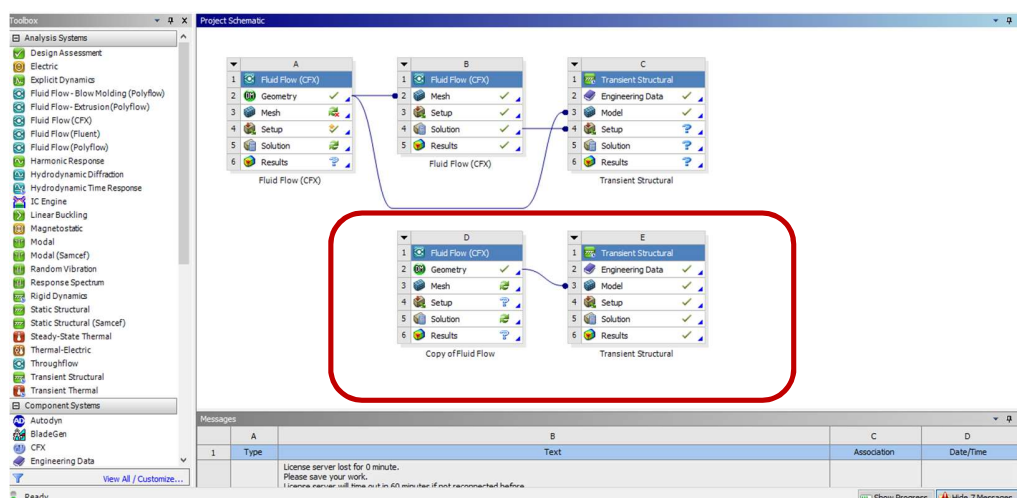
От получените резултати на фиг. 3.26 и 3.28 се вижда разликата във ходовата крива на двата вида вълни и как се променя натоварването върху мембранната конструкция в зависимост от вида на високата вълна.

Като заключение от направените симулационни изследвания на импулсно натоварване от висока вълна може да се каже, че:

1. Получените резултати отговарят на реално поведение от импулсен товар получен от висока вълна.
2. Получените резултати за наляганията в различните точки на носещата конструкция могат да се опишат с полиноми от една и съща степен, които формират обобщено уравнение на импулсното натоварване от висока вълна.
3. Резултатите от решенията, представени чрез обобщеното уравнение на флуидния модел, могат да бъдат използвани за определяне на напреженията в хидротехническата мембрана и механичното и поведението.

### 3.1.6 МЕХАНИЧНО ПОВЕДЕНИЕ НА ЗАТВОРЕНА ХИДРОТЕХНИЧЕСКА МЕМБРАНА ПРИ ВИСОКА ВЪЛНА С ФРОНТ

За получаване на напрегнато-деформирано състояние в мембрания елемент са използвани възможностите на програмната система ANSYS за съвместно решаване на флуидно-твърдотелни задачи, като за целта резултатите получени за натоварването получени от флуидното решение в точка 3.2.2.2 приложени върху мембраната като твърдо тяло в същата конфигурация (фиг.3.30).

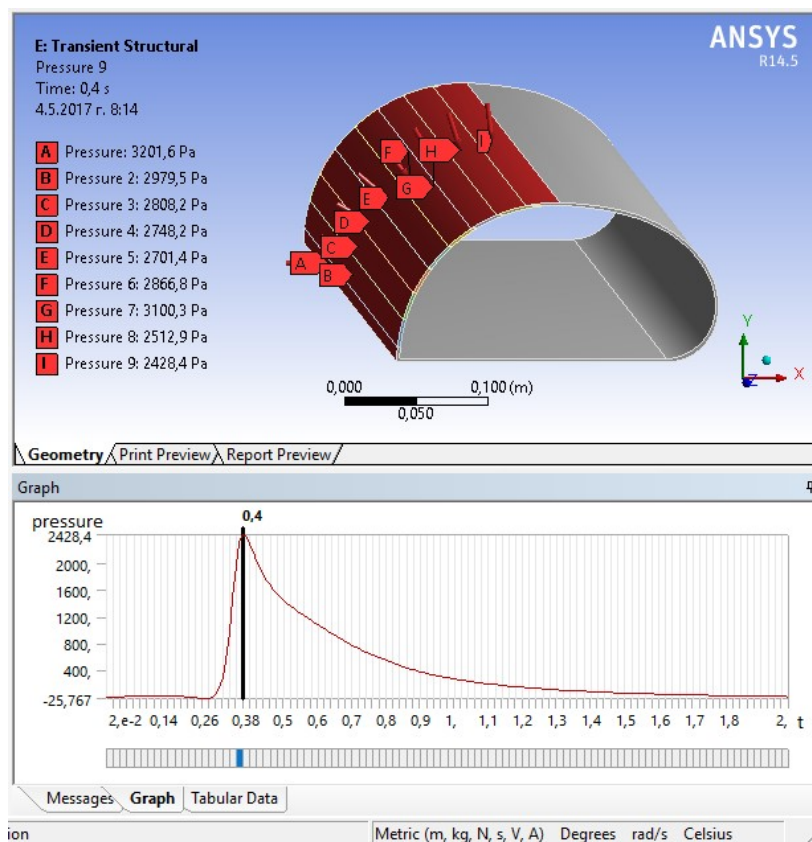


Фиг.3.30

Пресмятанията са извършени при предпоставка за големи геометрични премествания и линейно еластичен материал с модул на еластичност  $E=500\text{MPa}$  и коефициент на Поасон  $\nu=0,3$ . В общия случай материалите, използвани за изработване на хидротехническите мембрани (полиамидна тъкан с двустранно PVC или каучуково покритие), проявяват известни вискозо-еластични свойства, които в настоящото изследване са пренебрегнати поради краткото действие на натоварването. Прието е че за краткия период на действие на импулсното

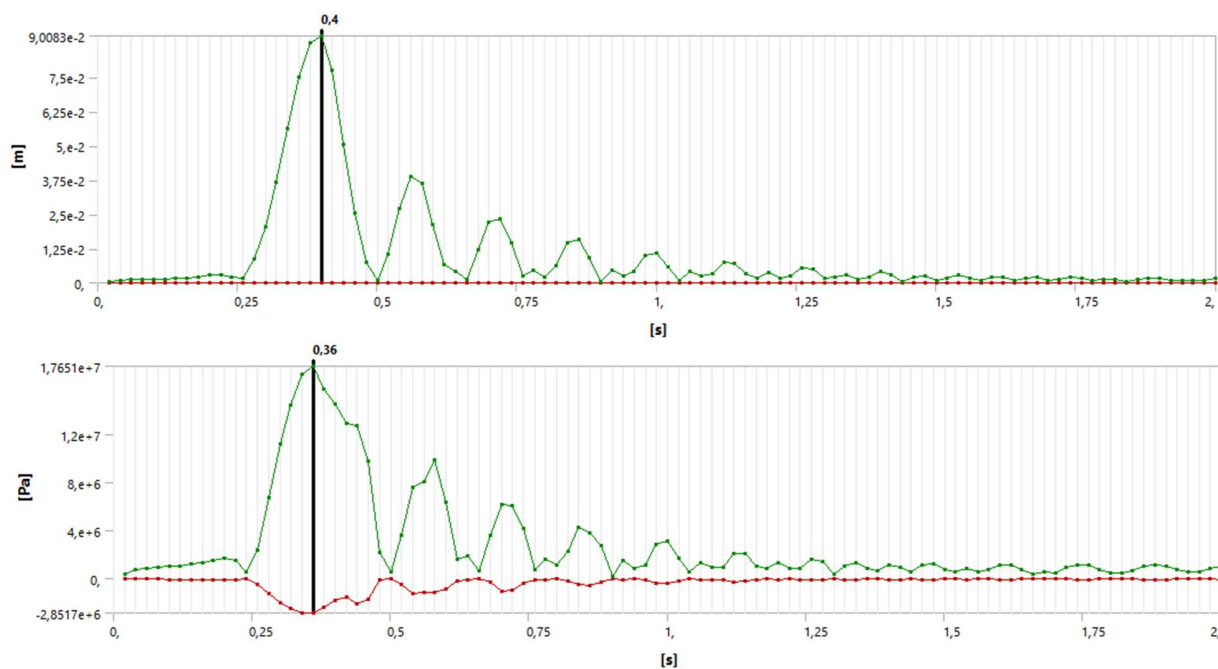
натоварване полимерните структурни единици нямат възможност да претърпят измененията водещи до визкозо-еластични деформации.

Натоварването е формирано по уравнение (3.6) за период на действие 2s след което се смята, че въздействието на високата вълна затихва, което може да се види от графиката на фиг.3.28. За целта по повърхността на мембраната подложена на натоварването са дефинирани ивици. За всяка ивица е формирано средно налягане по уравнение (3.6) със съответните параметри за точката от таблицата на фиг 3.29 за всеки момент от изследвания период. Като пример на фиг.3.31 е показано натоварването върху мембранный елемент в период от време 0,4s .



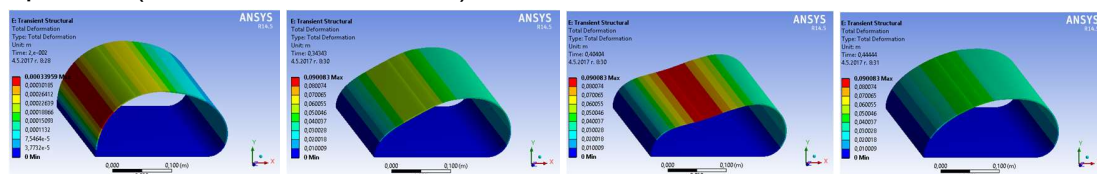
Фиг.3.31. Натоварване от външното налягане върху мембранната конструкция

Твърдотоелното изследване на мембраната е извършено с модула Transient Structural за нестационарно механично поведение. Получени са резултати за напреженията и деформациите на мембранната конструкция под действието на външното налягане показано по горе. На фиг.3.32 са показани ходовите графики на напреженията и максималните премествания на точките на мембранный елемент, от които се виждат затихващите колебания на елемента след преминаване на фронта на вълната.



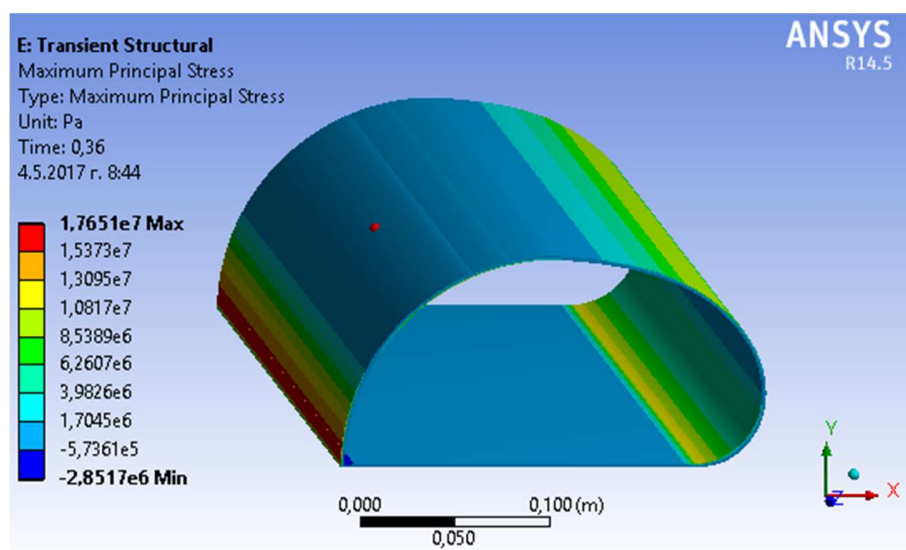
Фиг. 3.32. Ходови криви на високата вълна

На фиг.3.33 са показани резултати от деформираното състояние на мембранный елемент в четири момента от първия цикъл на колебания в мембраната (0s, 0.34s, 0.4s и 0.44s).



Фиг. 3.33. Деформирано състояние на мембранната конструкция

На следващата фиг. 3.34 са показани главните напрежения в материала на хидротехническата мембрана в периода, в който са отчетени най-големите стойности на вълната - 0,36s.



Фиг.3.34. Главни напрежения във време  $t=0,36s$

Като заключение може да се отбележи, че при изследваната висока вълна с фронт се получават такива колебания в преместванията и максималните напрежения, които са в границите на допустимите, но превишават значително (над 7-8 пъти) нормалните експлоатационни напрежения на хидротехническата мембранна конструкция. В зависимост от начина на експлоатация, всяка една конструкция трябва да се оразмери за съответните експлоатационни натоварвания. Когато мембранната конструкция служи само за поддържане на определено водно ниво на водното течение и при високи вълни не е предвидено тя да играе ролята на преградно съоръжение, не е необходимо да се взема предвид натоварване от евентуална прииждаща висока вълна. В случая в който мембранната конструкция играе роля и на конструкция, предпазваща от наводнения, е необходимо като основно натоварване да се приеме натоварване от висока вълна. В този случай резултантните напрежения в елемента са в пъти по-големи от тези при нормалната му експлоатация.

#### IV.ЛАБОРАТОРНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ

След създаването на симулационния модел, верифицирането на неговите параметри и извеждане на резултатите от него за различни експлоатационни случаи на обекта, е необходимо да се направи проверка на модела чрез валидация на тези резултати. Валидацията е етап от създаването на модела, в който се дава отговор на въпроса „Дали сме създали правилния модел?“.

Обикновено процедурата по валидация на модела включва сравняване на резултати получени от него с резултати от реален натурен или лабораторен модел. По настоящем на територията на България не съществува натурен обект подходящ за експериментални наблюдения. Един точен лабораторен модел за натурни изследвания на хидротехническите мембрани в сертифицирана лаборатория

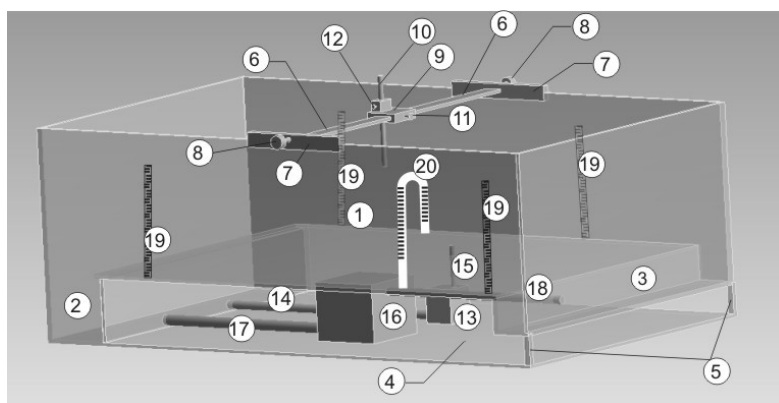
изисква много ресурси, с които настоящото изследване не е обезпечено. Поради това с финансовата подкрепа на Проект BG051PO001-3.3.06-0014 и Център по математично моделиране и компютърна симулация към ХТМУ, за целта е проектиран и изграден лабораторен модел (фиг. 4.1) на част от правоъгълен канал, в който е монтирана хидротехническа мембранна конструкция (яз).



фиг. 4.1.  
Лабораторен  
модел на  
правоъгълен  
канал

#### 4.1. Лабораторен физичен модел

За удовлетворяване на специфичните изисквания на експеримента е проектирана и изработена специализираната лабораторна система. Системата трябва да създаде условия за моделиране на свободната повърхност на потока, да позволи разполагането на надуваем модел на яз и измерване на следните параметри: дълбочина на потока пред стената на яза, височина на преливника и дълбочина на потока след яза. Освен това, скоростта на потока трябва да се измерва в няколко определени места по позицията на стената. Параметрите на процеса ще бъдат сравнени със стойностите, получени чрез компютърната симулация при подобни условия. Общото описание на лабораторната система е показана на фиг. 4.2.



Фиг.4.2. Физичен модел

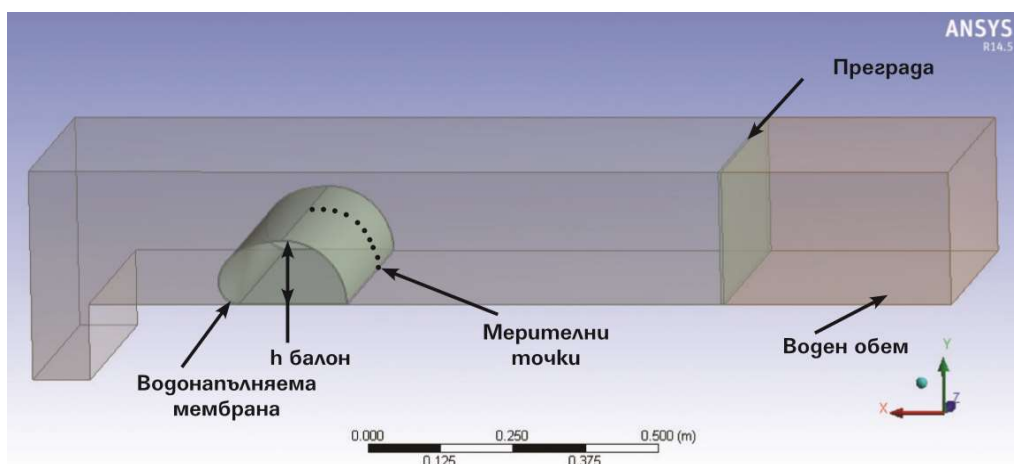
Системата се състои от метално легло с формата на правоъгълна призма (1), с дължина 1,2 м и ширина 0,6 метра. В двата края на леглото се образуват допълнителни обеми (2) и (3). Над леглото е разположена напречна рейка (6), която от двете си страни има плъзгачи (7) и винтове (8). Върху рейката има плъзгач (9),

на който е разположена вертикална мерителна лата (10) и винтове (11) (12). На плот (4) са разположени помпен агрегат (13), свързан с обеми (1) и (2) посредством тръби (14) и (15), и помпен агрегат (16), свързана с обеми (2) и (3) посредством тръби (17) и (18). По стените на леглото са фиксирани четири мерителни линии (19) и пиезометрична тръба (20).

#### 4.1.1 ПРОВЕЖДАНЕ НА ЕКСПЕРИМЕНТА

Експерименталната система работи по следния начин:

В началната позиция обем (3) се пълни с вода до експерименталното ниво и се държи в това положение от плосък затвор (преграда), закрепен на дъното с цилиндрична опора. Моделът на напълненият яз (водонапълняема мембрана), е закрепена по дъното на леглото напречно на течението (фиг. 4.3).



Фиг. 4.3. Начална позиция на експеримента

Чрез работата на помпа (13) балонът се пълни до необходимото налягане, което се контролира от пиезометричната тръба (20). Експериментът започва с отварянето на плоския затвор, след което водата навлиза в леглото като формира течение, което прелива през балона и постъпва в разширение (2). Дълбочината на потока се контролира чрез мерителни линии (19). Височината на преливане на потока над балона се измерва с разграфена мерителна лата (10), която се премества вертикално чрез винт (12), напречно заедно с плъзгач (9) и с винт (11), и надлъжно заедно с релса (6) с винтове (8). Всички процеси на преливане на течението през яза се записват с високоскоростна камера през прозрачната странична стена.

#### 4.1.2 ВАЛИДАЦИЯ НА СИМУЛАЦИОННИЯТ МОДЕЛ

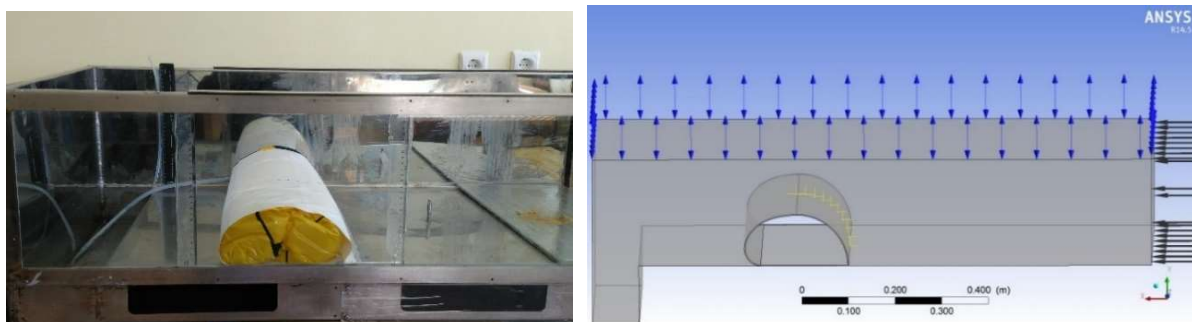
За целите на валидацията е проведена компютърна симулация при условия, аналогични на условията на лабораторния експеримент.

Основен проблем при компютърната симулация е определянето на граничните условия по начин, отразяващ реалното работно състояние, както и определянето на началните условия, водещи до сходимост на решенията. Плоскостта, преграждаща водата, е закрепена в долната си част за дъното на леглото, така че в началото на експеримента посоката на отваряне е от горе на долу. В допълнение трябва да бъде взето под внимание влиянието на тежестта върху разпределението на скоростта по височина. В този случай в средата на ANSYS Design Modeler е проектиран 3D геометричен модел на леглото, дясната страна на леглото е определена като вход и за описание на разпределението на скоростта ( $V_y$ ) по височина на входа се използва следният израз:

$$V_y = 4V_{av}/H_{in} [Y \text{ step}(H_{in}/2 - Y) + (H_{in} - Y) \text{ step}(Y - H_{in}/2)] \quad (4.1),$$

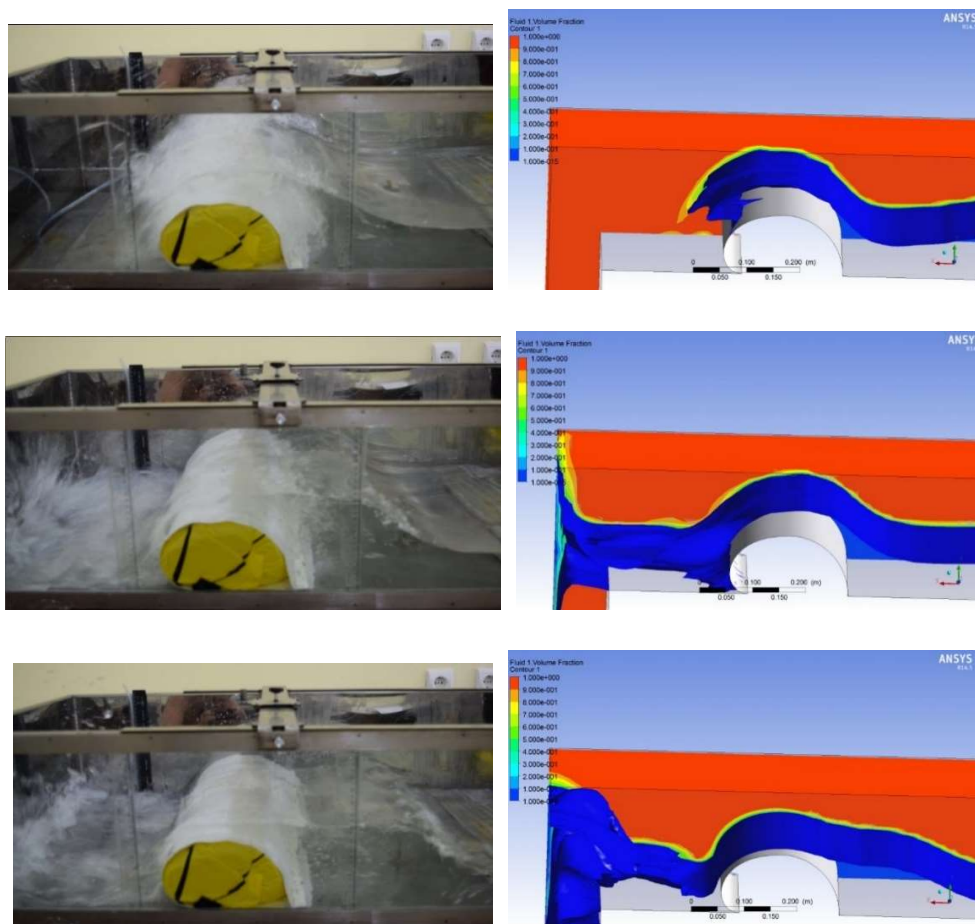
където  $V_{av} = 0.5(2gH_{in})^{0.5}$  е средната стойност на скоростта във входа,  $H_{in}$  е височината на водата на входа,  $Y$  е вертикалната координата (нулата е в долната част на леглото) и стъпката е функция ( $\text{step}(x)=1$ , когато  $X>0$ ,  $\text{step}(x)=0$ , когато  $X<0$  и  $\text{step}(x)=0.5$ , когато  $x=0$ ).

Горната повърхност на изследваният обем се определя като "отворена", което означава, че флуидът може да преминава през граничната повърхност и в двете посоки. Граничното състояние „отворена повърхност“ е определено с относителна стойност на налягането, разбрана като относително пълно налягане за притока и относителна статично налягане за отлива. Всички други гранични повърхности са определени като стени. В настоящото изследване всички повърхности на стените са приети като „повърхност с плътно залепяне на граничния слой“. Повърхността на яза е приета като "повърхност със свободно плъзгане", която определя много ниска стойност на коефициента на триене между течността и материала на яза. Първоначалната форма на яза съответства на хидростатично натоварване (първоначално натоварване). Експерименталната система и геометрията на модела с граничните условия са дадени на фиг.4.4.



Фиг.4.4. Геометрия на лабораторен и симулационен модел

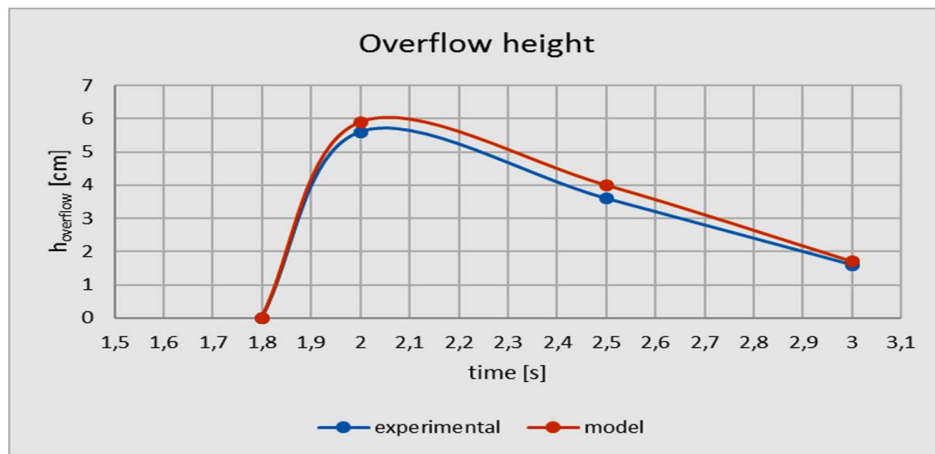
Решението осигурява пълен набор от резултати, отнасящи се за налягане, скорост и други основни характеристики на течението. Тук ще бъдат представени само резултати за разпределението на обемната фракция на водата, която е основен параметър на валидирането. Валидирането се извършва чрез сравняване на снимките на свободните повърхности на течението от лабораторният експеримент и цифровата симулация, регистрирани в един и същ момент. Видео материалът от лабораторния експеримент е създаден с 1080 пиксела, 50 кадъра в секунда. Численото решение се извършва с 0.2сек стъпка във времето, като се записват резултатите от всяка стъпка. Резултатите се показват в цветни контури, при които синият цвят означава пълно заемане на обема с вода ( $VFRC_w=1$ ). На фиг.4.5 са дадени три основни снимки, които позволяват да направим заключение, че резултатите, получени чрез цифрова симулация, са достатъчно близки до тези, получени чрез лабораторен експеримент.



Фиг.4.5. Визуален резултат от лабораторният и симулационният модел.

Основната цел на численото решение е да се получат резултати за механичното поведение на яза по време на импулсно натоварване от преливащ воден поток. Решението може да се осъществи на два етапа - нестационарен

анализ на флуидното течение за получаване на влиянието на водния поток върху повърхността на яза (налягането като функция от времето) и нестационарен механичен анализ с натоварване, получено от флуидния анализ. За валидиране на резултатите относно влиянието на притока от вода върху повърхността на яза, като числен критерий за съвпадение на резултатите се приема преливната височина на течението над балона. На фиг.4.6 са дадени две криви, които представят резултатите от експеримента и численото решение.



Фиг.4.6. Сравняване на получените резултати от лабораторният модел и симулационният

Кривите са близки като стойности и в първата си производна, което позволява да заключим, че резултатите са достатъчно близки.

Заключението от проведения анализ е, че водното течение над яза и импулсният товар могат да бъдат моделирани посредством метода VOF, използвайки софтуера ANSYS CFX. За целта трябва да се създаде подходящ числен модел. Процесът по създаване на модела включва процедури по верификация и валидация. За процедурата на валидиране на резултатите могат да бъдат използвани визуални и числени критерии. Визуалните критерий се състоят в сравняването на снимките на свободната повърхност на потока, получени от лабораторен експеримент и компютърна симулация. Те показват, че с помощта на подходящ математичен модел, гранични и начални условия, получените резултати са достатъчно близки. За числен критерий може да бъде приета височината на преливане на потока над яз. Кривите които представят резултатите от експеримента и числените решения съвпадат като стойности и в първата производна, което позволяват да се заключи, че резултатите са достатъчно близки. След валидиране на резултатите моделът може да бъде използван за определяне на динамичното натоварване на яза при бъдещи изчисления на якост. За тази цел върху повърхността на стената могат да бъдат определени точки за наблюдение, където

---

по време на флуидното решение пълното налягане може да бъде записано като функция от времето, и след това да бъде използвано като натоварване при изчисляване на твърдото механично поведение на яза.

## V. Заключение:

### *Проведени изследвания*

1. Структуриран е концептуален модел включващ математическо описание на процесите, описание на обекта като твърдо тяло, описание на експлоатационната флуидна среда, процеса на обтичане, теренните и геоложки дадености, силови връзки и закрепващи елементи, които са необходими за конкретното предназначение на моделирането.
2. Създаден е математичен модел на прииждаща висока вълна, включващ уравнение на движение, уравнение за непрекъснатост, модел за турбулентност и модел за свободна повърхност.
3. Направен е анализ на съществуващите софтуерни кодове, избрана е подходяща софтуерна среда и в нея е структуриран модел за компютърна симулация на хидротехническа мембранна конструкция с носещ мембранен елемент.
4. Извършена е верификация на модела по отношение на гъстотата на елементната мрежа и малки смущения в началните условия.
5. Извършени са лабораторни изследвания за валидиране на модела.
6. Определено е натоварването върху затворена хидротехническа мембрана в стационарно водно течение.
7. Изследвано е формирането на натоварването върху водонапълняема хидротехническа мембрана при импулсно действие на прииждащо водно течение.
8. Изследвано е механично поведение на затворена хидротехническа мембрана при висока вълна с фронт.

### *Основни резултати:*

1. Представените изследвания убедително доказват възможностите на математичното моделиране и на компютърната симулация за анализ на механичното поведение на хидротехническите мембрани при взаимодействие с обтичащ ги флуид. При конструкции с базова височина  $H=1\text{m}$  достоверни резултати (средно квадратично отклонение между резултатите между две съседни итерации е  $1 \times 10^{-3}$ ) се получават при размер на елементите  $0,18\text{m}$ , стъпка във времето  $0,02\text{s}$  и модел на дискретизация Second Order Backward Euler.

- 
2. При провеждане на компютърна симулация и лабораторно изследване на затворена носеща мембрана при аналогични условия разликата за преливащият воден слой не надвишава 10%, като кривите представлящи резултатите във функция на времето са гладки и съвпадат до втората си производна.
  3. При базова скорост на стационарно водно течение  $v=5\text{m/s}$  в задната част на мембраната се формира подналягане чиято големина е приблизително 30% от максималното налягане върху конструкцията.
  4. Промяната на височината на затворена мембранна конструкция, подприщваща водно течение със свободна повърхност, води до промяна на натоварването върху носещата мембрана с различна тенденция за различните видове натоварвания. При увеличаване на височината на конструкцията минималната стойност на натоварването намалява, като след 0.5 м добива отрицателна стойност, която може да доведе до вибрации. При максималните стойности на натоварването се наблюдава тенденция на увеличаване с увеличаване на височината, което трябва да бъде отчетено при избор на материал.
  5. При увеличаване на мътността и вискозитета на флуида правопрпорционално нараства скоростта на потока над балона. От където нарастват правопрпорционално и напреженията в мембранната конструкция. При малки размери на мембраната (височина  $H=1\text{m}$ ) разликите на скоростта и напреженията са незначителни и няма да укажат голямо влияние върху хидравличните и статичните оразмерявания на конструкцията от където следва, че могат да се пренебрегнат. При оразмеряване на големи съоръжения е необходимо при наличието на възможност за повишаване на мътността в канала да се направи проверка за тези случаи.
  6. Представените изследвания за натоварване на хидротехническа мембранна конструкция от импулсен товар от рязко покачване на водно ниво ( такива натоварвания се получават при изпускане на води от язовири, при проливни дъждове в незалесени територии и др.) показват че налягането върху мембранната конструкция достига високи стойности (8000Pa) в рамките на няколко секунди, след което рязко спада (5500Pa). Това натоварване се повтаря циклично докато течението над мембранната конструкция се успокои(Следваща максимална стъпка 7000Pa, следваща минимална стъпка 6000Pa и т.н.). От получените резултати се вижда, че първата вълна е основната, а след нея се образуват второстепенни вълни, които плавно намаляват натоварването върху конструкцията до успокояване на течението и достигане до постоянно натоварване.

- 
7. При изследваната висока вълна с фронт се получават такива колебания в преместванията и максималните напрежения, които са в границите на допустимите, но превишават значително (над 7-8 пъти) нормалните експлоатационни напрежения на хидротехническата мембранна конструкция.

### ***Предложения за бъдещи изследвания:***

Въз основа на получените резултати от дисертационната работа могат да бъдат направени следните предложения за бъдещи научни изследвания, свързани с поведението на затворените хидротехнически мембранни конструкции:

В настоящата работа е установено, че при преливане на воден слой, съизмерим с височината на конструкцията, зад нея се образува завихряне на потока. Необходимо е детайлно изучаване на неговите характеристики, евентуалните пулсации на налягането и вибрации на мембраната, които той евентуално предизвиква.

При получаването на формата на затворена мембрана напълнена с флуид в крайните зони на закрепване (при бреговете) се образуват гънки. Необходимо е детайлно изследване на поведението на гънките под действието на импулсен товар и умората на материала в следствие на променливите напрежения.

В настоящата работа е изследван случай при който плътността и вискозитета са променени от наличието на плаващи наноси. Необходимо е да се изследва и случая при който тези характеристики са променени и за напълващия флуид (в следствие на замърсявания или температури близки до нулата).

### ***Основни приноси***

#### **A. Научно-приложни приноси**

1. Създавана е обща симулационна среда за анализ на механичното поведение на хидротехническа мембранна конструкция с носещ мембранен елемент, включваща: реален обект, концептуален модел, адекватен софтуер и модел за компютърна симулация.
2. Създаден е изчислителен модел на хидротехническа мембранна конструкция с затворен мембранен носещ елемент, работеща при стационарно и импулсно натоварване.
3. Създадена е методика за валидиране на числен модел на мембранна хидротехническа конструкция посредством лабораторен експеримент.

#### **Б. Приложни приноси**

1. Създаден е алгоритъм за определяне на вътрешното налягане в мембранный елемент при променливо външно натоварване, който е реализиран с програмен код в Maple.

---

2. Получено е емпирично обобщено уравнение на импулсия товар от прииждаща висока вълна върху затворена мембрана с базова височина 1m.

3. При прилагане на създадения изчислителен модел за анализ на механичното поведение на хидротехническа мембранна конструкция са получени числени стойности на хидродинамичното поле при флуида и напрегнато деформирано състояние на мембраната за различни експлоатационни условия.