



Universitatea POLITEHNICA din București  
Școala Doctorală Energetică



ing. Bogdan Ionuț CORBESCU

# OBTURAREA UNEI CONDUCTE PRIN ÎNGHEȚARE CRIOGENICĂ, METODĂ MODERNĂ ÎN MENTENANȚA CIRCUITELOR HIDRAULICE ALE CNE

Rezumatul tezei de doctorat

**Prof. univ. dr. ing. Constantin BULAC**

Universitatea Politehnica din București

**Prof. univ. emerit dr. ing. Valeriu Nicolae PANAITESCU**

Universitatea Politehnica din București

**Prof. univ. dr. ing. Ilie PRISECARU**

Universitatea Politehnica din București

**Prof. univ. dr. ing. Daniela POPESCU**

Universitatea Tehnică „Gheorghe Asachi” din Iași

**Prof. univ. dr. ing. Șerban VALECA**

Universitatea din Pitești

Președinte

Conducător de  
doctorat

Referent

Referent

Referent

BUCUREȘTI  
2021

---

## CUPRINS

---

<i>Index de figuri</i> .....	6
<i>Index de tabele</i> .....	7
<b>INTRODUCERE</b> .....	8
1. <i>Actualitatea și oportunitatea tezei de doctorat</i> .....	8
2. <i>Obiectivele de studiu</i> .....	8
3. <i>Prezentarea generală a conținutului lucrării</i> .....	8
4. <i>Perspectivă de continuare a lucrărilor</i> .....	9
5. <i>Observații</i> .....	9
<b>CAPITOLUL 1. OBTURAREA UNEI CONDUCTE PRIN ÎNGHEȚARE CRIOGENICĂ</b> .....	10
1.1. ASPECTE ALE OBTURĂRII UNEI CONDUCTE PRIN FORMAREA UNUI DOP DE GHEAȚĂ.....	10
<b>1.1.1. Considerații generale</b> .....	10
<b>1.1.2. Avantajele tehnicii obturării cu dop de gheață</b> .....	10
<b>1.1.3. Obturarea conductelor prin înghețare criogenică</b> .....	10
1.1.3.1. <i>Dispozitivul de înghețare</i> .....	10
1.1.3.2. <i>Agentul frigorific</i> .....	10
1.1.3.3. <i>Înghețarea fluidului într-o porțiune de conductă</i> .....	11
1.2. ISTORICUL TEHNOLOGIEI DE FORMARE CONTROLATĂ A DOPURILOR DE GHEAȚĂ PENTRU OBTURAREA UNUI TRONSON DE CONDUCTĂ.....	11
<b>1.2.1. Anii 1940-1980</b> .....	11
<b>1.2.2. După anul 1980</b> .....	11
<b>1.2.3. Preocupări în țara noastră</b> .....	11
1.3. PROCEDURI DE PLANIFICARE ȘI DESFĂȘURARE ÎN SIGURANȚĂ A INTERVENȚIEI TEHNOLOGICE.....	11
<b>1.3.1. Planificarea intervenției tehnologice</b> .....	11
<b>1.3.2. Siguranța personalului și măsurile de protecție a muncii</b> .....	11
<b>1.3.3. Alte măsuri de precauție</b> .....	12
1.3.3.1. <i>Măsuri de precauție pentru personal</i> .....	12
1.3.3.2. <i>Măsuri de precauție pentru echipament</i> .....	12
<b>1.3.4. Etapele obturării cu dop de gheață a unei conducte</b> .....	12
1.3.4.1. <i>Identificarea zonei optime pentru montarea dispozitivului de înghețare</i> ..	12
1.3.4.2. <i>Determinarea tipului și necesarului de agent frigorific pentru desfășurarea lucrărilor</i> .....	12
1.3.4.3. <i>Pregătirea echipamentului tehnologic necesar desfășurării intervenției</i> ..	12
1.3.4.4. <i>Formarea dopului de gheață</i> .....	12
1.3.4.5. <i>Menținerea dopului de gheață</i> .....	13
1.3.4.6. <i>Topirea dopului de gheață</i> .....	13
1.4. CONCLUZII.....	13

<b>CAPITOLUL 2. STUDIUL FORMĂRII PRIN ÎNGHEȚARE CRIOGENICĂ A UNUI DOP REZISTENT LA PRESIUNEA LICHIDULUI DINTR-O CONDUCTĂ A CIRCUITULUI HIDRAULIC AL CNE .....</b>	<b>14</b>
2.1. MODELAREA TEORETICĂ A ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE A UNEI CONDUCTE ORIZONTALE .....	14
2.2. PROBLEME APĂRUTE ÎN TIMPUL ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE A CONDUCTELOR.....	15
2.3. EFECTELE ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE ASUPRA CONDUCTELOR .....	15
<b>2.3.1. Efectele înghețării criogenice asupra materialului conductelor.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3.2. Calculul mecanic al eforturilor exercitate asupra conductei.....</b>	<b>15</b>
2.4. IMPLEMENTAREA TEHNOLOGIEI ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE ÎN INDUSTRIA ENERGETICĂ NUCLEARĂ.....	16
<b>2.4.1. Zona fiderelor .....</b>	<b>16</b>
<b>2.4.2. Circuitul de apă de răcire la condensator .....</b>	<b>16</b>
2.5. CONCLUZII.....	16
<b>CAPITOLUL 3. MODELE DE CALCUL PENTRU OBTURAREA CU DOP DE GHEAȚĂ A UNEI CONDUCTE ORIZONTALE CU DN 200 ÎN APĂ AFLATĂ ÎN STARE DE REPAUS .....</b>	<b>17</b>
3.1. NECESITATEA UTILIZĂRII UNUI MODEL DE CALCUL.....	17
3.2. APLICAȚIE DE CALCUL NUMERIC .....	17
<b>3.2.1. Aparat matematic .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2.2. Timpul necesar obturării cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 la temperatura agentului de lucru de 15°C .....</b>	<b>19</b>
<b>3.2.3. Necesarul de agent criogenic .....</b>	<b>19</b>
3.3. MODELARE CFD.....	20
<b>3.3.1. Prezentarea programului de calcul.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.2. Metode de implementare a unui calcul CFD.....</b>	<b>20</b>
<b>3.3.3. Implementarea modelului geometric .....</b>	<b>20</b>
3.3.3.1. <i>Introducere.....</i>	20
3.3.3.2. <i>Modelarea geometriei domeniului de analiză a formării dopului de gheață cu programul ANSYS Fluent.....</i>	20
<b>3.3.4. Modelarea transferului termic în procesul de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 15°C.....</b>	<b>21</b>
3.3.4.1. <i>Proprietățile fizice ale materialelor și mediului de lucru.....</i>	21
3.3.4.2. <i>Condițiile inițiale și la limită .....</i>	21
3.3.4.3. <i>Modelarea schimbării de fază .....</i>	22
<b>3.3.5. Rezultate obținute.....</b>	<b>22</b>
3.4. CONCLUZII.....	24
<b>CAPITOLUL 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ALE OBTURĂRII CU DOP DE GHEAȚĂ A UNEI CONDUCTE ORIZONTALE CU DN 200 ÎN ABSENȚA CURGERII APEI .....</b>	<b>25</b>
4.1. OBIECTIVELE CERCETĂRII .....	25

4.2.	DESCRIEREA INSTALAȚIEI ȘI ECHIPAMENTELOR EXPERIMENTALE.....	25
4.2.1.	Instalația experimentală.....	25
4.2.2.	Dispozitivul de înghețare.....	25
4.2.3.	Dispozitivul de supraveghere video.....	25
4.2.4.	Echipamentul de măsurare.....	26
4.2.4.1.	Senzorii de temperatură.....	26
4.2.4.2.	Traductoarele de presiune.....	26
4.3.	DESCRIEREA EXPERIMENTULUI.....	27
4.4.	INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE.....	27
4.5.	VALIDAREA MODELELOR TEORETICE.....	28
4.6.	CONCLUZII.....	30
<b>CAPITOLUL 5. MODELAREA OBTURĂRII CU DOP DE GHEAȚĂ A CONDUCTELOR ORIZONTALE DE DIAMETRE MARI ÎN DIFERITE CONFIGURAȚII ALE DISPOZITIVELOR DE ÎNGHEȚARE.....</b>		
5.1.	OBTURAREA CU UN DISPOZITIV DE ÎNGHEȚARE.....	31
5.1.1.	Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200, la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C.....	31
5.1.1.1.	Modelarea înghețării.....	31
5.1.1.2.	Rezultate obținute.....	31
5.1.2.	Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200, la o temperatură inițială a agentului de lucru de 25°C.....	32
5.1.2.1.	Modelarea înghețării.....	32
5.1.2.2.	Rezultate obținute.....	32
5.1.3.	Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 300.....	33
5.1.3.1.	Modelarea înghețării.....	33
5.1.3.2.	Rezultate obținute.....	33
5.1.4.	Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 400.....	34
5.1.4.1.	Modelarea înghețării.....	34
5.1.4.2.	Rezultate obținute.....	34
5.1.5.	Interpretarea rezultatelor.....	35
5.2.	OBTURAREA CU DOUĂ DISPOZITIVE DE ÎNGHEȚARE.....	35
5.2.1.	Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 200.....	35
5.2.1.1.	Modelarea înghețării.....	35
5.2.1.2.	Rezultate obținute.....	36
5.2.2.	Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 300.....	36
5.2.2.1.	Modelarea înghețării.....	36
5.2.2.2.	Rezultate obținute.....	36
5.2.3.	Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 400.....	37
5.2.3.1.	Modelarea înghețării.....	37
5.2.3.2.	Rezultate obținute.....	37
5.2.4.	Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 500.....	38
5.2.4.1.	Modelarea înghețării.....	38
5.2.4.2.	Rezultate obținute.....	38
5.2.5.	Interpretarea rezultatelor.....	39
5.3.	OBTURAREA CU TREI DISPOZITIVE DE ÎNGHEȚARE.....	39

<b>5.3.1. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 600 .....</b>	<b>40</b>
5.3.1.1. <i>Modelarea înghețării .....</i>	40
5.3.1.2. <i>Rezultate obținute .....</i>	40
<b>5.3.2. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 700 .....</b>	<b>41</b>
5.3.2.1. <i>Modelarea înghețării .....</i>	41
5.3.2.2. <i>Rezultate obținute .....</i>	41
<b>5.3.3. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 800 .....</b>	<b>42</b>
5.3.3.1. <i>Modelarea înghețării .....</i>	42
5.3.3.2. <i>Rezultate obținute .....</i>	42
<b>5.3.4. Interpretarea rezultatelor .....</b>	<b>43</b>
<b>5.4. CONCLUZII .....</b>	<b>43</b>
<b>CONCLUZII .....</b>	<b>44</b>
1. <b>CONCLUZII GENERALE .....</b>	<b>44</b>
2. <b>CONTRIBUȚII ORIGINALE .....</b>	<b>44</b>
3. <b>PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR .....</b>	<b>45</b>
4. <b>DISEMINAREA REZULTATELOR .....</b>	<b>46</b>
<b>BIBLIOGRAFIE .....</b>	<b>49</b>

## Index de figuri

Fig. 1.1 - Manșon de înghețare rigid cu circulație de azot lichid .....	10
Fig. 1.2 - Izolarea cu două dopuri de gheață a unor elemente ale instalației.....	13
Fig. 2.1 - Transferul de căldură de la apa aflată într-o conductă către azotul lichid din dispozitivul de înghețare.....	14
Fig. 2.2 - Jachete de înghețare poziționate pe conducte fider.....	16
Fig. 3.1 - Căldura transferată pe durata procesului de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale.....	17
Fig. 3.2 - Dimensionarea domeniului de analiză.....	21
Fig. 3.3 - Evoluțiile în timp ale lungimilor depunerilor de gheață în interiorul conductei pe parcursul simulării 3D .....	23
Fig. 3.4 - Evoluția în timp a procentului de obturare cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 pe parcursul simulării 3D.....	23
Fig. 3.5 - Variația în timp a temperaturii apei în punctul de referință pe parcursul simulării ..	23
Fig. 3.6 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele zonei de înghețare.....	23
Fig. 4.1 - Sistemul de supraveghere video pentru urmărirea formării dopului de gheață (reprezentare izometrică).....	26
Fig. 4.2 - Momentul formării primare a dopului de gheață .....	27
Fig. 4.3 – Evoluțiile în timp ale lungimilor depunerilor de gheață în interiorul conductei cu Dn 200 până la momentul formării primare a dopului .....	27
Fig. 4.4 – Evoluția în timp a procentului de obturare cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 .....	28
Fig. 4.5 - Variația în timp a temperaturii apei în punctul de referință pe parcursul încercării ..	28
Fig. 4.6 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele dispozitivului de înghețare .....	28
Fig. 4.7 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele dispozitivului de înghețare pe parcursul aplicației experimentale și în modelul ANSYS Fluent.....	29
Fig. 4.8 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la 100 mm de capetele dispozitivului de înghețare pe parcursul aplicației experimentale și în modelul ANSYS Fluent.....	29
Fig. 5.1 - Depunerile de gheață pe peretele interior al conductei cu Dn 200 (temperatura inițială a apei de 20°C) la finalul simulării, t = 94 min .....	31
Fig. 5.2 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 200 la o temperatură inițială a apei de 25°C, după 106 minute.....	32
Fig. 5.3 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 300 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 156 minute.....	33
Fig. 5.4 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 400 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 221 minute.....	34
Fig. 5.5 - Configurația domeniului de analiză a obturării unei conducte orizontale cu două dopuri de gheață.....	35
Fig. 5.6 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 200 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 73 de minute .....	36
Fig. 5.7 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 300 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 138 de minute .....	37

Fig. 5.8 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 400 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 208 minute .....	37
Fig. 5.9 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 500 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 251 de minute .....	38
Fig. 5.10 - Configurația domeniului de analiză a obturării unei conducte orizontale cu trei dopuri de gheață.....	39
Fig. 5.11 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 600 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 298 de minute .....	40
Fig. 5.12 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 700 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 295 de minute .....	41
Fig. 5.13 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 800 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 275 de minute .....	42

### *Index de tabele*

Tabelul 2.1 Valori ale presiunii formate la creșterea în lungime a dopului de gheață în volumul de lichid al unei conducte cu Dn 200, calculate pentru o lungime a conductei de 15 metri.....	16
Tabelul 3.1 Variația conductivității termice echivalente a apei în funcție de temperatură .....	19
Tabelul 3.2 Valorile echivalente ale conductivității termice a apei pentru etapele de răcire de la 15°C la 0°C.....	22
Tabelul 4.1 Coeficienți de corelație între valorile temperaturilor obținute prin cele două metode (experimentală și simulare CFD).....	29
Tabelul 5.1 Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	31
Tabelul 5.2 Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 25°C .....	32
Tabelul 5.3 Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 300 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	33
Tabelul 5.4 Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 400 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	34
Tabelul 5.5 Parametrii pentru modelarea obturării cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 500 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C.....	38
Tabelul 5.6 Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 600 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	40
Tabelul 5.7 Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 700 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	41
Tabelul 5.8 Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 800 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C .....	42

*Cuvinte cheie:* dop de gheață, înghețare criogenică, conductă orizontală, azot lichid, metoda volumelor finite, ANSYS Fluent.

---

## INTRODUCERE

---

### 1. *Actualitatea și oportunitatea tezei de doctorat*

Potențialul pentru defectare și problemele ce se ivesc din apariția fenomenului de îmbătrânire pot să crească pe măsură ce din ce în ce mai multe instalații se apropie de sfârșitul duratei proiectate de viață. În cazul centralelor nuclear-electrice, majoritatea problemelor legate de îmbătrânirea SSC (Sisteme, Structuri și Componente) apar după 20 de ani.

Astfel, în instalațiile centralelor nucleare a început să se contureze oportunitatea utilizării metodei înghețării criogenice a conductelor, datorită unei serii de avantaje pe care această tehnologie le prezintă:

- Se reduce durata intervenției propriu-zise: a pregătirii pentru intervenție, a staționării obiectivului și a timpului necesar pentru repunerea în funcțiune;
- Se elimină costurile transferării și stocării lichidului din rețeaua sistemului sau instalației.

### 2. *Obiectivele de studiu*

În cadrul acestei lucrări s-a urmărit dezvoltarea unui model de calcul folosind programul CFD ANSYS Fluent 2019 R3 pentru simularea procesului de obturare cu dop de gheață a conductelor orizontale fără curgerea agentului de lucru (apa) care să răspundă următoarelor cerințe:

- Corelarea rezultatelor obținute din modelare cu cele obținute experimental pentru conducta cu Dn 200;
- Aplicarea modelului validat experimental în dezvoltarea unor aplicații pentru conducte cu diametru nominal mai mare (Dn 300 – Dn 800).

### 3. *Prezentarea generală a conținutului lucrării*

În primul capitol al lucrării s-au prezentat aspecte generale privind tehnologia de separare a unui tronson de conductă dintr-o instalație industrială prin obturarea cu unul sau mai multe dopuri de gheață în vederea desfășurării unor lucrări de mentenanță și s-au stabilit actualitatea și oportunitatea studierii domeniului. Sunt descrise domeniile de aplicabilitate ale acestei tehnologii, avantajele utilizării sale, echipamentele folosite și sunt detaliate etapele aplicării tehnologiei de lucru pe durata intervenției.

În cel de-al doilea capitol se analizează aspectele de transfer termic ale procesului și se prezintă primă metodă de calcul teoretic a timpului necesar pentru obturarea cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200, agentul de lucru fiind apă în regim staționar și a necesarului de azot lichid. De asemenea, se identifică o serie de preocupări tehnice și practice privind folosirea tehnicii în instalațiile industriale: se identifică și se analizează efectele înghețării criogenice asupra materialului conductelor și se expune pe scurt calculul mecanic al eforturilor exercitate, precizându-se presiunile admisibile pentru țevi sudate. Se studiază problema implementării tehnologiei înghețării criogenice în industria energetică nucleară, cu trimitere la zona fiderelor și circuitul de apă de răcire la condensator. În final se trag unele concluzii privind formarea prin înghețare a unui dop rezistent la presiunea lichidului din conductă și se prezintă obiectivele de studiu ale acestei lucrări.

În cel de-al treilea capitol se descrie modelarea CFD folosind software-ul ANSYS Fluent a transferului termic pe durata procesului de solidificare a agentului de lucru din conductă până la obturarea cu dop de gheață.



În cea de-a patra parte se prezintă un experiment de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 în absența curgerii agentului de lucru realizat cu scopul verificării și validării modelului de calcul și a rezultatelor obținute prin simularea CFD.

Cea de-a cincea parte tratează, într-un prim subcapitol, problema obturării cu un dispozitiv de înghețare. Se analizează obturarea cu dop de gheață a unei conducte: cu Dn 200 la temperaturi ale agentului de lucru de 20°C și 25°C și cu Dn 300 și Dn 400 la o temperatură a agentului de lucru de 20°C. Pentru fiecare caz în parte se expun modelarea înghețării și rezultatele obținute cu privire la momentul formării primare a dopului de gheață, curenții de convecție naturală ai agentului de lucru vehiculat în momentul formării primare a dopului de gheață, depunerile de gheață pe peretele interior al conductei, variația temperaturii apei pe parcursul obturării cu dop de gheață, variația în timp a temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele zonei de înghețare. Se realizează un studiu comparativ al rezultatelor și se estimează necesarul de azot lichid pentru obturarea cu un dop de gheață a conductelor orizontale cu Dn 200, Dn 300 și Dn 400 având ca agent de lucru apă în regim staționar. În mod similar, se studiază obturarea cu două dispozitive de înghețare, pentru conducte cu Dn 200, Dn 300, Dn 400 și Dn 500. Se studiază obturarea cu trei dispozitive de înghețare pentru conducte cu Dn 600, Dn 700, Dn 800 și se face un studiu comparativ.

În ultimele două capitole ale acestei teze sunt prezentate concluziile generale ale lucrărilor, contribuțiile originale ale autorului și sunt detaliate perspectivele de continuare a cercetărilor.

#### 4. *Perspective de continuare a lucrărilor*

- Analiza efectelor fierberilor peliculare și nucleice asupra transferului termic în interiorul dispozitivului de înghețare;
- Dezvoltarea de dispozitive criogenice pentru conducte de dimensiuni mai mari;
- Eficientizarea procesului de obturare a conductelor prin dimensionarea compartimentelor destinate azotului lichid ale dispozitivelor de înghețare în funcție de cerințele fiecărei aplicații propriu-zise;
- Eficientizarea procesului de obturare cu mai multe dopuri de gheață prin determinarea distanțelor optime de instalare a dispozitivelor criogenice pe conductă;
- Controlul formării dopurilor de gheață prin varierea debitului de azot lichid injectat în dispozitivele criogenice;
- Analiza structurală a forțelor exercitate de dezvoltarea dopurilor de gheață asupra conductei;
- Aplicarea metodelor de calcul validate experimental în cercetarea obturării cu dop de gheață a conductelor verticale;
- Aplicarea tehnologiei pe conducte nemetalice.

#### 5. *Observații*

- Toate programele software și sistemele de operare folosite pe parcursul cercetării au avut licență de utilizare (Microsoft Windows, Microsoft Office și ANSYS Fluent 2019 R3);
- Experimentele au fost organizate și executate astfel încât să nu fie afectate sănătatea personalului operativ, avându-se în vedere permanent protecția mediului înconjurător.

### 1.1. ASPECTE ALE OBTURĂRII UNEI CONDUCTE PRIN FORMAREA UNUI DOP DE GHEAȚĂ

#### 1.1.1. Considerații generale

În orice instalație industrială proprietățile materialelor se deteriorează pe durata funcționării din cauza solicitărilor la care sunt supuse componentele. Potențialul pentru defectare și problemele ce se ivesc din apariția fenomenului de îmbătrânire pot să crească pe măsură ce din ce în ce mai multe instalații se apropie de sfârșitul duratei proiectate de viață. În cazul instalațiilor energetice nucleare, metodele de izolare a zonei afectate sunt limitate și presupun de obicei dezafectarea unei secțiuni mari din instalație ori a întregului sistem.

#### 1.1.2. Avantajele tehnicii obturării cu dop de gheață

Înghețarea criogenică este o tehnică eficientă din punct de vedere economic folosită pentru solidificarea lichidului dintr-o conductă pentru a forma un dop rezistent la presiune în scopul izolării unor porțiuni ale unei instalații hidraulice ce nu pot fi separate de restul circuitului prin alte metode. Se facilitează astfel desfășurarea unor activități de mentenanță ori modificări ale rețelei fără a fi necesară drenarea sau dezafectarea întregului sistem. Prin reducerea duratei intervenției se reduce durata de staționare a obiectivului și implicit efortul financiar al solicitantului.

#### 1.1.3. Obturarea conductelor prin înghețare criogenică

##### 1.1.3.1. Dispozitivul de înghețare

Metoda presupune aplicarea unui manșon pe exteriorul conductei în zona aleasă pentru obturarea curgerii (Fig. 1.1 [1]) având la interior un spațiu inelar destinat vaporizării continue a unui agent frigorific injectat în stare lichidă ( $\text{CO}_2$  sau  $\text{N}_2$ ) [2].



Fig. 1.1 - Manșon de înghețare rigid cu circulație de azot lichid

Agentul frigorific extrage căldură din pereții manșonului, din peretele conductei și din faza lichidă din conductă favorizând depunerea gheții în straturi succesive, până la obturarea completă a secțiunii conductei.

##### 1.1.3.2. Agentul frigorific

În mod uzual, agentul frigorific folosit pentru aplicațiile de obturare cu dop de gheață a conductelor cu diametrul nominal ( $D_n$ ) mai mic de 50 mm este  $\text{CO}_2$  lichefiat, respectiv  $\text{N}_2$  lichefiat pentru conductele cu diametrul nominal până la 1220 mm.

### *1.1.3.3. Înghețarea fluidului într-o porțiune de conductă*

Înghețarea fluidului într-o porțiune de conductă se poate produce în urma unui proces combinat (conducție și convecție) de transfer de căldură în care rolul predominant revine curenților de convecție. Intensitatea procesului de transmitere a căldurii prin convecție depinde în mare măsură de mișcarea de amestec a fluidului. Intensificarea procesului de transfer de căldură impune accelerarea mișcării ca rezultat al unei cauze externe, proces denumit convecție forțată.

## 1.2. ISTORICUL TEHNOLOGIEI DE FORMARE CONTROLATĂ A DOPURILOR DE GHEAȚĂ PENTRU OBTURAREA UNUI TRONSON DE CONDUCTĂ

### **1.2.1. Anii 1940-1980**

Începând cu perioada anilor 1940, metoda înghețării criogenice a conductelor a început să fie folosită în SUA atât în instalațiile din industria energetică cât și în cele din industria de apărare. Mai târziu, tehnologia a fost adaptată pentru teste hidraulice de rezistență și etanșitate a sistemelor de conducte, în special a traseelor îngropate pentru localizarea scurgerilor [3].

### **1.2.2. După anul 1980**

În Marea Britanie (Universitatea din Southampton) a fost demarat un program (ce funcționează și în prezent) pentru cercetarea fundamentală și aplicativă a criogeniei. S-au studiat aspectele termodinamice ale formării dopurilor de gheață în interiorul conductelor verticale și orizontale confecționate din diferite materiale.

### **1.2.3. Preocupări în țara noastră**

Tehnologia a fost aplicată procedural la Unitatea 1 de la Cernavodă în zona fiderilor de intrare/ieșire canal combustibil. S-a încercat remedierea unor probleme identificate în circuitul de apă de răcire la condensator prin obturarea conductei cu trei dopuri de gheață a conductei cu Dn 600. Intervenția nu s-a finalizat cu succes; timpul de staționare al instalației a fost mare iar la finalul intervenției a fost identificată deformarea plastică a peretelui conductei în zona dispozitivelor de înghețare.

## 1.3. PROCEDURI DE PLANIFICARE ȘI DESFĂȘURARE ÎN SIGURANȚĂ A INTERVENȚIEI TEHNOLOGICE

### **1.3.1. Planificarea intervenției tehnologice**

Încă din momentul planificării intervenției trebuie luate în considerare elemente și parametri specifici de proces și de examinarea conductei și a instalației din care face parte, precum și amplasarea suporturilor și reazemelor în vederea alegerii poziției optime pentru instalarea dispozitivului de înghețare.

### **1.3.2. Siguranța personalului și măsurile de protecție a muncii**

La formarea și menținerea unui dop de gheață, există riscuri atât pentru personalul operativ cât și pentru echipamentele instalației ca urmare a acțiunii substanțelor folosite în proces și a condițiilor de lucru. Se impune astfel întocmirea unui plan de acțiune pentru tehnicienii implicați în proces.

### **1.3.3. Alte măsuri de precauție**

#### *1.3.3.1. Măsuri de precauție pentru personal*

Se impune purtarea de haine și echipamente de protecție adecvate lucrului cu lichide criogenice. Încăperea în care se desfășoară intervenția trebuie ventilată corespunzător, iar nivelul concentrației de oxigen din aer trebuie măsurat permanent.

#### *1.3.3.2. Măsuri de precauție pentru echipament*

Activitatea de obturare a conductelor cu dop de gheață fiind supravegheată și controlată, se impune o serie de verificări pe toată durata desfășurării, atât în faza de pregătire cât și pe durata intervenției propriu-zise.

### **1.3.4. Etapele obturării cu dop de gheață a unei conducte**

#### *1.3.4.1. Identificarea zonei optime pentru montarea dispozitivului de înghețare*

Dopul de gheață nu ar trebui să fie localizat în fittinguri, vane sau alte componente de exploatare. De asemenea, nu este recomandat ca dopul de gheață să se formeze într-o zonă de sudură a conductei și se recomandă efectuarea unei inspecții vizuale prin metode neinvazive a respectivului segment de conductă, înaintea începerii operațiunilor de răcire și înghețare [4]. Este de preferat obturarea unui tronson orizontal de conductă pentru a se evita complicațiile ce apar în conductele verticale din cauza curenților de convecție mult mai pronunțați, ce pot îngreuna procesul de transfer de căldură.

#### *1.3.4.2. Determinarea tipului și necesarului de agent frigorific pentru desfășurarea lucrărilor*

Determinarea tipului și cantității necesare de agent frigorific pentru desfășurarea lucrărilor se face ținând cont de o serie de factori: proprietățile tronsonului de conductă ce urmează a fi supus intervenției; proprietățile agentului de lucru din conductă; condițiile mediului ambiant, etc.

#### *1.3.4.3. Pregătirea echipamentului tehnologic necesar desfășurării intervenției*

Dispozitivul de înghețare trebuie izolat corespunzător pentru a se evita transferul de căldură între agentul frigorific și mediul înconjurător. În ceea ce privește temperatura, limitele normale specificate în literatură sunt: condiții de mediu <43°C; temperatura lichidului vehiculat în conductă <107°C. Dacă temperatura lichidului vehiculat în conductă este cu mult mai mare decât temperatura mediului ambiant trebuie redusă la o valoare cât mai apropiată de temperatura mediului înconjurător înainte de a începe procesul de obturare cu dop de gheață.

#### *1.3.4.4. Formarea dopului de gheață*

În cazul apei, formarea dopului de gheață presupune, în mod tipic, circularea de azot lichid în manșoane care învelesc conducta în zona aleasă pentru obturarea conductei și constituie dispozitivul de înghețare (Fig. 1.2).



Fig. 1.2 - Izolarea cu două dopuri de gheață a unor elemente ale instalației

Înainte de începerea aplicației, conducta trebuie bine dezaerisită, orice acumulare de aer la nivelul de sus al conductei împiedicând formarea dopului pe toată circumferința conductei. În spațiul inelar din interiorul manșonului, azotul lichid extrage căldură din pereții manșonului, din peretele conductei și din faza lichidă din conductă. Căldura absorbită de azotul lichid evaporă o parte din azot și este transportată afară din manșon de azotul gazos. La ieșirea din orificiile de evacuare vaporii de azot au maxim  $-193^{\circ}\text{C}$  [2] [5]. Pe timpul formării dopului de gheață lichidul ar trebui să fie staționar. Există un debit critic, respectiv un diametru al conductei peste care este imposibil să se realizeze o obturare totală a conductei [4]. În cazul obturării cu mai multe dopuri de gheață a conductelor cu  $D_n \geq 350$  mm distanța între dopuri poate fi mai mare sau egală cu diametrul nominal al conductei. Pentru conducte cu  $D_n \leq 350$  mm distanța minimă între dopurile de gheață este de  $4 \cdot D_n$ .

#### 1.3.4.5. Menținerea dopului de gheață

Temperatura peretelui exterior al tronsonului de conductă supus intervenției trebuie monitorizată constant pe parcursul procesului pentru a se confirma integritatea structurală a dopului de gheață.

#### 1.3.4.6. Topirea dopului de gheață

După finalizarea operațiunilor de reparare efectuate asupra conductei, se drenează azotul lichid din manșonul de înghețare concomitent cu reumplerea instalației în aval de dopul de gheață și egalizarea presiunilor agentului de lucru. Dispozitivul de înghețare se îndepărtează pentru a permite începerea operațiunii de topire accelerată a dopului. Dopul de gheață trebuie topit accelerat de pe o singură parte a conductei pentru a se permite pornirea treptată a curgerii agentului de lucru. Nu se folosesc flăcări deschise, pentru a se evita deteriorarea conductei.

### 1.4. CONCLUZII

- Înghețarea criogenică este o tehnică eficientă din punct de vedere economic, folosită pentru solidificarea lichidului dintr-o conductă pentru a forma un dop rezistent la presiune în scopul izolării unor porțiuni ale unei instalații hidraulice ce nu pot fi separate de restul circuitului prin alte metode, cum ar fi utilizarea robinetelor.
- Metoda înghețării criogenice a conductelor în scopul desfășurării de activități de reparare ori mentenanță poate fi folosită cu succes în instalațiile nucleare, deoarece acestea sunt de obicei prevăzute cu un număr mic de vane și robinete; din această cauză metodele de izolare a zonei afectate prin robinete/by-pass-uri în vederea desfășurării de activități de mentenanță ori modificări ale rețelei sunt limitate și presupun de obicei drenarea sau dezafectarea unei secțiuni mari din instalație ori a întregului sistem.

---

**Capitolul 2. STUDIUL FORMĂRII PRIN ÎNGHEȚARE CRIOGENICĂ A UNUI DOP  
REZISTENT LA PRESIUNEA LICHIDULUI DINTR-O CONDUCTĂ A  
CIRCUITULUI HIDRAULIC AL CNE**

---

**2.1. MODELAREA TEORETICĂ A ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE A UNEI CONDUCTE  
ORIZONTALE**

Un exemplu de model de calcul a fost prezentat de H. Tinoco în lucrarea "Cryogenic pipe freezing – a theoretical model" în anul 1988 [6]. Înghețarea apei dintr-o conductă este caracterizată de problema înghețării stratului limită termic, aflat într-un spațiu închis și într-o continuă evoluție spre axul conductei, pentru care nu există o soluție analitică exactă [7] [8].

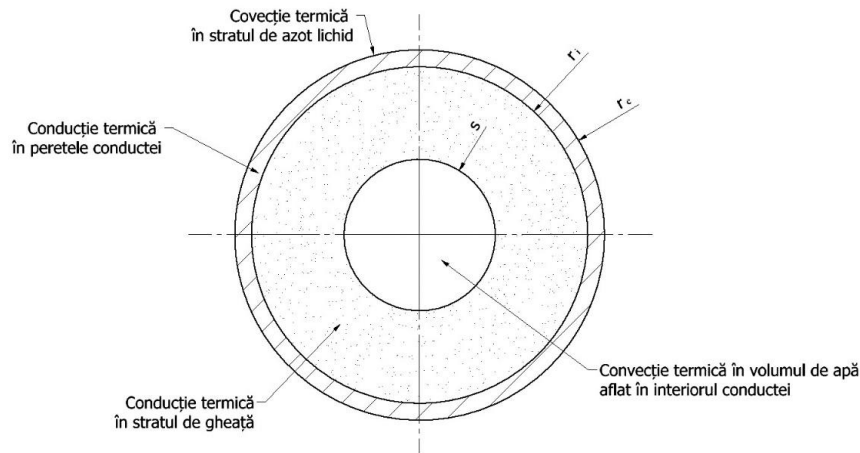


Fig. 2.1 - Transferul de căldură de la apa aflată într-o conductă către azotul lichid din dispozitivul de înghețare

Transferul de căldură de la apa aflată într-o conductă către azotul lichid ce o înconjoară (Fig. 2.1) este [7]

$$\dot{Q}' = 2\pi k(T_a - T_{LN_2}) = -2\pi\rho c_{LS}s \frac{ds}{dt}, \quad (2.1)$$

unde:

- $\dot{Q}'$  – fluxul termic unitar liniar, [W/m];
- $k$  – coeficientul global de transfer de căldură, dat de relația (2.2), [W/m · K];
- $T_a$  – temperatura apei din conductă, [K];
- $T_{LN_2}$  – temperatura azotului lichid, [K];
- $\rho$  – densitatea apei, [kg/m<sup>3</sup>];
- $c_{LS}$  – căldura latentă de solidificare a apei, [J/kg];
- $s$  – raza interioară a regiunii delimitate de poziția stratului limită la un anumit moment, [m];
- $t$  – durata de timp, [s].

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{r_e \alpha_{LN_2}} + \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{\lambda_c} + \frac{\ln \frac{r_i}{s}}{\lambda_g} + \frac{1}{s \alpha_a}, \quad (2.2)$$

unde:

- $r_i$  – raza interioară a conductei, [m];
- $r_e$  – raza exterioară a conductei, [m];

- $\alpha_{lN_2}$  – coeficientul de convecție al azotului lichid,  $[W/m^2 \cdot K]$ ;
- $\lambda_c$  – coeficientul de conductivitate termică a oțelului din care este confecționată conducta,  $[W/m \cdot K]$ ;
- $\lambda_g$  – conductivitatea termică a gheții,  $[W/m \cdot K]$ ;
- $\alpha_a$  – coeficientul de convecție al apei,  $[W/m^2 \cdot K]$ .

## 2.2. PROBLEME APĂRUTE ÎN TIMPUL ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE A CONDUCTELOR

### *Alunecarea dopului de gheață*

Alunecarea dopului de gheață poate apărea numai din cauza unei alimentări necorespunzătoare a dispozitivului de înghețare cu agent frigorific sau a începerii intervenției asupra conductei înainte de formarea completă și de stabilizarea dopului de gheață.

### *Deformarea conductei și ruperea fragilă*

Studiile au arătat că, deși proprietățile mecanice ale materialului se modifică odată cu temperatura, nici chiar repetarea sistematică a mai multor cicluri de înghețare-dezghetare nu a afectat permanent oțelul conductei, acesta recăpătându-și proprietățile când a fost readus la temperaturile normale de lucru [9]. Scăderea temperaturii peretelui conductelor confecționate din aliajele feritice influențează proprietățile materialului, iar comportarea la rupere se modifică din ductilă în fragilă; traversarea acestui prag are loc într-un interval de temperatură mic [10] [11]. Prezența unor defecte de sudură, variațiile de grosime ale peretelui conductei sau alte defecte de fabricație contribuie la propagarea fisurilor. Fisurile mai pot fi provocate de șocurile produse în timpul intervenției personalului operativ [12] [13] [14] [15].

## 2.3. EFECTELE ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE ASUPRA CONDUCTELOR

### **2.3.1. Efectele înghețării criogenice asupra materialului conductelor**

Limitele de elasticitate și de curgere, respectiv rezistența la deformare plastică, în unele cazuri și duritatea, rezistența la oboseală și modulul de elasticitate al metalelor, cresc cu scăderea temperaturii. La temperaturi negative însă, dintre caracteristicile mecanice, importanță deosebită prezintă tenacitatea (ductilitatea), sensibil micșorată, precum și tendința de rupere fragilă (sensibilitatea la efectul de creștătură) a metalelor și aliajelor. Acestea sunt influențate hotărâtor de conținutul de elemente de aliere, de gradul de deformare (ecruisare), de tratamentele termice aplicate oțelurilor, fontelor și aliajelor neferoase destinate utilizării în criogenie [16].

### **2.3.2. Calculul mecanic al eforturilor exercitate asupra conductei**

#### *Calculul presiunii exercitate de formarea dopului de gheață*

Înainte de demarării unei operațiuni ce presupune obturarea cu dop de gheață a unei conducte, se impune cunoașterea (prin calcul) atât a valorilor presiunii formate de evoluția dopului de gheață cât și a presiunilor admisibile pentru conducta supusă intervenției. În Tabelul 2.1 se prezintă exemple de valori ale presiunii formate la creșterea în grosime a dopului de gheață în volumul de lichid al unei conducte cu  $D_n = 200$  ( $D_e = 219$  mm,  $D_i = 203$  mm) calculate pentru o lungime a conductei de 15 metri.

**Valori ale presiunii formate la creșterea în lungime a dopului de gheață în volumul de lichid al unei conducte cu Dn 200, calculate pentru o lungime a conductei de 15 metri**

Creșterea în grosime a dopului de gheață [mm]	1	5	10	15	20	30	40	50	75	100
Presiunea formată în volumul de lichid [bar]	0.96	4.78	9.56	14.34	19.13	28.7	38.3	47.91	71.98	96.13

## 2.4. IMPLEMENTAREA TEHNOLOGIEI ÎNGHEȚĂRII CRIOGENICE ÎN INDUSTRIA ENERGETICĂ NUCLEARĂ

### 2.4.1. Zona fiderelor

Ansamblele jachete de înghețare au fost gândite numai ca mijloace de izolare în vederea întreținerii canalelor de combustibil, fiecare fider având prevăzut câte un ansamblu înghețare constituit dintr-o jachetă, tubing pentru aducție azot lichid și tubing pentru inserare termocuplu. Această metodă este folosită pentru obturarea cu dop de gheață a țevilor fider în vederea izolării tuburilor de presiune, individual.



Fig. 2.2 - Jachete de înghețare poziționate pe conducte fider

Jachetele de înghețare sunt montate pe țeava fider, sprijinindu-se pe sudura de montaj dintre fiderile inferioare și cele superioare (Fig. 2.2) [17].

### 2.4.2. Circuitul de apă de răcire la condensator

În anul 2001 s-a încercat remedierea unor problemele identificate la conducta orizontală de apă de răcire (DN 24", 600 mm) a U1 Cernavodă. Soluția propusă presupunea formarea a două dopuri de gheață suplimentare pentru reducerea debitului în zonă astfel încât prin realizarea unui al treilea dop de gheață să se obțină oprirea curgerii. Intervenția propriu-zisă nu s-a finalizat cu succes, după încheierea intervenției și demontarea dispozitivelor de înghețare, a fost identificată deformarea plastică a peretelui conductei în zona dispozitivelor de înghețare.

## 2.5. CONCLUZII

- În industria de specialitate s-a ridicat o serie de preocupări tehnice atât privind modelarea teoretică a transferului termic în timpul obturării cu dop de gheață a conductelor cât și privind o serie de probleme specifice procesului;
- S-au cercetat consecințele implementării și utilizării necorespunzătoare a intervenției tehnologice de obturare a conductelor prin înghețare criogenică, s-au identificat și analizat efectele înghețării criogenice asupra materialului conductelor și s-a prezentat un model de calcul mecanic al eforturilor exercitate.



---

### Capitolul 3. MODELE DE CALCUL PENTRU OBTURAREA CU DOP DE GHEAȚĂ A UNEI CONDUCTE ORIZONTALE CU DN 200 ÎN APĂ AFLATĂ ÎN STARE DE REPAUS

---

#### 3.1. NECESITATEA UTILIZĂRII UNUI MODEL DE CALCUL

Tehnologia de obturare a conductelor cu dopuri de gheață prin aplicarea de jachete criogenice pe exteriorul conductei reprezintă un subiect atractiv de cercetare atât pentru numeroase instituții specializate din întreaga lume cât și pentru companiile de profil. În general aceste cercetări urmăresc: determinarea costului de oportunitate și/sau eficientizarea costurilor, eficientizarea tehnologiei, dezvoltarea domeniilor de aplicabilitate, eliminarea riscurilor și diseminarea avantajelor utilizării tehnologiei.

Obiectivul modelelor de calcul prezentate în acest capitol este de a determina timpul și cantitatea de azot lichid necesare obturării cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru staționar (apa) de 15°C, pentru un debit constant de agent criogenic injectat în dispozitivele de înghețare. Se au în vedere două variante de calcul:

- *Prima variantă* presupune utilizarea modelului simplificat Hernan Tinoco [6] (prezentat în paragraful 2.1) pentru determinarea timpului necesar formării primare a dopului de gheață. Considerând timpul calculat se poate determina necesarul de azot lichid;
- *A doua variantă* presupune realizarea unei analize nestaționare CFD (folosind programul ANSYS Fluent) a transferului termic pe durata procesului de obturare prin înghețare criogenică a unei conducte orizontale în aceleași condiții ca în prima variantă de calcul.

#### 3.2. APLICAȚIE DE CALCUL NUMERIC

##### 3.2.1. Aparat matematic

La începutul procesului de înghețare criogenică fluxul radial de căldură dinspre apă către exteriorul conductei implică cinci procese distincte: transferul conductiv de căldură în apa din conductă, transferul convectiv în apa din conductă și către peretele interior al conductei, transfer conductiv prin peretele conductei, transferul convectiv de căldură de la peretele exterior al conductei la azotul lichid și schimbarea de fază (fierberea) a azotului lichid (Fig. 3.1).

Pe măsură ce straturile de gheață se depun în zona de influență a dispozitivului, apare un al șaselea proces, de transfer conductiv prin stratul de gheață. Din momentul în care încep să se depună pe peretele interior al conductei și până la formarea completă a dopului, straturile de gheață acționează ca un izolator, încetinind progresiv transferul termic radial către azotul lichid.

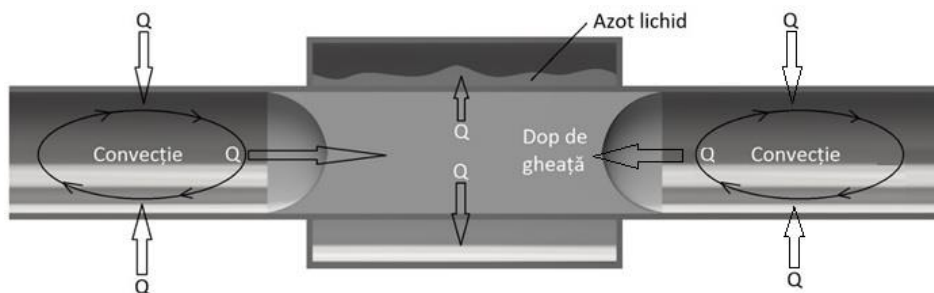


Fig. 3.1 - Căldura transferată pe durata procesului de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale

Înghițarea apei dintr-o conductă este caracterizată de problema înghițării stratului limită termic, aflat într-un spațiu închis și într-o continuă evoluție spre axul conductei, pentru care nu există o soluție analitică exactă. Se poate obține o soluție aproximativă în urma unei analize staționare ce presupune că transferul de căldură de la apă către gheață, la nivelul stratului limită termic aflat în mișcare, este constant.

Durata de timp  $t$ [s] în care dopul de gheață se formează primar este dată de relația [6]:

$$t = \frac{\rho_a \cdot c_{LS} \cdot r_i^2 \cdot C}{\lambda_g \cdot (T_a - T_{lN_2})}, \quad (3.1)$$

unde:

- $\rho_a$  – densitatea apei din conductă, [kg/m<sup>3</sup>];
- $c_{LS}$  – căldura latentă de solidificare a apei, [J/kg];
- $r_i$  – raza interioară a conductei, [m];
- $T_a$  – temperatura inițială a apei în conductă, [K];
- $T_{lN_2}$  – temperatura azotului lichid, [K];
- $C$  – constanta dată de relația [6]

$$C = \frac{1}{4} + \frac{\lambda_g}{2} \left( \frac{\ln \frac{r_e}{r_i}}{\lambda_c} + \frac{1}{r_e \alpha_{lN_2}} + \frac{2}{r_i \alpha_a} \right), \quad (3.2)$$

unde:

- $r_e$  – raza exterioară a conductei, [m];
- $\lambda_c$  – coeficientul de conductivitate termică al oțelului din care este confecționată conducta, [W/m · K];
- $\alpha_{lN_2}$  – coeficientul convectiv mediu de schimb de căldură al azotului lichid, [W/m<sup>2</sup> · K],

$$\overline{\alpha_{lN_2}} = 0,25 \cdot \sqrt[3]{\frac{\lambda''^2 \cdot c_p'' \cdot g(\rho' - \rho'')}{\nu''}}, \quad (3.3)$$

unde:

- $\lambda''$  – conductivitatea termică a filmului de vapori de azot;
  - $c_p''$  – căldura specifică a filmului de vapori de azot;
  - $g$  – accelerația gravitațională;
  - $\rho'$  – densitatea azotului lichid;
  - $\rho''$  – densitatea medie a filmului de vapori de azot;
  - $\nu''$  – viscozitatea cinematică medie a vaporilor de azot.
- $\alpha_a$  – coeficientul convectiv de schimb de căldură al apei, [W/m<sup>2</sup> · K],

$$\alpha_a = \overline{\alpha_a} = \frac{\lambda_{ech}}{r_i}.$$

Pentru calculul necesarului de azot lichid al aplicației trebuie determinată cantitatea totală de căldură transferată spre manșonul de înghețare. Conform ecuațiilor lui Fourier pentru calculul fluxului termic transferat printr-un perete solid și Newton pentru calculul convecției termice, căldura totală absorbită de dispozitivul de înghețare pe durata obturării cu dop de gheață este egală cu suma cantităților de căldură transferate în fiecare etapă a procesului în zona de influență a manșonului la care se adaugă căldura transferată în peretele conductei și mai apoi în volumul de agent de lucru.

### 3.2.2. Timpul necesar obturării cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 la temperatura agentului de lucru de 15°C

Considerând că fluxul termic constant de la nivelul suprafeței răcite a peretelui exterior al conductei va determina o scădere liniară a temperaturii apei în zona de influență a dispozitivului de înghețare (ce va fi ulterior confirmată experimental), coeficienții de transfer de căldură ai agentului de lucru din interiorul conductei pot fi calculați ca o valoare medie între valorile de temperatură atinse de apă înainte de înghețare. Etapele de referință ale temperaturii apei vor fi considerate valorile de 15°C, 10°C, 5°C și 0,5°C.

Rezultatele obținute sunt prezentate sintetizat în Tabelul 3.1.

Tabelul 3.1

#### Variația conductivității termice echivalente a apei în funcție de temperatură

Temperatura apei [°C]	Pr	Gr	$\varepsilon$	$\lambda_{ech}$ [W/m · K]
15	8,17	$26,8 \cdot 10^6$	18,62	10,93
10	9,45	$8,61 \cdot 10^6$	15,28	8,82
5	11,37	$1,3 \cdot 10^6$	10,86	6,17
0,5	13,55	$1,67 \cdot 10^5$	7,47	4,17

Conductivitatea termică echivalentă medie este

$$\overline{\lambda_{ech}} = 7,52 \text{ W/m} \cdot \text{K}. \quad (3.3)$$

Coeficientul mediu de convecție al apei se calculează cu relația

$$\alpha_a = \overline{\alpha}_a = \frac{\overline{\lambda_{ech}}}{r_i} = 74,1 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}. \quad (3.4)$$

Rezultă

$$C = 0,8074 ; \quad (3.5)$$

$$t_{max} = 3744,4 \text{ s}. \quad (3.6)$$

### 3.2.3. Necesarul de agent criogenic

Cantitatea totală de căldură absorbită de dispozitivul de înghețare pe durata obturării cu dop de gheață este egală cu suma cantităților de căldură transferate în fiecare etapă a procesului în zona de influență a manșonului la care se adaugă căldura transferată în peretele conductei și mai apoi în volumul de agent de lucru:

$$Q_t = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 ,$$

unde:

- $Q_t$  – căldura totală absorbită de dispozitivul de înghețare, [J];
- $Q_1$  – căldura necesară răcirii apei până la temperatura de 0°C, [J];
- $Q_2$  – căldura necesară înghețării apei aflate la temperatura de 0°C, [J];
- $Q_3$  – căldura necesară scăderii temperaturii gheții la valoarea medie de formare primară a dopului de gheață, [J];
- $Q_4$  – pierderile de căldură în peretele conductei și în agentul de lucru, [J].

Masa de azot lichid necesară pentru formarea primară a dopului de gheață:

$$m = N \cdot 2 \cdot m_{aN_2} ,$$

unde:

- $N$  – necesarul de moli de azot pentru realizarea primară a dopului de gheață,

$$N = \frac{Q_t}{C_{LVN_2}} = 2621,97 \text{ moli} ,$$

unde  $C_{LV_{N_2}} = 0,72 \text{ kJ/mol}$  – căldura latentă de vaporizare a azotului;  
 -  $m_{a_{N_2}} = 14 \text{ u}$  – masa atomică a azotului.

Rezultă

$$m = 73,4 \text{ kg.} \quad (3.7)$$

### 3.3. MODELARE CFD

Într-o analiză CFD, se realizează examinarea dinamicii unui fluid în conformitate cu proprietățile sale fizice, cum ar fi viteza, presiunea, temperatura, densitatea și viscozitatea. Pentru a genera soluția unui fenomen fizic din domeniul mecanicii fluidelor, fără compromisuri asupra exactității, aceste proprietăți trebuie luate în considerare simultan.

#### 3.3.1. Prezentarea programului de calcul

Suita de programe de calcul a soft-ului ANSYS permite interconectarea mai multor tipuri de calcul și analiză, fiind astfel un instrument indispensabil pentru toate aplicațiile industriale. Simulările CFD (Fluent, CFX etc.) sunt folosite cu succes pentru eficientizarea costurilor și a timpului de lucru în industriile: energetică, auto, aero-spațială, petrochimică, electrică și electronică, în medicină, în construcții, în sport etc.

#### 3.3.2. Metode de implementare a unui calcul CFD

Procesul de modelare numerică a unei aplicații CFD presupune parcurgerea a cinci etape: proiectarea CAD, discretizarea domeniului cu volume finite, definirea fizică, rezolvarea și etapa de post-procesare (de analiză a rezultatelor).

#### 3.3.3. Implementarea modelului geometric

##### 3.3.3.1. Introducere

Principalul obiectiv al acestei modelări CFD este de a calcula timpul necesar obturării cu dop de gheață a conductelor orizontale fără curgerea agentului de lucru (apa) pentru un debit constant de azot lichid injectat în dispozitivul de înghețare. Cele două procese de schimbare de fază (vaporizarea azotului lichid și înghețarea apei) nu pot fi simulate în același timp de programul de calcul, deoarece folosesc modele diferite de rezolvare a ecuațiilor ce descriu fenomenele caracteristice problemei studiate în funcție de modelele de turbulență și de fazele proceselor. Astfel, ele vor fi tratate separat în două etape, având avantajul de a reduce încărcarea programului și implicit a timpului total de calcul:

➤ În prima etapă se calculează fluxul termic unitar la nivelul peretelui exterior al conductei corespunzător zonei de fierbere a agentului frigorific și valorile conductivității termice echivalente ale apei pentru fiecare etapă de răcire parcursă până la atingerea temperaturii de înghețare;

➤ În cea de-a doua etapă, cu datele de transfer energetic calculate în prima etapă se modelează CFD folosind programul ANSYS Fluent solidificarea agentului de lucru din interiorul conductei.

##### 3.3.3.2. Modelarea geometriei domeniului de analiză a formării dopului de gheață cu programul ANSYS Fluent

Geometria modelului ales a fost implementată utilizând mediul de proiectare Design Modeler propriu programului de calcul ANSYS. S-a modelat 3D un tronson de conductă de 6 metri divizat în trei secțiuni (Fig. 3.2). La nivelul suprafeței exterioare a secțiunii centrale se aplică fluxul termic calculat în funcție de coeficientul mediu de transfer de căldură al azotului

lichid din interiorul dispozitivului de înghețare folosind relația (3.3). Se neglijează transferul termic între pereții exteriori ai celorlalte două secțiuni de conductă și mediul înconjurător.

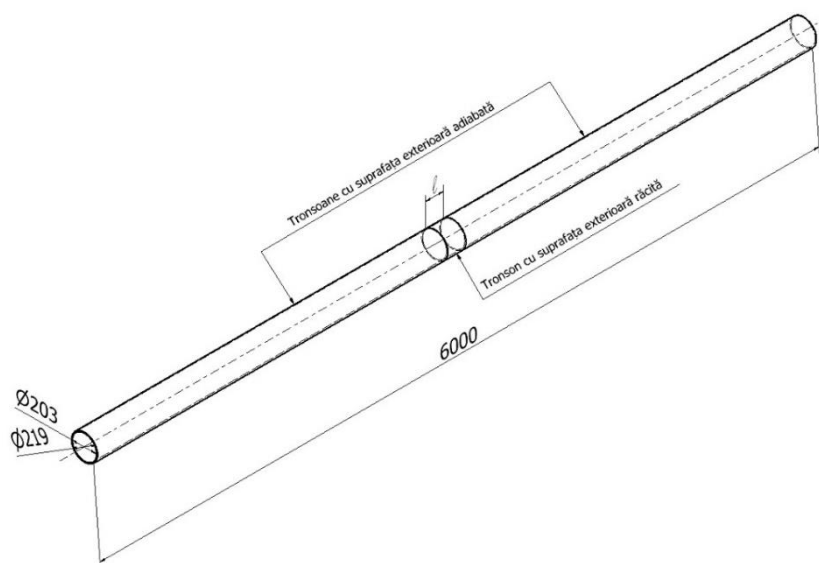


Fig. 3.2 - Dimensionarea domeniului de analiză

Variația temperaturii la nivelul peretelui exterior al conductei s-a calculat în 8 puncte: imediat lângă zona de înghețare, amonte și aval în pozițiile inferioară și superioară (4 puncte) și la 100 mm de zona de înghețare, amonte și aval în pozițiile inferioară și superioară (4 puncte). Calculul temperaturii apei s-a făcut într-un punct de referință aflat pe axa conductei la capătul amonte al volumului de fluid.

Discretizarea domeniului de calcul cu volume finite a fost realizată cu programul Meshing propriu suitei ANSYS. În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 684226 de elemente și 710236 de noduri.

### 3.3.4. Modelarea transferului termic în procesul de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 15°C

Modelele implementate în programul de calcul sunt: Multiphase – Volume of Fluid; Energy; Viscous-laminar; Solidification & Melting.

#### 3.3.4.1. Proprietățile fizice ale materialelor și mediului de lucru

Fiecărui domeniu implementat în programul de calcul (oțelul din care este confecționată conducta secțiunii de testare - oțel cu 0,1 % conținut de carbon, apă și gheață) i s-au atribuit proprietățile corespunzătoare în funcție de variațiile temperaturii procesului [18] [19] [20] [21].

#### 3.3.4.2. Condițiile inițiale și la limită

##### Condițiile inițiale

- Temperatura inițială a agentului de lucru: 15°C;
- Presiunea agentului de lucru: 2 bari.

##### Condițiile la limită

#### a. Pe pereții conductei în zona de înghețare

Conform ecuației fundamentale a lui Newton pentru convecția termică, fluxul termic unitar absorbit de volumul de azot lichid din interiorul dispozitivului de înghețare este

$$\dot{Q}'' = \overline{\alpha}_{LN_2} \Delta T_{15} = 177,96 \cdot 211 = 37549,28 \text{ W/m}^2, \quad (3.8)$$

unde  $\Delta T_{15}$  – potențialul transferului termic,  $\Delta T = T_a - T_{IN_2} = 211$  K.

- b. Pe celelalte suprafețe ale peretelui conductei se neglijează transferul termic între:
- conducta de testare și mediul înconjurător (în zonele libere care nu se află în zona de transfer a dispozitivului de înghețare și la capetele amonte și aval);
  - capetele amonte și aval ale volumului de fluid și mediul înconjurător.

### 3.3.4.3. Modelarea schimbării de fază

Programul de calcul ANSYS Fluent nu permite implementarea directă în modelul de calcul a valorilor adimensionale (numerele Grashof, Prandtl, Rayleigh etc.). În manualul ANSYS Fluent, pentru analiza transferului termic în cazul  $Ra > 10^8$  se recomandă obținerea unei soluții în două etape:

1. Într-o primă etapă de analiză staționară se calculează reducerea valorii accelerației gravitaționale în funcție de numărul Rayleigh, de proprietățile fluidului, de caracteristicile mediului de curgere și de potențialul transferului termic:

$$g = \frac{\overline{Ra} \cdot \bar{v} \cdot \bar{\alpha}}{\bar{\beta} \cdot \Delta T \cdot d_i^3} \cdot \varepsilon = f(Ra) = f(Gr \cdot Pr) \quad (3.9)$$

$$Gr = \frac{g \cdot \beta(T) \cdot \Delta T \cdot l^3}{\nu(T)^2} \quad (3.10)$$

Rezultatele obținute în prima etapă pentru calculul conductivităților termice echivalente ale apei pentru fiecare etapă a răcirii sunt prezentate centralizat în Tabelul 3.2.

Tabelul 3.2

Valorile echivalente ale conductivității termice a apei pentru etapele de răcire de la 15°C la 0°C

Temperatura apei [°C]	Pr	Gr	$\varepsilon$	$\lambda_{ech}$ [W/m · K]
15	8,17	$1,11 \cdot 10^6$	9,85	5,78
10	9,45	$3,56 \cdot 10^5$	8,08	4,66
5	11,37	$5,38 \cdot 10^4$	5,75	3,26
0,5	13,55	$6,93 \cdot 10^3$	3,95	2,2

2. În cea de-a doua etapă se inițiază analiza nestaționară ANSYS Fluent folosind valorile recalculate ale conductivităților termice ale agentului de lucru (în funcție de coeficientul  $\varepsilon$ ) și valorile pentru densitate, căldură specifică, conductivitate termică, vâscozitate dinamică, vâscozitate cinematică și coeficientul de dilatare volumică izobară.

### 3.3.5. Rezultate obținute

La o oră de la începutul simulării 3D temperaturile calculate pe peretele exterior al conductei au scăzut sub 0°C; momentul a marcat, de asemenea, formarea primară a dopului de gheață. Pentru stabilizarea dopului, simularea a continuat pe o durată de încă 34 de minute. Se prezintă evoluțiile în timp ale lungimilor și grosimilor straturilor de gheață pe parcursul simulării (Fig. 3.3, Fig. 3.4).

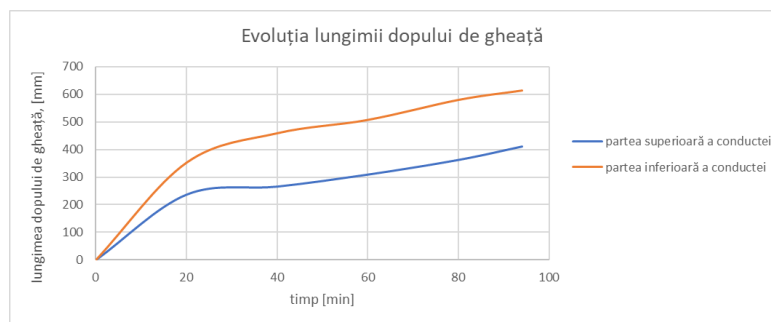


Fig. 3.3 - Evoluțiile în timp ale lungimilor depunerilor de gheață în interiorul conductei pe parcursul simulării 3D

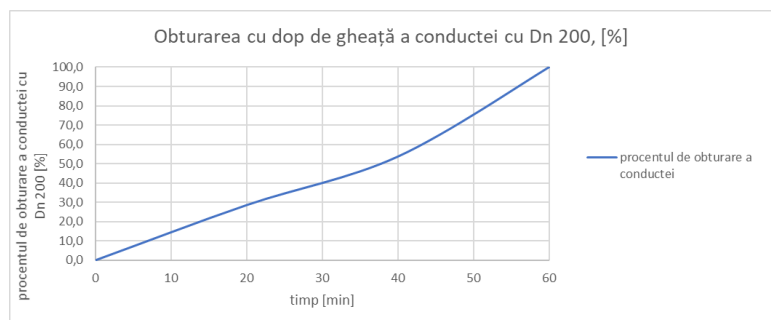


Fig. 3.4 - Evoluția în timp a procentului de obturare cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 pe parcursul simulării 3D

Reducerea temperaturii apei pe parcursul simulării a fost de  $5,1^{\circ}\text{C}$  (Fig. 3.5).

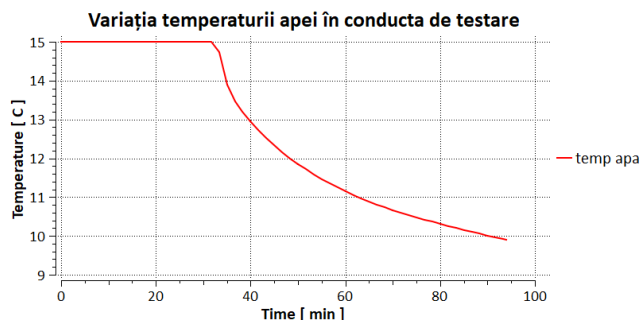


Fig. 3.5 - Variația în timp a temperaturii apei în punctul de referință pe parcursul simulării

Temperaturile calculate la cele două capete ale zonei de înghețare coincid datorită simetriei instalației analizate (Th3 - Th7 și Th4 - Th8) (Fig. 3.6). Răcirea peretelui inferior al conductei (Th4 și Th8) se produce brusc în primele 10 minute și are ulterior o evoluție liniară, iar după 94 de minute măsoară temperatura de  $-85,7^{\circ}\text{C}$ .

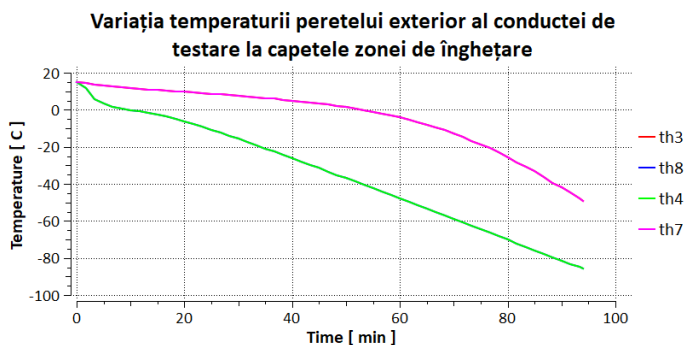


Fig. 3.6 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele zonei de înghețare

Pentru calculul necesarului de azot lichid se folosesc temperaturile medii ale peretelui conductei și ale apei culese pe parcursul simulării și metoda de calcul prezentată în paragraful 3.2.3. Rezultă că necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 200 având ca agent de lucru apă la temperatura de 15°C în stare de repaus este de 74,8 kg.

#### 3.4. CONCLUZII

- S-a elaborat modelul geometric pentru instalația de formare a dopului de gheață, s-a discretizat sistemul cu volume finite și ulterior s-a modelat formarea dopului de gheață în interiorul conductei folosind datele obținute în prima etapă de calcul.
- S-a obținut formarea primară a dopului de gheață după 60 de minute de la începutul simulării 3D. Simularea a continuat pe o durată de încă 34 de minute timp în care depunerile de gheață au evoluat în lungime și grosime.
- Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 200 având ca agent de lucru apă la temperatura de 15°C în stare de repaus este de 74,8 kg.



---

## **Capitolul 4. CERCETĂRI EXPERIMENTALE ALE OBTURĂRII CU DOP DE GHEAȚĂ A UNEI CONDUCTE ORIZONTALE CU Dn 200 ÎN ABSENȚA CURGERII APEI**

---

### 4.1. OBIECTIVELE CERCETĂRII

Experimentul are ca obiectiv obturarea cu un dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 fără curgerea agentului de lucru (apă, având o temperatură inițială de aproximativ 15°C) la un debit constant al agentului criogenic (azot lichid) injectat în dispozitivul de injectare. Pe parcursul încercării se vor urmări:

- Măsurarea și înregistrarea variației în timp a temperaturilor apei, ale conductei de testare (în câteva puncte de referință) și ale azotului lichid în dispozitivul de înghețare și la ieșirea din orificiul de evacuare al vaporilor;
- Evoluția în timp a geometriei depunerilor de gheață în interiorul conductei;
- Timpii necesari pentru formarea primară și stabilizarea dopului de gheață;
- Masa totală de azot lichid consumată pe întreaga durată a încercării.

### 4.2. DESCRIEREA INSTALAȚIEI ȘI ECHIPAMENTELOR EXPERIMENTALE

#### 4.2.1. Instalația experimentală

Încercarea prezentată a fost realizată în hala Stand Testare Elemente Combustibile a RATEN ICN Pitești pe instalația de testare dezvoltată în scopul elaborării tehnicilor de obturare cu dop de gheață a unui segment de circuit hidraulic (conductă orizontală) pentru derularea de activități de mentenanță. Bucla experimentală este proiectată să lucreze în circuit deschis și cuprinde o pompă de recirculare, un ansamblu de conducte și armături, un rezervor de apă de umplere-golire, o serie de robinete și dispozitive de măsurare (manometre și traductoare de presiune). Măsurarea presiunilor și a temperaturilor și înregistrarea lor se realizează cu un sistem digital de achiziție a datelor.

#### 4.2.2. Dispozitivul de înghețare

Dispozitivul de formare a dopului de gheață pentru obturarea tronsonului de conductă orizontală de diametru mare este, practic, un manșon dublu compartimentat alcătuit prin îmbinarea etanșă a două semicoliere [22]. După montarea semicolierelor dispozitivului pe exteriorul conductei, în zona unde se dorește să se formeze dopul de gheață se realizează practic un compartiment inelar destinat azotului lichid. Compartimentul pentru azot lichid este izolat termic în exterior de compartimentele vidate înglobate fiecare în semicolierele superior și respectiv, inferior.

#### 4.2.3. Dispozitivul de supraveghere video

Caracteristicile geometrice ale dopurilor de gheață rezultate în urma experimentelor efectuate pe secțiunea de testare cu Dn 200 variază în funcție de condițiile de desfășurare a încercărilor (temperatura apei recirculate și modul de injectare a azotului lichid în circuit) și de manevrele efectuate pe parcurs. Studiul evoluției depunerilor de gheață în zona de influență a manșonului facilitează culegerea de date utile procesului și îmbunătățirii modelelor de calcul

termic și constructiv ale dispozitivelor de înghețare în scopul dezvoltării de tehnologii destinate unor aplicații ce includ conducte orizontale de mari diametre (de până la Dn 800) [23].

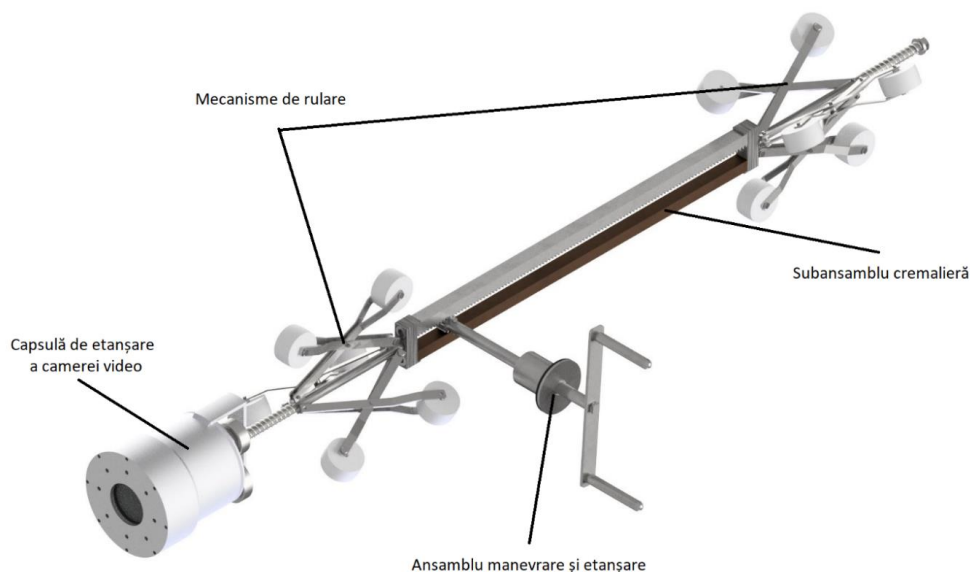


Fig. 4.1 - Sistemul de supraveghere video pentru urmărirea formării dopului de gheață (reprezentare izometrică)

În acest scop, s-a realizat proiectarea și execuția unui dispozitiv suport pentru o cameră video (Fig. 4.1). Dispozitivul se montează în interiorul conductei orizontale de testare și permite vizualizarea în timp real a formării straturilor de gheață ca rezultat al condițiilor de desfășurare ale aplicației și al manevrelor efectuate pe parcurs asupra vitezei de injectare a azotului lichid, cu scopul dezvoltării unei analize comparative cu rezultatele obținute pe cale teoretică privind diferitele stadii ale formării dopului de gheață.

#### 4.2.4. Echipamentul de măsurare

##### 4.2.4.1. Senzorii de temperatură

În cazul încercării descrise, pentru măsurarea variației temperaturii la nivelul peretelui conductei s-au amplasat termocupluri Fe-Constantan (având intervalul de măsură al temperaturii de  $-200 \div 780^{\circ}\text{C}$  și sensibilitatea de  $0,025 \div 0,063 \text{ mV}/^{\circ}\text{C}$ ):

- Imediat lângă zona de înghețare – la capătul amonte, în poziție superioară (Th3) și inferioară (Th4) și la capătul aval în poziție superioară (Th7) și inferioară (Th8);
- La 100 mm de zona de înghețare, la capătul amonte, în poziție superioară (cod termocuplu Th1) și inferioară (Th2) și la capătul aval, în poziție superioară (Th9) și inferioară (Th10);
- În compartimentul de azot lichid, introdus prin interiorul orificiului de evacuare, (Th5) și La ieșire din orificiul de evacuare vapori de azot (Th6).

Măsurarea temperaturii apei s-a făcut într-un punct de referință aflat pe axa conductei la capătul amonte al volumului de fluid.

##### 4.2.4.2. Traductoarele de presiune

Măsurarea presiunii agentului de lucru în bucla experimentală pe parcursul aplicației se face printr-un traductor de presiune montat în avalul secțiunii de testare. Suplimentar, pentru semnalizarea momentului formării primare a dopului de gheață, se măsoară căderea de presiune pe dopul de gheață printr-un traductor de presiune diferențială având prizele la cele două capete (amonte și aval) ale secțiunii de testare.

#### 4.3. DESCRIEREA EXPERIMENTULUI

Temperatura apei în secțiunea de testare a avut valoarea de  $14,9^{\circ}\text{C}$  în timpul începerii încercării. Presiunea de injectare a azotului lichid în circuitul de alimentare al dispozitivului de formare a dopului de gheață a fost stabilită la o valoare constantă  $p$  pe toată durata aplicației printr-un robinet montat la intrarea în furtunul de transvazare. La circa 79 de minute de la începutul încercării s-a putut vizualiza momentul formării primare a dopului de gheață (însoțit de creșterea valorilor înregistrate de TDP) (Fig. 4.2), moment ce a fost marcat de următoarele niveluri de temperatură pe peretele exterior al conductei de testare:  $-44,8^{\circ}\text{C}$  în partea superioară a intrării în mașon (Th3),  $-64,4^{\circ}\text{C}$  în partea inferioară (Th4), iar la ieșirea din mașon:  $-47,3^{\circ}\text{C}$  în partea superioară (Th7) și  $-67,8^{\circ}\text{C}$  în cea inferioară (Th8). Apa demineralizată aflată în conductă s-a aflat la valoarea de  $13,1^{\circ}\text{C}$ .

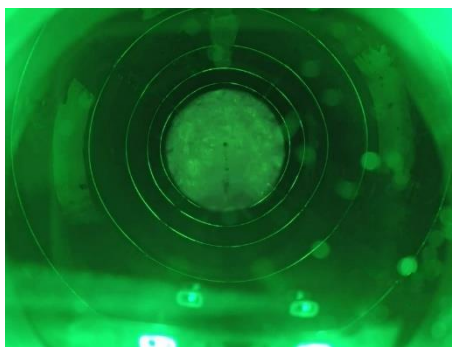


Fig. 4.2 - Momentul formării primare a dopului de gheață

S-a așteptat până când căderea de presiune pe dopul de gheață s-a mărit la  $0,2$  bar (valoare atinsă după alte 15 minute) urmărind o consolidare a dopului de gheață în conducta de testare, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească în ambele direcții. Ulterior s-a procedat la demontarea tronșoanelor de conductă din amonte și din aval de secțiunea de testare în paralel cu golirea instalației și îndepărtarea lor pentru vizualizarea dopului de gheață. Pentru măsurarea cantității de azot lichid consumate de-a lungul procesului de obturare cu dop de gheață a tronșonului de conductă orizontală de Dn 200 s-a cântărit vasul Dewar înainte de începutul experimentului și la final; cantitatea de azot lichid consumată pentru aplicația prezentată a fost de  $116$  kg.

#### 4.4. INTERPRETAREA REZULTATELOR EXPERIMENTALE

Sunt prezentate evoluțiile în timp ale lungimilor și a grosimii straturilor de gheață prin raportarea la inelele echidistante ale dispozitivului indicator (Fig. 4.3, Fig. 4.4)

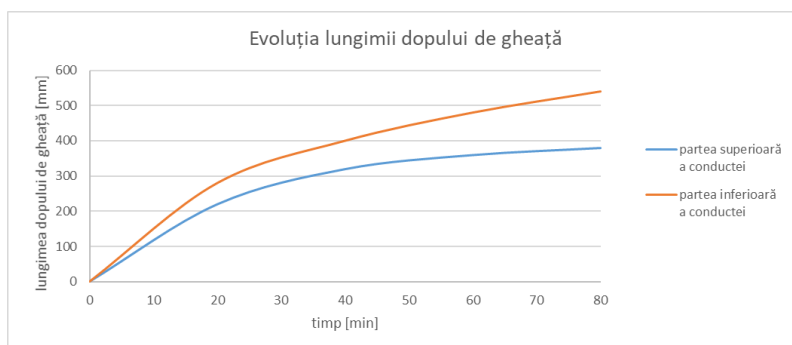


Fig. 4.3 – Evoluțiile în timp ale lungimilor depunerilor de gheață în interiorul conductei cu Dn 200 până la momentul formării primare a dopului

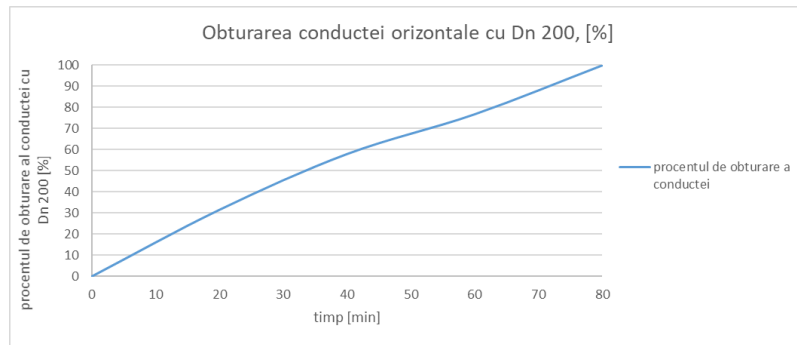


Fig. 4.4 – Evoluția în timp a procentului de obturare cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200

Reducerea temperaturii apei pe parcursul întregului experiment a fost mică, de doar 2,2°C (de la 14,9°C la începutul încercării până la 12,7°C la finalul ei (Fig. 4.5). Se prezintă variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele dispozitivului de înghețare (Fig. 4.6).

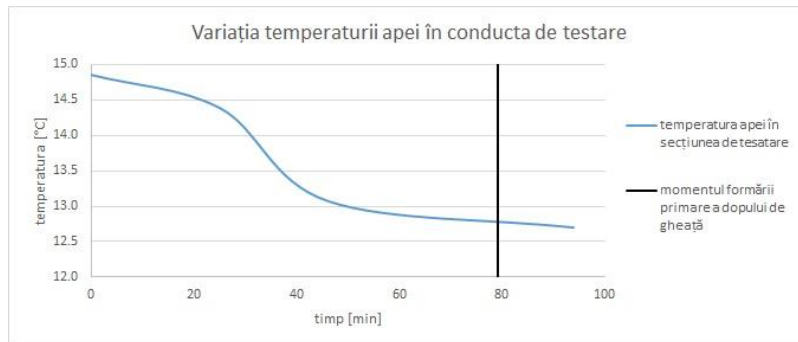


Fig. 4.5 - Variația în timp a temperaturii apei în punctul de referință pe parcursul încercării

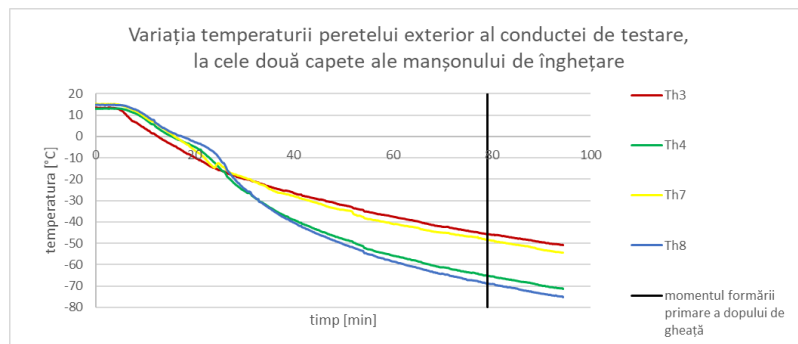


Fig. 4.6 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele dispozitivului de înghețare

#### 4.5. VALIDAREA MODELELOR TEORETICE

Temperaturile măsurate pe parcursul aplicației experimentale în partea superioară a conductei la cele două capete ale zonei de înghețare (Th3 și Th7) au o variație diferită față de cele obținute din simularea Ansys Fluent (Fig. 4.7). Acest lucru se datorează modului de injecție al agentului criogenic în circuitul manșonului de înghețare, prin ștuțul montat în partea de sus; azotul lichid curge mai întâi pe peretele superior al conductei, astfel că temperaturile scad brusc după primele 3 minute și au ulterior o scădere aproape liniară.

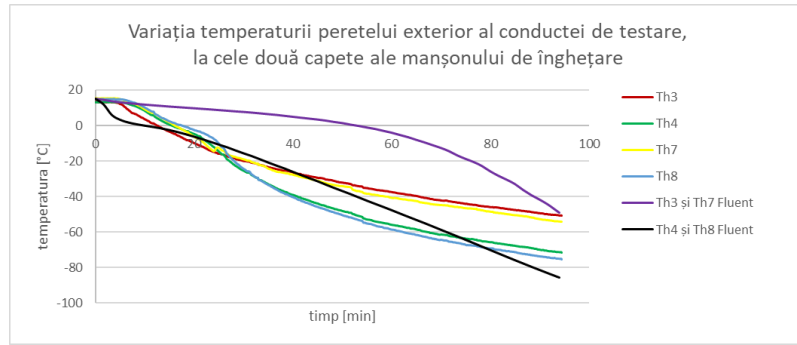


Fig. 4.7 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la capetele dispozitivului de înghețare pe parcursul aplicației experimentale și în modelul ANSYS Fluent

Temperaturile măsurate la 100 mm față de capetele zonei de înghețare în partea superioară a conductei (Th1 și Th9) au o scădere liniară pe parcursul celor două experimente (Fig. 4.8).

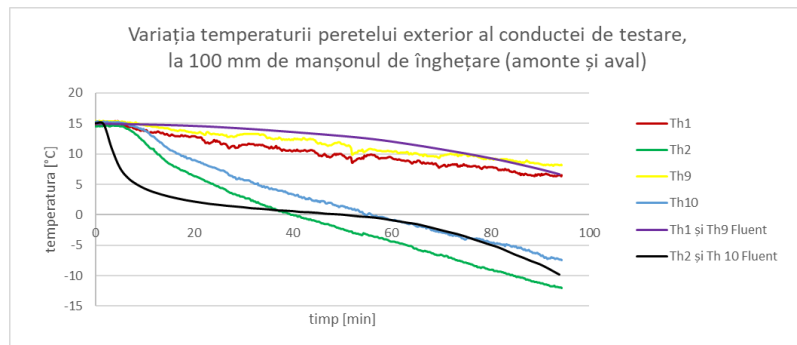


Fig. 4.8 - Variațiile în timp ale temperaturilor peretelui exterior al conductei cu Dn 200 la 100 mm de capetele dispozitivului de înghețare pe parcursul aplicației experimentale și în modelul ANSYS Fluent

#### Corelarea valorilor obținute

Pentru fiecare dreaptă de regresie obținută s-a determinat pătratul coeficientului de corelație  $R^2$ . Un coeficient de corelație ( $R^2$ ) poate avea valori în intervalul  $[0,1]$ ; cu cât valoarea acestuia este mai apropiată de 1, cu atât corelația este mai puternică, iar viceversa, cu cât este mai apropiată de 0, cu atât corelația este mai slabă. Dacă  $R^2 \geq 0,8$ , corelația obținută se consideră a fi bună, iar în cazul unui  $R^2 \geq 0,9$ , atunci avem de-a face cu o corelație foarte bună.

Coeficienții obținuți au fost prezentați în Tabelul 4.1.

Tabelul 4.1

#### Coeficienți de corelație între valorile temperaturilor obținute prin cele două metode (experimentală și simulare CFD)

Punct de măsurare a temperaturii	Th1	Th2	Th3	Th4	Th7	Th8	Th9	Th10	T. apei
$R^2$	0,848	0,8571	0,6764	0,9143	0,6629	0,9174	0,8731	0,8428	0,9601

Durata de formare primară a dopului de gheață în cazul experimentului este mai mare cu aproximativ 31 % decât în cazul modelului de calcul (79 min față de 60 min). Dacă în cazul modelului Ansys Fluent, pentru formarea primară a dopului de gheață s-au calculat a fi necesare 74,8 kg azot lichid, în cazul experimentului prezentat cantitatea consumată a fost de 98,7 kg (cu aproximativ 32 % mai mare). Principalele cauze ale acestei diferențe sunt date de modul de implementare al modelului CFD care consideră că transferul termic pe suprafața exterioară a conductei este uniform și constant. În realitate însă, concentrația mai mare de amestec bifazic azot lichid – vapori de azot din partea superioară a dispozitivului reduce puternic fluxul termic,

astfel că scăderea temperaturilor măsurate de termocuplurile Th1 și Th9 este mai lentă decât cea a temperaturilor măsurate de termocuplurile Th4 și Th8.

#### 4.6. CONCLUZII

- Experimentul a urmărit obturarea cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 în absența curgerii agentului de lucru (apă demineralizată).
- Temperatura apei în secțiunea de testare a avut valoarea de 14,9°C în timpul pornirii experimentului. Presiunea de injectare a azotului lichid în circuitul de alimentare al dispozitivului de formare a dopului de gheață a fost stabilită la o valoare constantă  $p$  pe toată durata aplicației.
- S-a obținut formarea primară a dopului de gheață după 79 de minute de la începutul încercării. S-a așteptat stabilizarea dopului de gheață pe o durată de încă 34 de minute timp în care depunerile de gheață au evoluat în lungime și grosime.
- Durata de formare primară a dopului de gheață în cazul experimentului este mai mare cu aproximativ 31 % decât în cazul modelului de calcul (79 min față de 60 min). Dacă în cazul modelului Ansys Fluent, pentru formarea primară a dopului de gheață s-au calculat a fi necesare 74,8 kg azot lichid, în cazul experimentului prezentat cantitatea consumată a fost de 98,7 kg (cu aproximativ 32 % mai mare).
- Principalele cauze ale acestei diferențe sunt date de modul de implementare al modelului CFD care consideră că transferul termic pe suprafața exterioară a conductei este uniform și constant. În realitate însă, concentrația mai mare de amestec bifazic azot lichid – vapori de azot din partea superioară a dispozitivului determină o reducere a fluxului termic în această zonă.

**Capitolul 5. MODELAREA OBTURĂRII CU DOP DE GHEAȚĂ A CONDUCTELOR  
ORIZONTALE DE DIAMETRE MARI ÎN DIFERITE CONFIGURAȚII ALE  
DISPOZITIVELOR DE ÎNGHEȚARE**

5.1. OBTURAREA CU UN DISPOZITIV DE ÎNGHEȚARE

5.1.1. Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200, la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C

5.1.1.1. Modelarea înghețării

Pentru modelarea obturării cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a păstrat geometria 3D a domeniului de analiză elaborată anterior și prezentată în paragraful 3.3.3.2 precum și modelul de discretizare cu volume finite.

De asemenea, s-au recalculat valorile conductivității termice echivalente  $\lambda'_{ech}$  în funcție de coeficientul  $\varepsilon$  (Tabelul 5.1) [24].

Tabelul 5.1

**Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	$1,53 \cdot 10^8$				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,53				
Gr	$3,46 \cdot 10^6$	$1,46 \cdot 10^6$	$4,68 \cdot 10^5$	$7,07 \cdot 10^4$	$9,11 \cdot 10^3$
$\varepsilon$	12	10,4	8,54	6,07	4,17
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	7,16	6,11	4,92	3,45	2,33

Pe peretele conductei în zona de înghețare, fluxul termic unitar absorbit de volumul de azot lichid din interiorul dispozitivului de înghețare este

$$\dot{Q}''_{20} = 38439,07 \text{ W/m}^2 .$$

5.1.1.2. Rezultate obținute

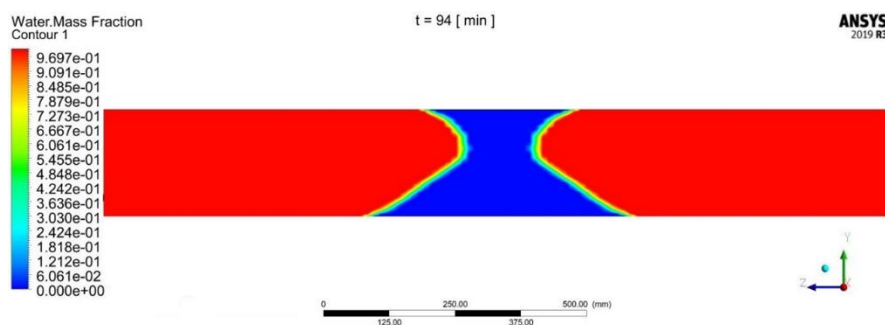


Fig. 5.1 - Depunerile de gheață pe peretele interior al conductei cu Dn 200 (temperatura inițială a apei de 20°C) la finalul simulării, t = 94 min

Formarea primară a dopului de gheață s-a produs după 85 de minute; simularea ANSYS Fluent a continuat încă 9 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească (Fig. 5.1). Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 200 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 79,7 kg.

### 5.1.2. Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200, la o temperatură inițială a agentului de lucru de 25°C

#### 5.1.2.1. Modelarea înghețării

Pentru modelarea obturării cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 25°C s-au păstrat geometria 3D a instalației și modelul de discretizare cu volume finite. De asemenea, s-au recalculat valorile conductivității termice echivalente  $\lambda'_{ech}$  în funcție de coeficientul  $\varepsilon$  (Tabelul 5.2).

Tabelul 5.2

**Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 25°C**

Temperatura apei	25°C	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\dot{Q}''_{25}$ [W/m <sup>2</sup> ]	39328,86					
$\overline{Ra}$	$2,54 \cdot 10^8$					
$g_{25}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,64					
Gr	$8,17 \cdot 10^6$	$4,16 \cdot 10^6$	$1,75 \cdot 10^6$	$5,63 \cdot 10^5$	$8,5 \cdot 10^4$	$1,1 \cdot 10^4$
$\varepsilon$	13,84	12,45	10,79	8,86	6,3	4,33
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	8,39	7,43	6,33	5,11	3,58	2,42

Pe peretele conductei în zona de înghețare, fluxul termic unitar absorbit de volumul de azot lichid din interiorul dispozitivului de înghețare este

$$\dot{Q}''_{25} = 39328,86 \text{ W/m}^2 .$$

#### 5.1.2.2. Rezultate obținute

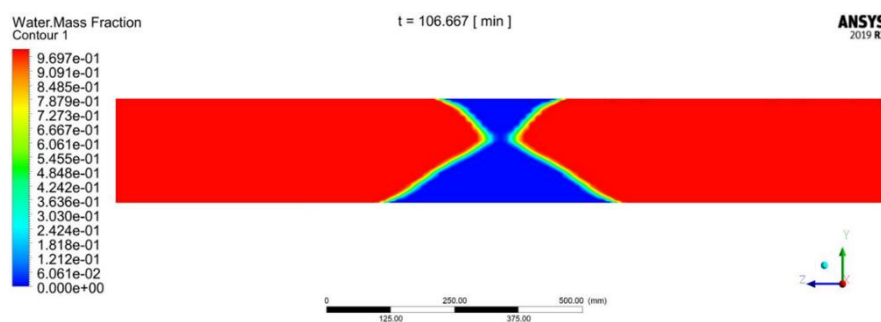


Fig. 5.2 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 200 la o temperatură inițială a apei de 25°C, după 106 minute

Formarea primară a dopului de gheață s-a produs după 106 minute (Fig. 5.2); simularea ANSYS Fluent a continuat încă 10 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 200 având ca agent de lucru apă la temperatura de 25°C în stare de repaus este de 83,6 kg.



### 5.1.3. Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 300

#### 5.1.3.1. Modelarea înghețării

Pentru modelarea obturării cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 300 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 304$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 324$  mm; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 6$  m; lungimea zonei de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{300} = 1,05 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conducta cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 946270 de elemente și 919836 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea ANSYS Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.3 [24].

Tabelul 5.3

**Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 300 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	1,78 · 10 <sup>8</sup>				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,18				
Gr	1,39 · 10 <sup>6</sup>	5,87 · 10 <sup>5</sup>	1,89 · 10 <sup>5</sup>	2,85 · 10 <sup>4</sup>	3,67 · 10 <sup>3</sup>
$\varepsilon$	10,01	8,67	7,12	5,06	3,48
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	5,97	5,09	4,11	2,87	1,94

Pe peretele conductei în zona de înghețare, fluxul termic unitar absorbit de volumul de azot lichid din interiorul dispozitivului de înghețare este

$$\dot{Q}''_{25} = 38439,07 \text{ W/m}^2 .$$

#### 5.1.3.2. Rezultate obținute

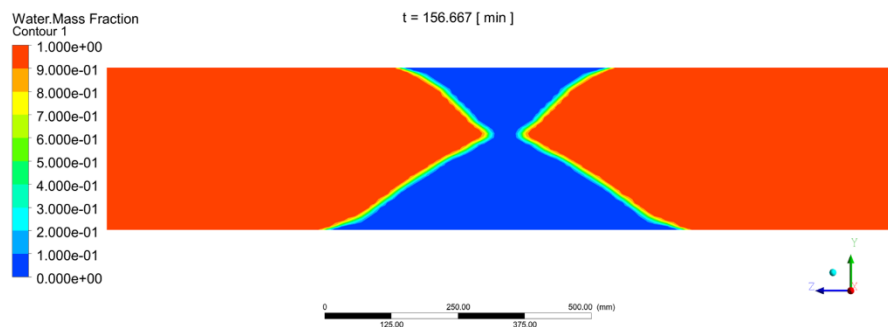


Fig. 5.3 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 300 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 156 minute

Formarea primară a dopului de gheață s-a produs după 156 minute (Fig. 5.3); simularea ANSYS Fluent a continuat încă 41 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 300 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 188,6 kg.

## 5.1.4. Obturarea cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 400

### 5.1.4.1. Modelarea înghețării

Pentru modelarea obturării cu dop de gheață a conductei orizontale cu Dn 400 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 400$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 420$  mm; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 6$  m; lungimea zonei de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{400} = 1,17 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conducta cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 1291500 de elemente și 1264466 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.4 [24].

Tabelul 5.4

**Parametrii pentru modelarea obturării cu dop de gheață a unei conducte cu Dn 400 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	2,46 · 10 <sup>8</sup>				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,11				
Gr	1,17 · 10 <sup>6</sup>				
$\varepsilon$	9,67	4,94 · 10 <sup>5</sup>	1,59 · 10 <sup>5</sup>	2,4 · 10 <sup>4</sup>	3,09 · 10 <sup>3</sup>
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	5,77	8,38	6,88	4,89	3,36

Pe peretele conductei în zona de înghețare, fluxul termic unitar absorbit de volumul de azot lichid din interiorul dispozitivului de înghețare este

$$\dot{Q}'' = 38439,07 \text{ W/m}^2 .$$

### 5.1.4.2. Rezultate obținute

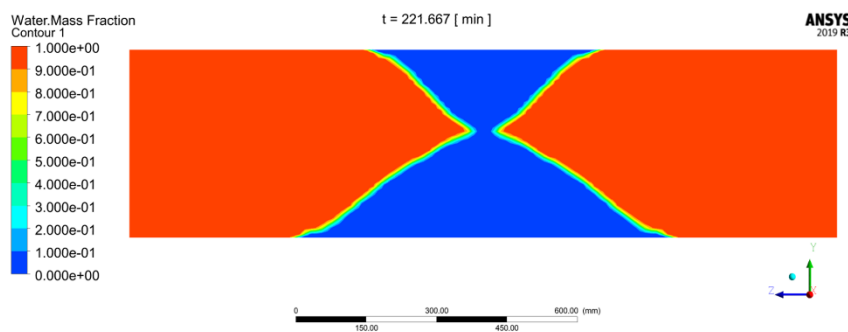


Fig. 5.4 - Momentul formării primare a dopului de gheață pe conducta orizontală cu Dn 400 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 221 minute

Formarea primară a dopului de gheață s-a produs după 221 de minute (Fig. 5.4); simularea ANSYS Fluent a continuat încă 29 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea unei conducte orizontale cu Dn 400 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 356,9 kg.

### 5.1.5. Interpretarea rezultatelor

Se observă că viteza curenților de convecție pe durata aplicațiilor de obturare cu dop de gheață scade pe măsură ce diametrul nominal al conductelor crește (în condițiile unor zone de transfer termic de lungime mai mică raportate la diametrele țevelor) (Fig. 5.2, Fig. 5.8, Fig. 5.14, Fig. 5.20). O intensitate mai mică a curenților de convecție determină ca la momentul formării primare a dopurilor de gheață, raportul între diametrul conductei și lungimea depunerilor de gheață pe peretele interior să scadă odată cu creșterea în grosime a volumului de fluid (raportat la diametrul țevii, obturarea se realizează cu dopuri din ce în ce mai mici).

### 5.2. OBTURAREA CU DOUĂ DISPOZITIVE DE ÎNGHEȚARE

Pentru analiza obturării cu două dopuri de gheață, se vor folosi ca domenii de analiză conducte cu Dn 200, 300, 400 și 500 având o temperatură inițială a apei de 20°C și o presiune a agentului de lucru de 2 bari. În implementarea modelelor geometrice ale domeniilor de analiză (Fig. 5.5) s-au folosit două zone de răcire având fluxul termic unitar diferit ( $\dot{Q}''_1 = 38439,07 \text{ [W/m}^2\text{]}$  și  $\dot{Q}''_2 = 0,9 \cdot \dot{Q}''_1 = 34595,16 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ), pentru a se evita închiderea în același timp a celor două dopuri (pentru a se evita producerea unei suprapresiuni în secțiunea dintre ele, ce în cazul unei aplicații practice ar putea afecta integritatea peretelui conductei).

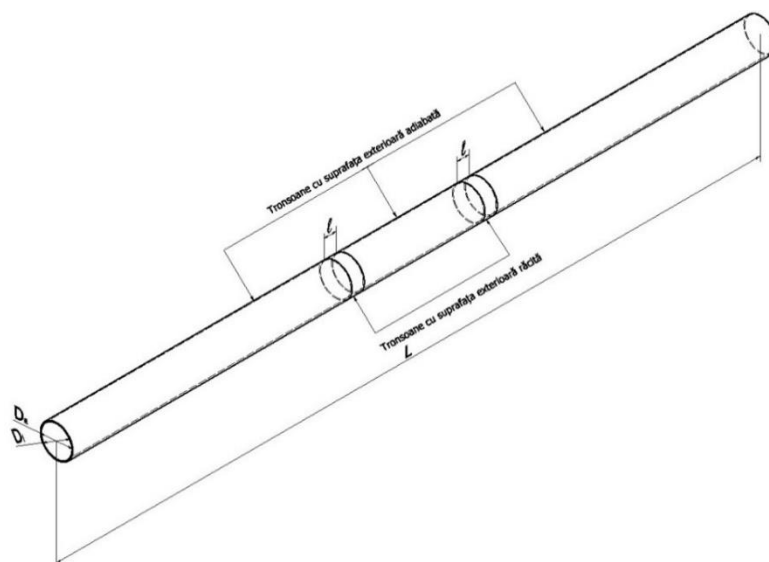


Fig. 5.5 - Configurația domeniului de analiză a obturării unei conducte orizontale cu două dopuri de gheață

Se neglijează transferul termic între conducta de testare și mediul înconjurător (în zonele libere care nu se află în zonele de transfer termic ale dispozitivelor de înghețare și la capetele amonte și aval) și în zona capetelor amonte și aval ale volumului de fluid. Distanța aleasă între cele două zone de înghețare a fost de  $4 \cdot D_n$ .

#### 5.2.1. Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 200

##### 5.2.1.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu două dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 200 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 203 \text{ mm}$ ; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 219 \text{ mm}$ ; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 7 \text{ m}$ ; lungimea fiecărei zone

de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l$  mm.

În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 625365 de elemente și 595680 de noduri. Valorile folosite pentru modelarea ANSYS Fluent sunt cele prezentate anterior (Tabelul 5.1).

### 5.2.1.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 68 de minute, iar a celui de-al doilea după 73 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.6).

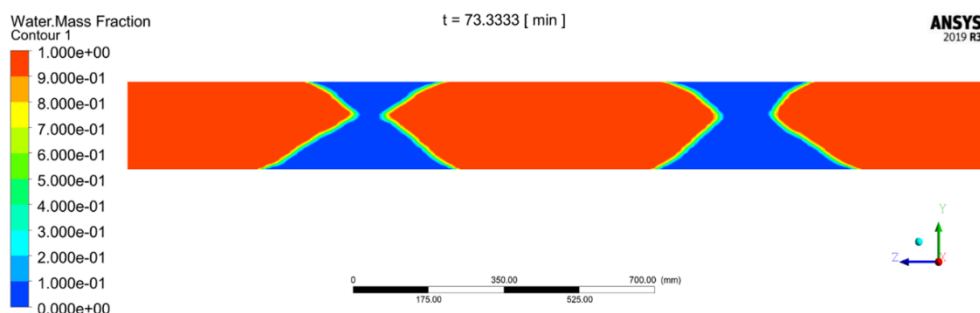


Fig. 5.6 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 200 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 73 de minute

Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 10 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească până la valorile de circa 480 mm în partea inferioară a conductei și 363 mm în cea superioară în cazul dopului 1 și de aproximativ 461 mm în partea inferioară a conductei și 338 mm în cea superioară în cazul dopului 2. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 151,5 kg.

## 5.2.2. Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 300

### 5.2.2.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu două dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 300 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 304$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 324$  mm; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 7$  m; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 1,2$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{300} = 1,05 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conducta cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 1095104 de elemente și 1065393 de noduri. Valorile folosite pentru modelarea ANSYS Fluent sunt cele prezentate anterior (Tabelul 5.3).

### 5.2.2.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 130 de minute, iar a celui de-al doilea după 138 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.7). Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 28 de minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească până la valorile de circa 694 mm în partea inferioară a conductei și 565 mm în cea superioară în cazul

dopului 1 și de aproximativ 668 mm în partea inferioară a conductei și circa 531 mm în cea superioară în cazul dopului 2.

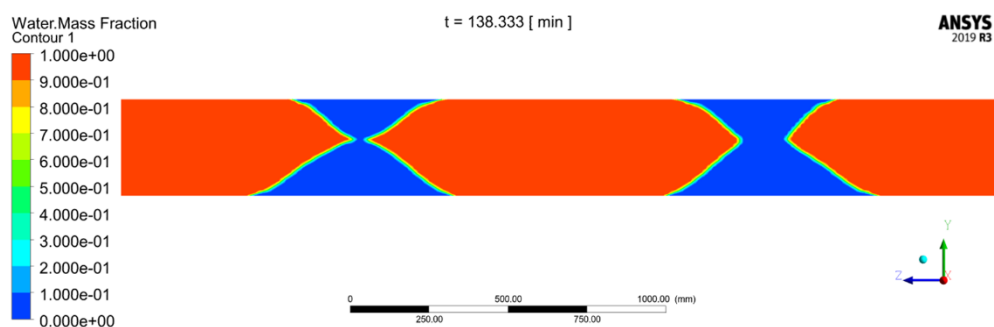


Fig. 5.7 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 300 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 138 de minute

Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 300 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 358,3 kg.

### 5.2.3. Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 400

#### 5.2.3.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu două dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 400 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 400$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 420$  mm; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 8$  m; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 1,6$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{400} = 1,17 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conducta cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 1754118 de elemente și 1718764 de noduri. Valorile folosite pentru modelarea ANSYS Fluent sunt cele prezentate anterior (Tabelul 5.4).

#### 5.2.3.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 195 de minute, iar a celui de-al doilea după 208 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.8).

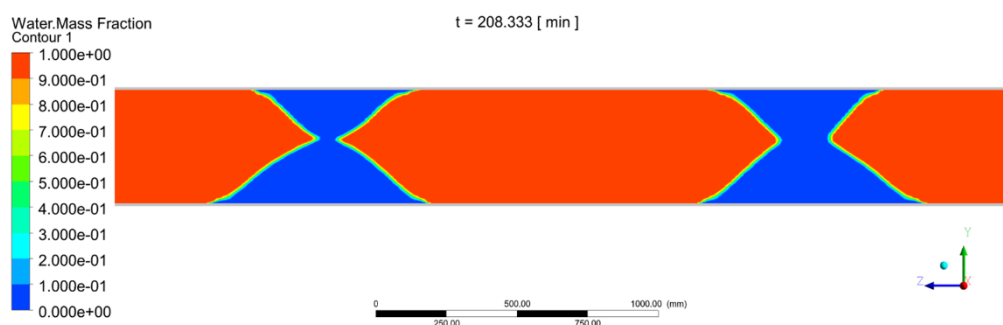


Fig. 5.8 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 400 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 208 minute

Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 8 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească până la valorile de circa 800 mm în partea inferioară a conductei și 614 mm în cea superioară în cazul dopului 1 și aproximativ 781 mm în partea inferioară a conductei și 586 mm în cea superioară în cazul dopului 2. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 400 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 678,07 kg.

#### 5.2.4. Obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 500

##### 5.2.4.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu două dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 500 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 488$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 508$  mm; lungimea tronsonului de conductă:  $L = 8$  m; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 1,6$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{500} = 1,38 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conductă cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 2194905 de elemente și 2159508 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.5.

Tabelul 5.5

**Parametrii pentru modelarea obturării cu două dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 500 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	4,08 · 10 <sup>8</sup>				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,1				
Gr	1,78 · 10 <sup>6</sup>	7,49 · 10 <sup>5</sup>	2,41 · 10 <sup>5</sup>	3,64 · 10 <sup>4</sup>	4,69 · 10 <sup>3</sup>
$\varepsilon$	10,51	9,11	7,47	5,31	3,65
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	6,27	5,35	4,31	3,02	2,04

##### 5.2.4.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 240 de minute iar a celui de-al doilea după 251 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.9). Simularea a continuat încă 14 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească în ambele direcții.

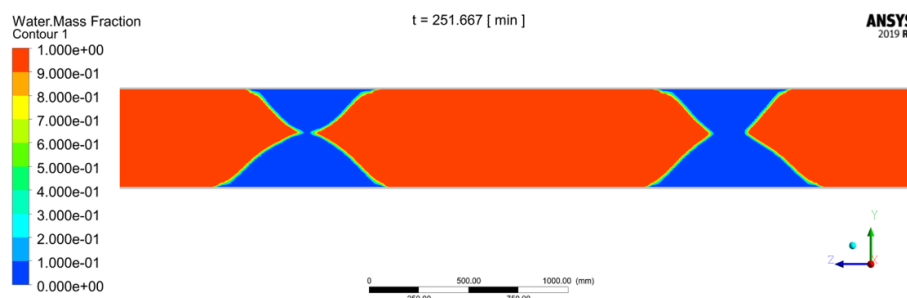


Fig. 5.9 - Momentul formării primare a celui de-al doilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 500 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 251 de minute

Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu două dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 500 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 1175,5 kg.

### 5.2.5. Interpretarea rezultatelor

Folosirea tehnicii de obturare cu două dopuri de gheață prezintă o serie de avantaje față de metoda de obturare cu un singur dop:

- Se reduce durata intervenției și implicit a staționării obiectivului;
- Se obțin forțe de adeziune a gheții la peretele interior al conductei mult mai mari (de 4 ori mai mari) decât în cazul utilizării unui singur manșon de înghețare;
- Deși în cazurile prezentate consumul de agent criogenic este de aproximativ două ori mai mare decât în cazul obturării cu un singur manșon, prin optimizarea injectării azotului lichid în cele două dispozitive de înghețare se poate obține reducerea considerabilă a consumului total pe parcursul intervenției.

### 5.3. OBTURAREA CU TREI DISPOZITIVE DE ÎNGHEȚARE

Pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață se vor folosi ca domenii de analiză conducte cu Dn 600, 700 și 800 având o temperatură inițială a apei de 20°C și o presiune a agentului de lucru de 2 bari. În implementarea modelelor geometrice ale domeniilor de analiză (Fig. 5.10) s-au folosit trei zone de răcire având fluxul termic unitar diferit, pentru a se evita închiderea în același timp a dopurilor: ( $\dot{Q}''_1 = 38439,07 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ,  $\dot{Q}''_2 = 0,9 \cdot \dot{Q}''_1 = 34595,16 \text{ [W/m}^2\text{]}$  și  $\dot{Q}''_3 = 0,8 \cdot \dot{Q}''_1 = 30751,26 \text{ [W/m}^2\text{]}$ ), pentru a se evita închiderea în același timp a celor două dopuri (pentru a se evita producerea unei suprapresiuni în secțiunile dintre ele, ce în cazul unei aplicații practice ar putea afecta integritatea peretelui conductei).

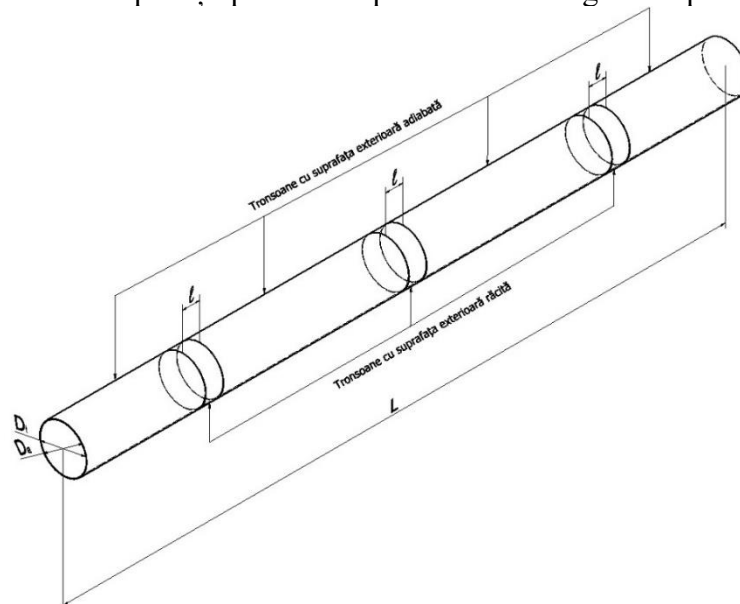


Fig. 5.10 - Configurația domeniului de analiză a obturării unei conducte orizontale cu trei dopuri de gheață

Distanța aleasă între două zone de înghețare a fost la fel ca în cazul obturării cu două dopuri de gheață a conductelor orizontale, de  $4 \cdot D_n$ . Pentru a reproduce cât mai exact condițiile de desfășurare a unei intervenții într-o instalație industrială, lungimea tronsonului de conductă a fost crescută până la valoarea  $L = 10 \text{ m}$ . Se neglijează transferul termic între conducta de testare și mediul înconjurător (în zonele libere care nu se află în zonele de transfer termic ale

dispozitivelor de înghețare și la capetele amonte și aval) și în zona capetelor amonte și aval ale volumului de fluid.

### 5.3.1. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 600

#### 5.3.1.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu trei dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 600 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 594$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 610$  mm; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 2,4$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{600} = 1,73 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conducta cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 3268944 de elemente și 3224473 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea ANSYS Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.6.

Tabelul 5.6

**Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 600 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temp. apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	$7,98 \cdot 10^8$				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,11				
Gr	$3,76 \cdot 10^6$	$1,58 \cdot 10^6$	$5,1 \cdot 10^5$	$7,69 \cdot 10^4$	$9,91 \cdot 10^3$
$\varepsilon$	12,21	10,58	8,68	6,17	4,24
$\lambda'_{ech}$ [W/m · K]	7,29	6,21	5,01	3,51	2,37

#### 5.3.1.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 270 de minute, a celui de-al doilea după 273 de minute, iar a celui de-al treilea după 298 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.11).

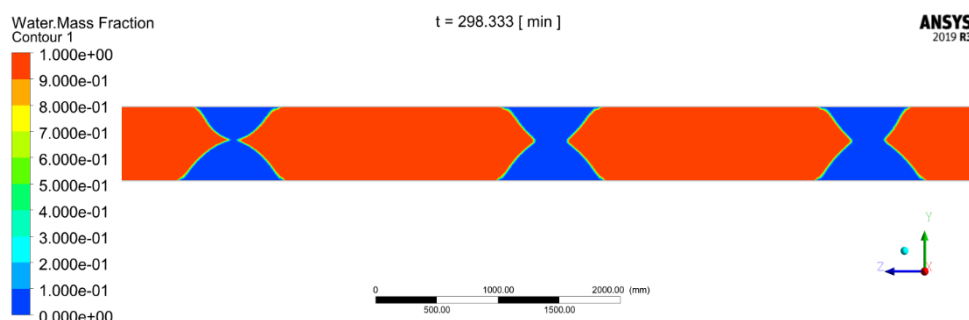


Fig. 5.11 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 600 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 298 de minute

Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 35 minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 600 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 3073,1 kg.



### 5.3.2. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 700

#### 5.3.2.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu trei dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 700 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 695$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 711$  mm; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 2,8$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{700} = 2,3 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conductă cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 4292768 de elemente și 4247274 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea ANSYS Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.7.

Tabelul 5.7

**Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 700 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	1,87·10 <sup>9</sup>				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,16				
Gr	1,28·10 <sup>7</sup>	5,41·10 <sup>6</sup>	1,74·10 <sup>6</sup>	2,63·10 <sup>5</sup>	3,39·10 <sup>4</sup>
$\varepsilon$	15,61	13,52	11,1	7,89	5,42
$\lambda'_{ech}$ [W/m·K]	9,32	7,94	6,4	4,48	3,03

#### 5.3.2.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 270 de minute, a celui de-al doilea după 280 de minute, iar a celui de-al treilea după 295 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.12).

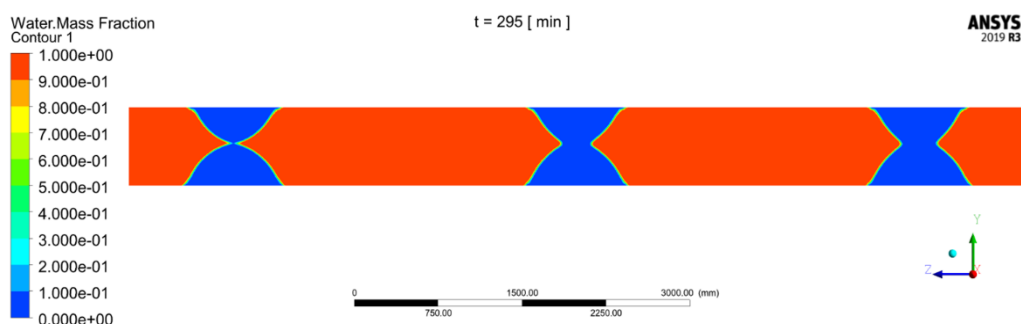


Fig. 5.12 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conducta orizontală cu Dn 700 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 295 de minute

Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 95 de minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid calculat pentru obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 700 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 5562,6 kg.

### 5.3.3. Obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 800

#### 5.3.3.1. Modelarea înghețării

Pentru simularea obturării cu trei dopuri de gheață a conductei orizontale cu Dn 800 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C s-a modelat 3D instalația de testare cu următoarele caracteristici: diametrul interior al conductei:  $D_i = 797$  mm; diametrul exterior al conductei:  $D_e = 813$  mm; distanța între cele două zone de transfer termic:  $D = 3,2$  m; lungimea fiecărei zone de transfer termic (echivalentul secțiunii de conductă aflată în contact cu azotul lichid din interiorul dispozitivului):  $l_{800} = 3,2 \cdot l$  [mm] (unde  $l$  – lungimea de transfer termic în cazul simulărilor pe conductă cu Dn 200). În urma implementării algoritmului de discretizare a rezultat o rețea de calcul formată din 2551104 de elemente și 2507681 de noduri. De asemenea, s-au recalculat parametrii pentru modelarea ANSYS Fluent; valorile obținute sunt prezentate în Tabelul 5.8.

Tabelul 5.8

**Parametrii pentru modelarea obturării cu trei dopuri de gheață a unei conducte cu Dn 800 la o temperatură inițială a agentului de lucru de 20°C**

Temperatura apei	20°C	15°C	10°C	5°C	0,5°C
$\overline{Ra}$	5,2·10 <sup>9</sup>				
$g_{20}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0,3				
Gr	6,61·10 <sup>7</sup>	2,78·10 <sup>7</sup>	8,95·10 <sup>6</sup>	1,35·10 <sup>6</sup>	1,74·10 <sup>5</sup>
$\varepsilon$	21,65	18,77	15,4	10,95	7,53
$\lambda'_{ech}$ [W/m·K]	12,93	11,02	8,89	6,22	4,2

#### 5.3.3.2. Rezultate obținute

Formarea primară a primului dop de gheață s-a produs după 250 de minute, a celui de-al doilea după 260 de minute, iar a celui de-al treilea după 275 de minute de la începutul simulării (Fig. 5.13).

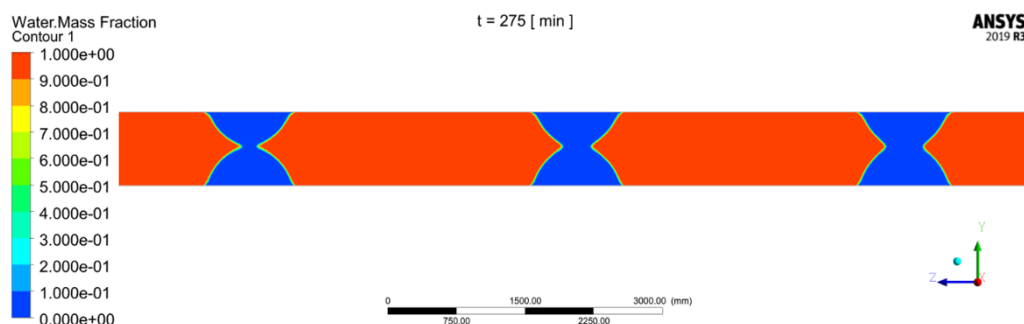


Fig. 5.13 - Momentul formării primare a celui de-al treilea dop de gheață pe conductă orizontală cu Dn 800 la o temperatură inițială a apei de 20°C, după 275 de minute

Simularea ANSYS Fluent a continuat încă 45 de minute, timp în care depunerile de gheață au continuat să crească. Necesarul de azot lichid pentru obturarea cu trei dopuri de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 800 având ca agent de lucru apă la temperatura de 20°C în stare de repaus este de 10175,5 kg.

#### 5.3.4. Interpretarea rezultatelor

Folosirea tehnicii de obturare cu trei dopuri de gheață prezintă avantajul răcirii rapide a volumului de agent de lucru din interiorul conductei favorizând astfel o evoluție rapidă a dopurilor. Deși avantajele pe care le aduce sunt evidente, tehnica trebuie studiată în continuare, în ceea ce privește aspectele legate de:

- Analiza structurală a forțelor exercitate de dezvoltarea dopurilor de gheață asupra conductelor;
- Eficientizarea procesului de obturare cu mai multe dopuri de gheață prin determinarea suprafețelor optime de transfer (de contact a agentului criogenic cu conducta) și a distanțelor de montare pe conductă între dispozitivele de înghețare.

#### 5.4. CONCLUZII

- S-au determinat prin calcul, pentru fiecare exemplu prezentat, valorile parametrilor pentru modelarea obturării cu dop de gheață a conductelor;
- S-a realizat modelarea CFD a transferului termic în cazul obturării cu unul, două și trei dopuri de gheață a unor conducte orizontale de diametre mari (Dn 200÷Dn 800) la temperaturi inițiale ale agentului de lucru (apă aflată în stare de repaus) de 20 și 25°C;
- Pentru fiecare exemplu s-a determinat timpul necesar obturării primare și complete a conductei cu dop de gheață și a fost calculat necesarul de azot lichid.

---

## CONCLUZII

---

### 1. CONCLUZII GENERALE

- Optimizarea funcționării unui sistem sau a unui proces tehnologic presupune (de cele mai multe ori) analizarea mai multor fenomene fizice precum și interacțiunile între ele.
- Principalul obiectiv al acestei lucrări a fost modelarea CFD a procesului de obturare cu dop/dopuri de gheață a conductelor orizontale de diametre mari fără curgerea agentului de lucru (apa) pentru un debit constant de azot lichid injectat în dispozitivul de înghețare, având ca scop calculul timpului și a necesarului de agent criogenic pentru realizarea obiectivului. Modelul de calcul a trebuit să răspundă următoarelor cerințe:
  - Rezultate obținute pe cale teoretică pentru conducta cu Dn 200 trebuie confirmate experimental;
  - Modelul validat experimental să poată fi folosit în dezvoltarea unor aplicații pentru conducte de diametru nominal mai mare (Dn 300 – Dn 800).
- Rezultatele experimentale au confirmat datele obținute pe cale teoretică prin simularea CFD ANSYS Fluent. Prin urmare, s-a concluzionat că metoda poate fi implementată în dezvoltarea tehnologiei pentru conducte orizontale de diametre mai mari având ca agent de lucru apă aflată în stare de repaus;
- Folosind metoda confirmată experimental, s-au realizat modelări ale obturării cu un dop de gheață a conductelor orizontale de diametre nominale între 200 și 800 mm la temperaturi inițiale ale apei de 20°C și 25°C; pentru fiecare exemplu prezentat a fost calculat necesarul de azot lichid estimat pe baza unui model confirmat experimental.

### 2. CONTRIBUȚII ORIGINALE

Contribuții teoretice:

- Realizarea unui studiu al stadiului actual al cercetărilor privind tehnologia de obturare prin înghețare criogenică a conductelor umplute cu apă aflate în componența instalațiilor industriale (și în special a circuitelor hidraulice aflate în componența CNE) și determinarea potențialului utilizării metodei;
- Identificarea și prezentarea într-o manieră științifică coerentă a problemelor legate de analiza principalilor parametri care intervin în studiul transferului termic în procesul de obturare cu dop de gheață a unor conducte orizontale de diametre mari (Dn 200.. Dn 800);
- Studiarea bibliografiei existente în literatura de specialitate și determinarea problemelor apărute în timpul înghețării criogenice a conductelor. Identificarea și analiza efectelor înghețării criogenice asupra materialului conductelor; prezentarea unui model de calcul mecanic al eforturilor exercitate;
- Cercetarea detaliată a consecințelor implementării și utilizării necorespunzătoare a intervenției tehnologice de obturare a conductelor prin înghețare criogenică;
- Întocmirea procedurilor de planificare și desfășurare în siguranță a intervenției tehnologice și a etapelor de parcurs pentru înghețarea fluidului într-o porțiune de conductă;
- Proiectarea unui sistem de analiză video pentru vizualizarea în timp real a formării straturilor de gheață ca rezultat al condițiilor de desfășurare ale aplicației și al manevrelor efectuate pe parcurs asupra vitezei de injectare a azotului lichid în interiorul dispozitivului criogenic; datele obținute sunt folosite pentru dezvoltarea și îmbunătățirea modelelor de calcul termic

al proceselor de obturare a conductelor prin înghețare criogenică precum și pentru calculele constructive ale dispozitivelor de înghețare;

Contribuții numerice:

- Dezvoltarea unui model de calcul al necesarului de azot lichid pentru obturarea primară cu dop de gheață a unei conducte orizontale;
- Analiza necesității și oportunității utilizării unui software dedicat studiului principalilor parametri de transfer termic care intervin în procesul de obturare cu dop de gheață a unor conducte orizontale de diametre mari (Dn 200.. Dn 800);
- Utilizarea programului pentru dezvoltarea unui model de calcul CFD viabil pentru determinarea duratei de timp și a necesarului de agent criogenic (azot lichid) pentru obturarea cu dop/dopuri de gheață a conductelor orizontale de diametre mari (Dn 200 ÷ Dn 800) la diferite temperaturi ale agentului de lucru;
- Efectuarea unor simulări numerice cu ajutorul programului ANSYS Fluent pentru determinarea influenței pe care suprafețele de transfer termic (de contact a agentului criogenic cu conducta) și distanțele între mai multe zone de transfer termic o au asupra parametrilor de transfer termic din procesul de obturare cu dop/dopuri de gheață a conductelor orizontale de diferite diametre;
- Dezvoltarea și analiza unor soluții privind obturarea cu unul, două și trei dopuri de gheață a conductelor orizontale de diametre mari fără curgerea agentului de lucru.

Contribuții experimentale:

- Conceperea și realizarea unui număr important de experiențe destinate obturării cu dop de gheață a unor conducte orizontale cu Dn 200 și Dn 300 pentru diferite valori ale debitului agentului de lucru și condiții de desfășurare a procesului;
- Conceperea și realizarea de experimente pentru obturarea cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 în absența curgerii apei. Culegerea de date privind:
  - o evoluția temperaturilor peretelui conductei;
  - o evoluția caracteristicilor geometrice ale depunerilor de gheață la nivelul peretelui interior al conductei;
  - o evoluția temperaturii apei în secțiunea de testare;
  - o timpii necesari pentru formarea primară și totală a dopului de gheață;
  - o evoluția căderii de presiune pe dopul de gheață;
  - o cantitatea de azot lichid consumată de-a lungul întregului proces.
- Determinarea numerică și reprezentarea grafică a rezultatelor experimentale obținute privind procesul de obturare cu dop de gheață a unei conducte orizontale cu Dn 200 în absența curgerii apei;
- Validarea modelelor teoretice prin corelarea valorilor determinate numeric cu cele obținute experimental.

Autorul sugerează câteva posibilități de dezvoltare ulterioară a cercetărilor, de exemplu: modalități de optimizare a procesului analizat, dezvoltarea de dispozitive criogenice pentru conducte de dimensiuni mai mari și aplicarea metodelor de calcul confirmate experimental pentru cercetarea obturării cu dop de gheață a conductelor verticale.

### 3. PERSPECTIVE DE CONTINUARE A CERCETĂRILOR

Principala direcție de continuare a lucrării este dezvoltarea de modele ANSYS care să urmărească rezolvarea unei serii de probleme apărute de-a lungul timpului în implementarea tehnologiei de obturare cu dop de gheață a conductelor din instalațiile industriale:

- Analiza structurală a forțelor exercitate de dezvoltarea dopurilor de gheață asupra conductei;
- Analiza structurală a rezistenței adeziunii dopului de gheață la presiuni mari de lucru;
- Dezvoltarea de dispozitive criogenice pentru conducte de dimensiuni mai mari;

- Eficientizarea procesului de obturare a conductelor prin dimensionarea compartimentelor destinate azotului lichid ale dispozitivelor de înghețare în funcție de cerințele fiecărei aplicații propriu-zise;
- Eficientizarea procesului de obturare cu mai multe dopuri de gheață prin determinarea distanțelor optime de instalare a dispozitivelor criogenice pe conductă;
- Analiza efectelor fierberilor peliculare și nucleice asupra transferului termic în interiorul dispozitivului de înghețare;
- Controlul formării dopurilor de gheață prin varierea debitului de azot lichid injectat în dispozitivele criogenice;
- Aplicarea metodelor de calcul validate experimental în cercetarea obturării cu dop de gheață a conductelor verticale.

Rezultatele obținute pot fi folositoare și pentru dezvoltarea unor direcții viitoare de cercetare ce vizează procedee de obturare cu dop de gheață a conductelor din diferite ramuri ale industriei. În prezent, în lume operează mai multe companii specializate în izolarea conductelor metalice. Cu toate acestea, sunt foarte puține situații în care aceste companii au pregătirea necesară aplicării tehnologiei pe conducte nemetalice deoarece materialele plastice (polimerii) din care ele sunt confecționate sunt mai susceptibile la fisurare din cauza solicitărilor provocate de șocurile termice, de contracție sau de tensiunile produse de presiunea interioară exercitată de formarea dopurilor de gheață.

#### 4. DISEMINAREA REZULTATELOR

Diseminarea rezultatelor obținute a fost realizată prin publicarea unui număr de 19 articole:

**Corbescu B.**, Puiu D., Matei E., Panaitescu V. N. *CFD model for the heat transfer during the ice plugging process of large diameter pipes,*” Journal of Nuclear Research and Development, ISSN 2247-191X, nr. 20-21, pp. 49-55, Mai 2021.

**Corbescu B.**, Ionescu D., Gyöngyöși T., Chihaiia R. A., Panaitescu V. N. *Ice plug obturation of a horizontal pipe. Computational model and experimental validation,* Buletinul Științific al Universității Politehnica din București, seria D, Vol. 83(1)/2021, ISSN 1454-2358, pp. 281-292.

**Corbescu B.**, Gyöngyöși T., Puiu D., Panaitescu V. N. *Forming an ice plug inside a horizontal 200 mm nominal diameter pipeline using a 55 % nitrogen vapours exhaust nozzle restriction,* The 12<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2019. Nuclear Technology and Materials. Pitești, 3-4 June, 2019.

Gyöngyöși T., **Corbescu B.**, Puiu D., Valeca Ș., Panaitescu V. N. *The influences of reducing with up to 25 % the nitrogen vapour exhaust from the ice plugging device mounted on a 200 mm nominal diameter pipe containing stationary water,* The 12<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2019. Nuclear Technology and Materials. Pitești, 3-4 June, 2019.

Glont A., Valeca Ș., C. Roth, **Corbescu B.**, Gyöngyöși T., *Establishing the theoretical limit of the liquid nitrogen requirement for the freeze isolation of a horizontal pipeline,* The 12<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2019. Nuclear Technology and Materials. Pitești, 3-4 June, 2019.

**Corbescu B.**, Puiu D., Gyöngyöși T., Panaitescu V. N. *Forming an ice plug inside a high diameter pipeline in stationary water using a nitrogen vapour exhaust restriction,* Resort – International Conference on Sustainable Future and Technology Development, 15 October 2018, Bucharest, Romania, vol. 1122, Journal of Physics: Conference Series.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Chihaiia R., Panaitescu V. N. *Vizualizare secvențială a procesului de formare a dopului de gheață în secțiunea de testare a unei conducte de diametru mare. Partea I.* A XVII-a Conferința internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Cluj Napoca 1-2 iunie 2018. *Știință și inginerie*. Vol. 34/2018, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2018, pp. 365-374.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Chihaiia R., Panaitescu V. N. *Vizualizare secvențială a procesului de formare a dopului de gheață în secțiunea de testare a unei conducte de diametru mare. Partea a II-a.* A XVII-a Conferința internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Cluj Napoca 1-2 iunie 2018. *Știință și inginerie*. Vol. 34/2018, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2018, pp. 375-380.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *Forming an ice plug inside a horizontal high diameter pipeline (200 mm nominal diameter) using a 15 % nitrogen vapours exhaust nozzle restriction*, The 11<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2018. Nuclear Technology and Materials. Pitești, 23-25 May, 2018.

Gyöngyösi T., **Corbescu B.**, Puiu D., Valeca Ș., Panaitescu V. N. *Pipe ice plugging tests using a ~ 15 % exhaust liquid nitrogen vapor restriction for the freezing device mounted on a 200 mm horizontal pipe, in a stationary flow regime*, The 11<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2018. Nuclear Technology and Materials. Pitești, 23-25 May, 2018.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *Calculus estimation of the time and liquid nitrogen quantity required to isolate a horizontal high diameter pipe-line.* International Symposium for Nuclear Energy SIEN 2017. București, October 1-4, 2017

**Corbescu B.**, Puiu D., Gyöngyösi T., Panaitescu V. N. *Elemente de calcul al necesarului de azot pentru izolarea cu dop de gheață a unei conducte orizontale de diametru mare.* A XVII-a Conferința internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Sebeș – Alba, 2-3 iunie 2017. *Știință și inginerie*. Vol. 30/2017, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2017, pp. 167-174.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *Comparative analysis between two processes of isolating high diameter pipelines ( $\leq 300$  mm nominal diameter) by ice plugs in stationary water.* The 10<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2017. Nuclear Technology and Materials. Pitești, May 24-26, 2017, Proceedings of Nuclear 2017, part 1/3, pag. 282-289

Gyöngyösi T., **Corbescu B.**, Puiu D., Valeca Ș., Panaitescu V. N. *The influence of the flow regime over the ice plug isolation of a horizontal 200 mm nominal diameter pipeline.* The 10<sup>th</sup> Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2017. Nuclear Technology and Materials. Pitești, May 24-26, 2017, Proceedings of Nuclear 2017, part 1/3, pag. 291-298.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *O încercare de obturare cu dop de gheață a unui tronson de conductă orizontală (DN 300 mm) străbătut de apă demineralizată,* A XVI-a Conferința internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Sebeș – Alba, 10-11 iunie 2016. *Știință și inginerie*. Vol. 29/2016, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2016, pp. 483-492.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *Attempts to isolate a horizontal high diameter (300 mm nominal diameter) pipeline with an ice plug at minimum water flow*

and without water flow, The 9th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2016. Nuclear Technology and Materials. Pitești, May 18-20, 2016.

Gyöngyösi T., Valeca Ș., **Corbescu B.**, Puiu D., Panaitescu V. N. *Forming an ice plug inside a horizontal high diameter pipeline (300 mm nominal diameter) using stationary demineralized water*, The 9th Annual International Conference on Sustainable Development through Nuclear Research and Education, Nuclear 2016. Nuclear Technology and Materials. Pitești, May 18-20, 2016.

Gyöngyösi T., Valeca Ș., **Corbescu B.**, Puiu D., Panaitescu V. N. *Demineralized Water Flow Cancelling Tests with Ice Plug into High Diameter Horizontal Tube (300 Nominal Diameter)*. The International Symposium on Nuclear Energy SIEN 2015, 19-21 October 2015, Bucharest, Romania.

**Corbescu B.**, Gyöngyösi T., Puiu D., Panaitescu V. N. *The convenience of visualizing the controlled formation of ice plugs in horizontal pipe/line section*. A XV-a Conferință internațională multidisciplinară „Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”. Sebeș – Alba, 5-6 iunie 2015. *Știință și inginerie*. Vol. 28/2015, ISSN 2067-7138, Editura AGIR, București, 2015, pp. 363-368.

Observații:

- **Buletinul științific** al Universității Politehnica din București este indexat în următoarele Baze de Date Internaționale: Ulrich's International Periodicals Directory, SCOPUS, INSPEC, METADEX, Elsevier Sciences's Bibliographic Databases, Engineering Village, Cambridge Scientific Abstracts și COMPENDEX;
- Revista **Journal of Physics: Conference Series** este indexată în următoarele Baze de Date Internaționale: Inspec, Scopus, INSPIRE-HEP, MathSciNet, ISI Proceedings, Chemical Abstracts, NASA Astrophysics Data System, INIS, și VINITI Abstracts Journal;
- Revista **Știință și inginerie** este indexată în următoarele Baze de Date Internaționale: CABI Abstract/CABI Health, Google Academic și Index Copernicus;
- Revistele **Journal of Nuclear Research and Development (JNRD)** și **Proceedings of Nuclear** sunt indexate în Baza de Date Internațională INIS (International Nuclear Information System).



---

## BIBLIOGRAFIE

---

- [1] „Huntingdon Fusion Techniques,” [Interactiv]. Available: <http://www.huntingdonfusion.com>. [Accesat 11 2019].
- [2] T. Gyöngyösi, Ș. Valeca și L. Constantin, „Dispozitiv de înghețare pentru conducta Dn 200 mm. Proiect de execuție model experimental,” ICN Pitești, R.I. 7138/2005.
- [3] G. J. Howard, *Oil and gas journal*, pp. 108-110, Aprilie 1982.
- [4] C. Doca, L. Doca și N. Anghel, „Aspecte teoretice privind formarea dopului de gheață într-o conductă,” ICN Pitești, R.I. 9283/2011.
- [5] C. Doca, „Asupra timpului de obturare, prin înghețare criogenică, a unei conducte umplute cu apă,” în *A XVII-a Conferință Națională cu Participare Internațională "Progrese în criogenie și separarea izotopilor"*, Călimănești-Căciulata, Vâlcea, 26-28 octombrie 2011.
- [6] H. Tinoco, „Cryogenic pipe freezing – a theoretical model,” Swedish State Power Board, Aelvkarleby, Vasteras, 1988.
- [7] H. S. Carslaw și J. C. Jaeger, *Conduction of heat in solids*, Oxford: Oxford University Press, 1959.
- [8] J. Crank, *Free and moving boundary problems*, Oxford: Oxford University Press, 1984.
- [9] M. T. Flaman și N. N. Shah, „Structural Integrity Investigation of Feed Pipe Ice Plugging Procedures,” Ontario Hydro Research Division, Ontario, 1984.
- [10] N. Ichiyanagi, „The Freezing Method for the Oil Stop in POF Cable Repair,” *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, vol. 98, nr. 6, pp. 2037-2046, 1979.
- [11] J. F. Kiefner, *Development of guidelines for use of ice plugs in pipeline maintenance and hydrostatic testing*, Battelle Columbus Laboratories, 1982.
- [12] R. J. Twigg, „Ice plugging of pipes using liquid nitrogen,” Atomic Energy Control Board, Ottawa, 1987.
- [13] D. H. Tantom și D. A. Wigley, în *Proceedings of the Eighth International Cryogenic Engineering Conference*, Genova, 3-6 Iunie, 1980.
- [14] R. W. Vance și W. M. Duke, *Applied Cryogenic Engineering*, New York: John Wiley and Sons, 1962.
- [15] A. P. Rao, în *Proceedings of the 1st National Symposium on Cryogenics - Indian Institute of Technology, Khargapur*, 24-25 Mai, 1975.
- [16] A. Domșa, *Materiale metalice în construcția de mașini și instalații*, Cluj Napoca: Editura Dacia, 1981.
- [17] „CanTech,” [Interactiv]. Available: [canteach.candu.org](http://canteach.candu.org). [Accesat 02 2020].
- [18] K. Raznjevic, *Tabele și diagrame termodinamice*, București: Editura Tehnică, 1978.
- [19] „Engineering Toolbox,” [Interactiv]. Available: [www.engineeringtoolbox.com](http://www.engineeringtoolbox.com). [Accesat 03 2020].
- [20] „Microelectronics Heat Transfer Laboratory, University of Waterloo,” [Interactiv]. Available: [www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools](http://www.mhtl.uwaterloo.ca/old/onlinetools). [Accesat 04 2020].
- [21] „Dortmund Data Bank,” [Interactiv]. Available: <http://www.ddbst.com>. [Accesat 04 2020].

- [22] B. Corbescu, T. Gyöngyösi, D. Puiu, R. A. Chihaiia și V. N. Panaitescu, „Vizualizare secvențială a procesului de formare a dopului de gheață în secțiunea de testare a unei conducte de diametru mare,” *Știință și inginerie*, vol. 34, nr. ISSN 2067-7138, pp. 365-374, 2018.
- [23] B. Corbescu, T. Gyöngyösi, D. Puiu și V. N. Panaitescu, „Oportunitatea vizualizării formării controlate a dopului de gheață pe un tronson de conductă orizontală,” *Știință și inginerie*, vol. 28, nr. ISSN 2067-7138, pp. 363-368, 2015.
- [24] B. Corbescu, D. Puiu, E. Matei și V. N. Panaitescu, „CFD model for the heat transfer during the ice plugging process of large diameter pipes,” *Journal of Nuclear Research and Development*, ISSN 2247-191X, nr. 20-21, pp. 49-55, Mai 2021.
- [25] Y. Takefuj și T. Okubo, „Double-ice-plug freezing using liquid nitrogen for water pipe repairs,” *Urban Water Journal*, vol. 15, nr. 1, pp. 1-3, 2017.