

היווצרות מטען אלקטרוסטטי בזרימת נוזלים דליקים וחישוב הסיכון להתלקחות

איל צדוק

מהנדס מומחה לבקרת חשמל סטטי

מנתח סיכונים של אירה דליקה וציוד חשמלי

ת.ד. 108, הילה 24953, טל: 04-9572126, פקס: 04-9974585,

eyalzac@netvision.net.il

כל הזכויות שמורות

היווצרות מטען אלקטרוסטטי בזרימת
נוזלים דליקים וחישוב הסיכון
להתלקחות

מטרות ההרצאה

+ להכיר את מאפייני הצתת חשמל סטטי.

+ להציג את ההתנהגות האלקטרוסטטית של נוזלים.

+ לנתח גורמי הצתה בהזרמה ומילוי של מכלי אחסון.

+ לחשב את הערכים הקריטיים של גורמי הצתה.

מאפייני הצתת חשמל סטטי

מאפייני הצתת חשמל סטטי

שלושת המאפיינים העיקריים

- היווצרות אוירה דליקה
- הצטברות מטעני חשמל סטטי
- התרחשות פריקה מציתה

היווצרות אוירה דליקה

- הגדרה של אוירה דליקה:
תערובת של אויר (חמצן) עם חומר **דליק**, המתקיימת בתוך נפח כל שהוא: ריאקטור, מכל, צנרת, שק, דלי, שטח פתוח.
- חומר **דליק**: עשוי להיות **אורגני** או **אנאורגני**.
- **היווצרות אוירה**: עשויה להיות מתוכננת או אקראית.

היווצרות אוירה דליקה

- תצורות של חומרים דליקים שמקורם בנוזלים:
גז, אדים, טיפות, קצף, ערפל;

- תכונות ופרמטרים של חומר דליק המשפיעים על אוירה דליקה:
 - נקודת ההבזקה של החומר וטמפרטורת הסביבה
 - הריכוז המינימלי באויר הנדרש להתלקחות
 - מידת האיוורור וריכוז החומר באויר

היווצרות אוירה דליקה

נוזלים שונים נקודת הבזקה, °C תחומי דליקות, %

2.6 – 12.8	- 20	אצטון
4 - 57	- 39	אצטאלדהיד
1.9 - 36	- 45	דיאתיל אתר
6 – 36	11	מתנול
1.27 – 7.1	4	טולואן
1.1 – 5.9	- 18	בנזין
0.7 - 5	43 - 72	קרוסין
-----	38 - 54	סולר

הצטברות מטעני חשמל סטטי

תנאים המשפיעים על היווצרות המטען בנוזלים

בכלי

- חומרי מבנה
- ממדים / קוטר
- טיב פני שטח

בנוזל

- צמיגות
- מהירות זרימה
- שטח פנים
- מערבולות
- מספר פאזות

הצטברות מטעני חשמל סטטי

תכונות הכלי המשפיעות על ההצטברות

חומרי מבנה – מוליכים או מבדדים חשמלית.

סטאטוס הארקה – מגושר להארקה או "צף".

התרחשות פריקה מציתה

השלבים הפיסיקליים של התרחשות הצתת חשמל סטטי

- גוף טעון הנמצא במקום בעל **אווירה דליקה**;
- עצמת **השדה החשמלי** סביב הגוף הטעון גורמת לקריסת הבידוד ("יוניזציה") של האוויר בינו לבין גוף מוליך אחר, ונוצר מעבר של **מטען חשמלי** ("זרם חשמלי") בין הגופים;
- **צפיפות האנרגיה** של הזרם החשמלי באוויר גורמת ל**חימום** נתיב הזרימה הנמצא בתוך האווירה הדליקה, ל**טמפרטורה** של מאות עד אלפי מעלות צלזיוס.
- **טמפרטורה** זו גורמת להצתת האווירה הדליקה, היות והיא **גבוהה** מטמפרטורת ההתלקחות העצמית של החומר הדליק.

התרחשות פריקה מציתה

סוגי פריקות חשמל סטטי הנפוצות בתעשייה

- **פריקת ניצוץ** – זרימת מטען בין שני גופים מוליכים;

- **פריקת מברשת** – זרימת מטען ממשטח מבדד אל גוף מוליך;

- **פריקת מברשת מתפשטת** - זרימת מטען ממשטח דק ומבדד שנמצא צמוד לגוף מוליך.

התרחשות פריקה מציתה


פריקת ניצוץ (Spark Discharge)

המקור: גוף מוליך טעון, הנמצא סמוך אל גוף מוליך אחר בעל פוטנציאל שונה.

כמות האנרגיה: בלתי מוגבלת. תלויה בקיבול החשמלי של הגופים.

אופי הפריקה: פריצה של ניצוץ חד, בגוון כחלחל, בדרך כלל דרך האויר ובאופן מהיר שאינו נשלט.

יכולת ההצתה: תערובות דליקות של גזים, אדים, אבק, סיבים.

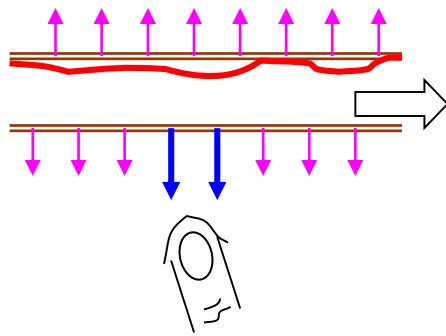


פריצה של $25,000\text{ v}$
במרווח של 20mm
בזמן של 1nS

21 11 2004

התרחשות פריקה מציתה

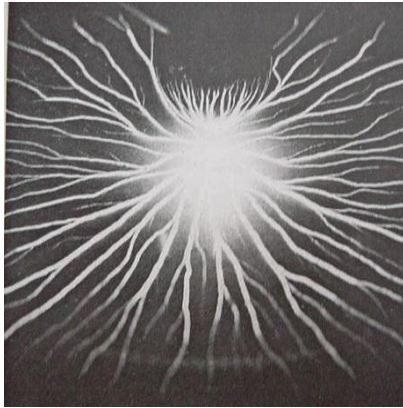
פריקת מברשת (Brush Discharge)



- **המקור:** משטח מחומר מבדד, טעון בצד אחד, הנמצא סמוך אל גוף מוליך.
- **כמות האנרגיה:** פריקה שלילית ממתן חיובי - עד 1.0 mJ , פריקה חיובית ממתן שלילי - עד 10 mJ .
- **אופי הפריקה:** פריקה שלילית – פריצות נפרדות, עם הבהקים ליד הגוף המוליך. פריקה חיובית – פריצה קבועה שנראית כמו מברשת, בעלת סיבים ליד המשטח המבדד וגזע יחיד ליד הגוף המוליך.
- **יכולת ההצתה:** תערובות דליקות של גזים ואדים בלבד.

התרחשות פריקה מציתה

פריקת מברשת מתפשטת (PBD)

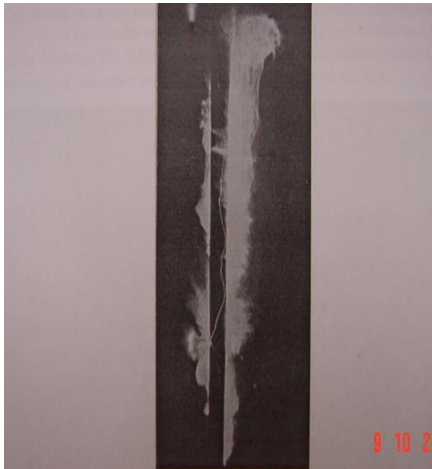


המקור: משטח מחומר מבדד, טעון בשני צדדיו במטען מנוגד, צמוד לגוף מוליך.

כמות האנרגיה: עד 1000 mJ.

אופי הפריקה: רשיפה רוחבית על פני משטח, או פריצה דרך עובי המשטח מצד אל צד. נראית כמרכז בוהק שאליו מתנקזים אפיקים רבים האוספים את המטען משטח נרחב של המשטח הטעון.

יכולת ההצתה: תערובות דליקות של גזים, אדים, אבק, סיבים.



התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים

תכונות הנוזל המשפיעות על הצטברות מטען חשמלי

מוליכות חשמלית – נגרמת עפ"י ריכוז חלקיקי "מזהמים מקוטבים" בנוזל. מוליכות נוזלים נחלקת ל-3 תחומים:

מבדד - מוליכות קטנה מ- 50 pS/m .

ממוצע - מוליכות בתחום של $50-10,000 \text{ pS/m}$.

מוליך - מוליכות גדולה מ- $10,000 \text{ pS/m}$.

מקדם דיאלקטרי – יכולת לאגור מטען חשמלי ביחס לאויר.

פרמטרים אלו נמדדים במעבדה, במיכשור ובתנאים מסוימים.

הם משמשים לאיפיון ההתנהגות האלקטרוסטטית של הנוזל,

כגון: חישוב זמן הדעיכה של מטען אלקטרוסטטי בנוזל.

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים

נוזלים שונים מוליכות חשמלית, $\mu\text{S/m}$ מקדם דיאלקטרי

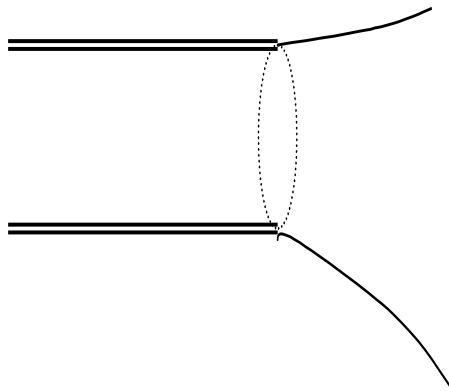
20.7	6×10^6	אצטון
21.1	1.7×10^8	אצטאלדהיד
4.6	30	דיאתיל אתר
32.7	4.4×10^7	מתנול
2.38	< 1	טולואן
2	< 50	בנזין unleaded
2.2	1 - 50	קרוסין
2	< 1	סולר

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים

תהליכים תעשייתיים הגורמים למטען אלקטרוסטטי

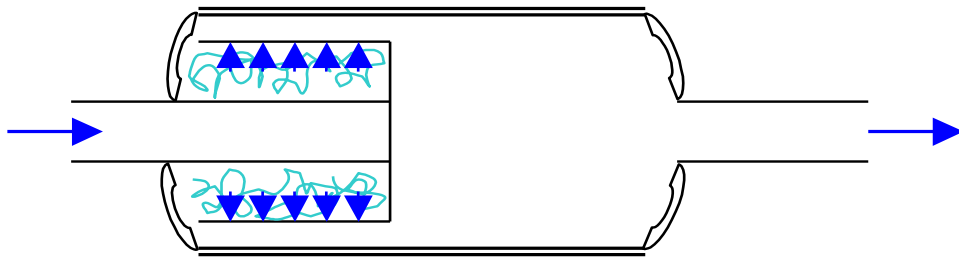
- **זרימה** בצנרת (מתכתית או מבדדת)
- **סינון** נוזלים בכל סוג של מסנן
- **התזה** מפתח צינור או דיזות
- **בחישה** וערבוב עם וללא מוצקים
- **פעפוע** גזים בתוך נוזל או תמיסה
- **הפרדת פאזות** במצב נייח או בזרימה איטית
- **צביעה** בתרסיס (מכל ידני או ציוד ממוכן)

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



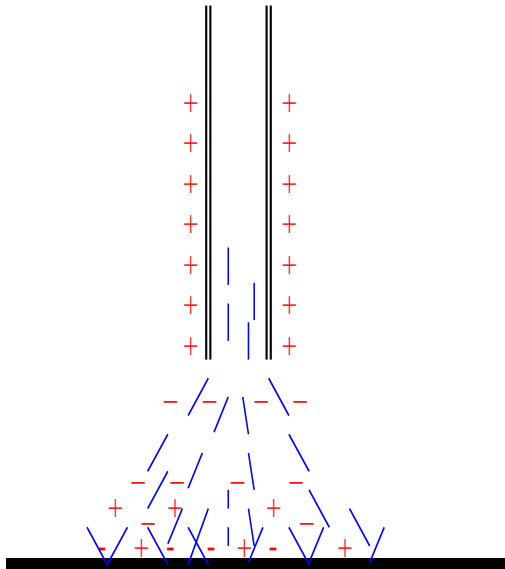
- זרימת נוזלים בצנרת

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



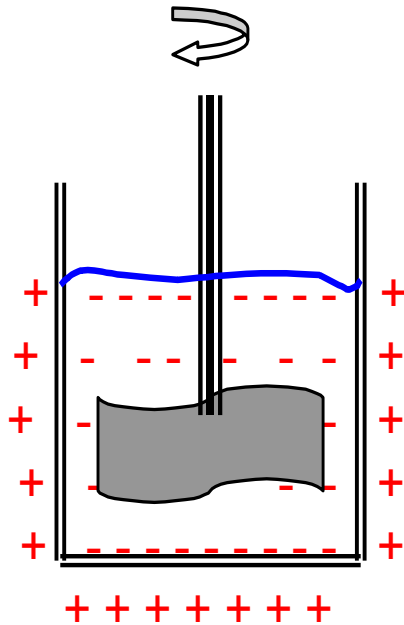
• סיבון נוזלים

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



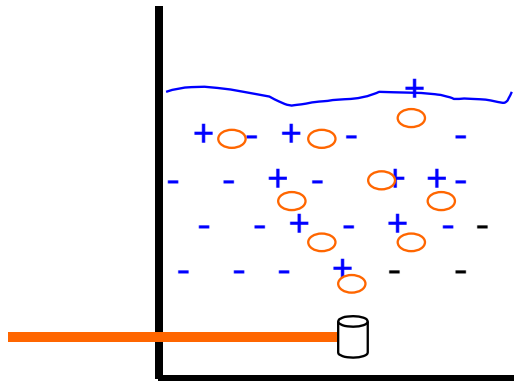
- התזה מפתח צינור או דיזה

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



- בחישה ועירבוב עם וללא מוצקים

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



- פיעפוע גז בתוך נוזל או תמיסה

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזלים



• צביעה בריסוס

14 11 2004

**גורמי הצתה בהזרמה ומילוי
של מכלי אחסון**

גורמי הצתה בהזרמה ומילוי של מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה בתוך צנרת

זרם הטעינה – המטען האלקטרוסטטי נוצר בנוזל עקב חיכוך בתוך שכבות הנוזל, וחיכוך הנוזל בדפנות הצנרת. היות והנוזל הטעון ממשיך לנוע בתוך הצנרת, תנועת המטען האלקטרוסטטי מהווה זרם חשמלי.

גורמים מגבירי מטען בתוך הצנרת – מסננים, מגופים, עיקולים בצנרת, מגדילים את שטח פני הנוזל שנחשפים לחיכוך ומגדילים את העירבול של הזרימה.

גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה בתוך צנרת

זרם הטעינה q שנוצר בצנרת מחושב לפי מהירות הזרימה v ,
קוטר הצנרת d , ומקדם β המאפיין את הזרימה הטורבולנטית.

$$I_p = \beta \cdot v^x d^y$$

x, y – מעריכי חזקה חסרי ממדים, שערכם נקבע קרוב ל-2.
 β – מאפיין זרימת הנוזל, בתחום של $(3.75-25) \times 10^{-6} \text{ Csm}^{-4}$.

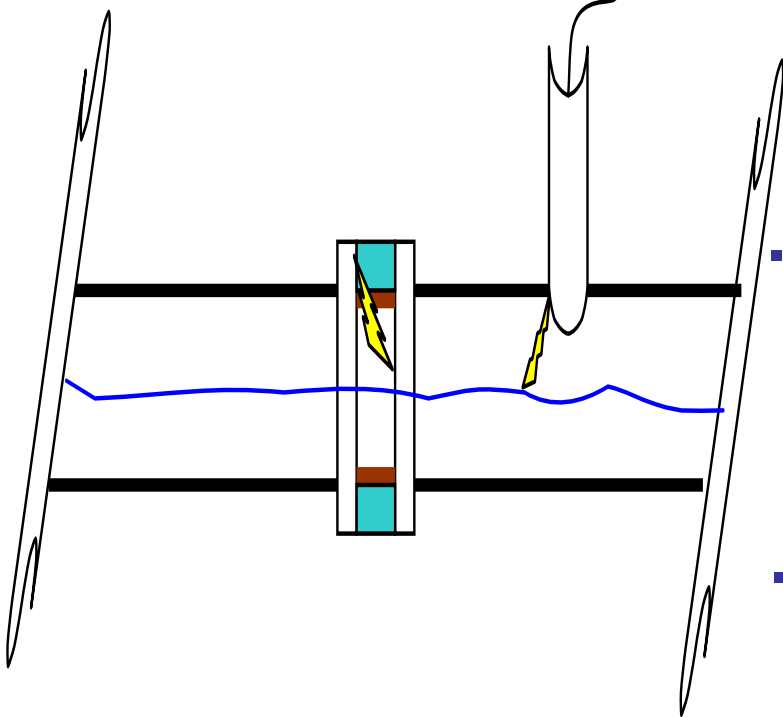
גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה בתוך צנרת

- פריקה מפני הנוזל אל אביזר מוליך כגון מד טמפרטורה, אטם מוליך וכדומה, תלויה בצפיפות המטען בנוזל:

$$\rho_p = \frac{I_p \cdot t}{C_p} \quad \frac{C}{m^3}$$

- עוצמת הפריקה תלויה בפוטנציאל האלקטרוסטטי של פני שטח הנוזל. בפוטנציאל נמוך, הפריקה תתרחש בתוך מרווח ניצוץ קטן מדי, מבלי שתהיה התלקחות של האווירה. הדליקה (quenching distance).



גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה בתוך צנרת

ערך אופייני

תצורת הזרימה

$10 \mu\text{C}/\text{m}^3$

• זרימת נוזל בצינור מתכתי, ללא מסנן:

$100 \mu\text{C}/\text{m}^3$

• זרימת נוזל בצינור עם מסנן $30-150 \mu\text{C}/\text{m}^3$:

• זרימת נוזל בצינור עם מסנן $30 \mu\text{C}/\text{m}^3 <$:

$2000-3000 \mu\text{C}/\text{m}^3$

⇒ בנוזלים לא-צמיגים (כגון קרוסין)

$\sim 5000 \mu\text{C}/\text{m}^3$

⇒ בנוזלים צמיגים בלתי-מוליכים

סף הסיכון: $30 \mu\text{C}/\text{m}^3$, סף הבטיחות המומלץ: $2.65 \mu\text{C}/\text{m}^3$

ערכים קריטיים של גורמי הצתה

ערכים קריטיים של גורמי הצתה

פריקת ניצוץ

תיתכן בין גוף מוליך אחד לבין גוף מוליך אחר כגון: יד אדם, כלי מתכתי.

לפריקת ניצוץ מציתה נדרש מירווח מינימלי שבו תיווצר הפריקה. גודל המירווח תלוי בתכונות האוירה הדליקה ו-MIE של הנוזל המעורב.

באוירה של פחמנים בין שני לוחות מקבילים, המירווח d מחושב לפי היחס: $MIE = 0.06d^2$

להתרחשות פריקה נדרשת עוצמת שדה חשמלי מינימלית, המושפעת בעיקר מצפיפות מולקולות הגז במירווח הפריקה (Paschen's law).
בלחץ אטמוספרי:

במירווח של 1 mm נדרש שדה חשמלי בעוצמה של 45 Kv/cm
במירווח של 10 cm נדרש שדה חשמלי בעוצמה של 26 Kv/cm

ערכים קריטיים של גורמי הצתה

פריקת מברשת

תיתכן בין פני משטח מבדד לבין גוף מוליך בעל רדיוס מעל 3 mm . עובי המישור משפיע על יכולת ההצתה של הפריקה באוירה הדליקה.

התרחשות פריקה בלחץ אטמוספרי בין משטח מבדד לגוף מוליך, נוצרת בפוטנציאל חשמלי מינימלי של $20 - 25\text{ Kv}$ (במישור פלסטי: 5 Kv).

פריקה "שלילית" נוצרת כאשר לנוזל מטען חשמלי חיובי. האנרגיה המרבית הצפויה בפריקה הינה עד 1 mJ .

פריקה "חיובית" נוצרת כאשר לנוזל מטען חשמלי שלילי. פריקה זו מתרחשת בסבירות נמוכה פי 10 מפריקה "שלילית", אך עוצמתה גדולה פי 10, והיא מעבירה כמות מטען חשמלי מרבית של עד $1\text{ }\mu\text{C}$.

להצתת אדי פחמנים נדרשת פריקת מטען מינימלי של $0.08\text{ }\mu\text{C}$.

ערכים קריטיים של גורמי הצתה

פריקת מברשת מתפשטת (PBD)

תיתכן בין גוף מוליך לבין משטח מבדד הצמוד למשטח מתכתי מוארק, או בין שני צידי אותו משטח מבדד כאשר הצדדים טעונים בקיטוב הפוך.

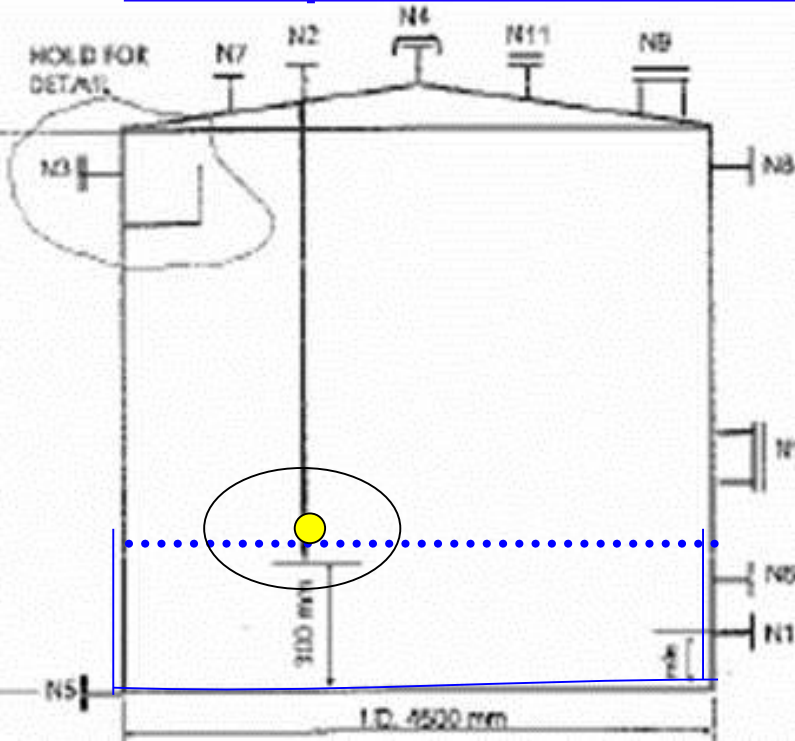
הפריקה עשויה להתפתח מתוך פריקת מברשת רגילה, לדוגמא: כאשר עובי משטח פוליקרבונט $80 \mu\text{m}$ והפוטנציאל החשמלי שלו 10 Kv .

להתרחשות הפריקה, נדרשים על המשטח המבדד צפיפות מטען חשמלי מינימלי של $250 - 800 \mu\text{C}/\text{m}^2$, ופוטנציאל חשמלי מינימלי של 4 Kv .

משטח בעל פוטנציאל חשמלי בתחום $4-8 \text{ Kv}$ מסוגל להעביר מטען חשמלי של כ- $1 \mu\text{C}$, ובתחום $8-12 \text{ Kv}$ מסוגל להעביר מטען חשמלי של כ- $100 \mu\text{C}$.

גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה לתוך מכל



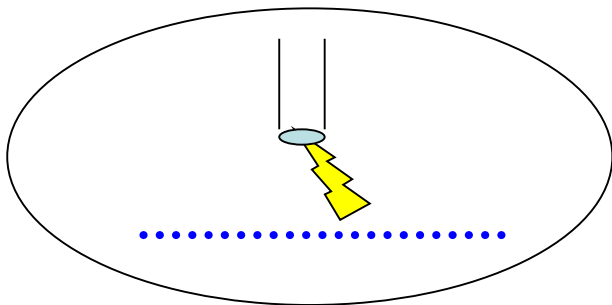
פריקה מפני הנוזל אל אביזר מוליך כגון: צינור המילוי, גג צף, זרוע יניקה, תלויה בצפיפות המטען בנוזל.

צפיפות המטען בנוזל מבדד:

$$\rho_t = \frac{\rho_0}{1 + \mu \rho_0 \frac{t_{D.P.}}{\epsilon}} \quad C/m^3$$

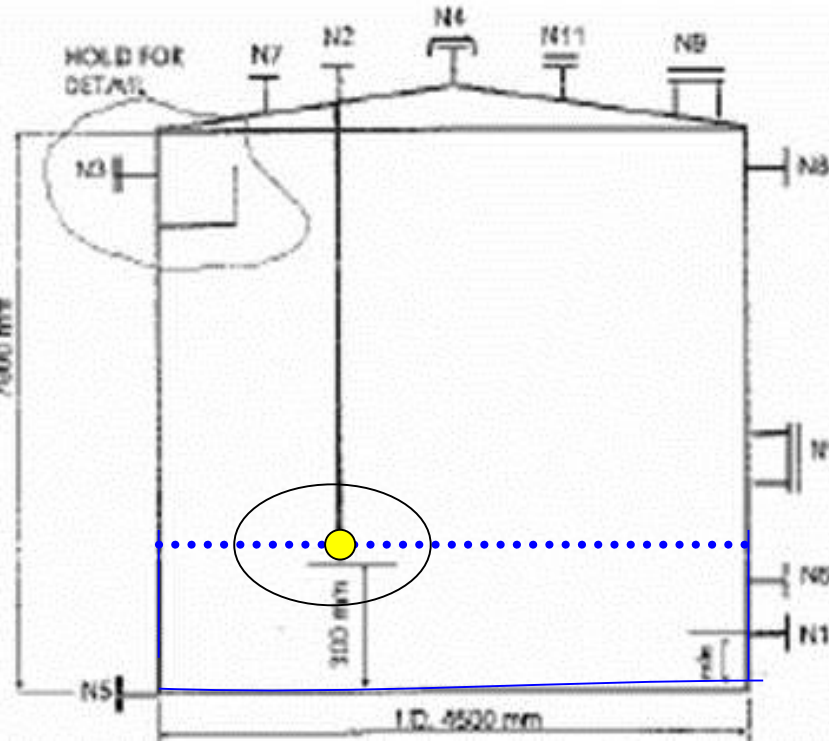
צפיפות המטען בנוזל מוליך:

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{D.P.}} \left(1 - e^{-\frac{t_{D.P.}}{\tau}} \right) \quad C/m^3$$



גורמי הצתה בהזרמה ומילוי מכלי אחסון

התנהגות אלקטרוסטטית של נוזל בזרימה לתוך מכל

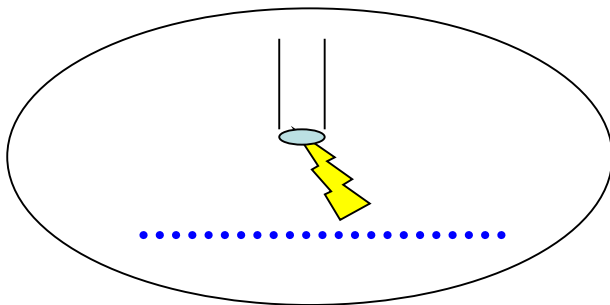


- יכולת ההצתה של הפריקה מפני הנוזל אל אביזר מוליך, תלויה בפוטנציאל האלקטרוסטטי הנוצר ע"י צפיפות המטען בנוזל:

$$\theta \leq 25 \text{ kV}$$

- הפוטנציאל האלקטרוסטטי הנוצר על פני הנוזל, מחושב לפי קוטר המכל וצפיפות המטען בנוזל. עבור מכל צר וגבוה מאוד:

$$\phi_{SURF} = (1/16)\rho_t d^2 / [\epsilon_0 (1 + \epsilon_l)] \text{ Volt}$$



הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: סיכון התלקחות של נוזל מוליך במכל

נתונים: נפח כללי 959m^3 , נפח עד 85.9 m^3 d.p., זמן מילוי 200 sec ,
קוטר הצינור 0.8m , מהירות זרימה 0.8m/s ,
מוליכות הנוזל 90 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2$,

חישוב פוטנציאל פני השטח בהתחשב בדעיכת המטען בזמן המילוי:

$$\tau = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2}{90 \cdot 10^{-12}} = 0.196 \text{ sec} \quad I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.8^2 = 1.536 \cdot 10^{-6} \text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{600}}{c_{600}} = \frac{1.536 \cdot 10^{-6} \cdot 200}{85.9} = 3.576 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\rho_t = \rho_p \frac{\tau}{t_{600}} \left(1 - e^{-\frac{t_{600}}{\tau}} \right) = 3.576 \cdot 10^{-6} \frac{0.196}{200} \left(1 - e^{-\frac{200}{0.196}} \right) = 0.00368 \cdot 10^{-6} \text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 0.00368 = 0.019 \text{ kV}$$

הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: סיכון התלקחות של נוזל מבדד במכל

נתונים: נפח כללי 110m^3 , נפח עד 4.8 m^3 d.p., זמן מילוי 687 sec ,
קוטר הצינור 0.1m , מהירות זרימה 0.8m/s ,
מוליכות נוזל 0.1 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2.1$,

חישוב פוטנציאל פני השטח כאשר המטען אינו דועך בזמן המילוי:

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85\text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 0.8^2 \cdot 0.1^2 = 0.024 \cdot 10^{-6}\text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{c_{300}} = \frac{0.024 \cdot 10^{-6} \cdot 687}{4.8} = 3.435 \cdot 10^{-6}\text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 3.435 = 18.24\text{ kV}$$

הערכים הקריטיים של גורמי הצתה

חישוב לדוגמא: השפעת מהירות זרימה במילוי נוזל מבדד במכל

נתונים: נפח כללי 110m^3 , נפח עד 4.8 m^3 d.p., זמן מילוי 510 sec (-25%),
קוטר הצינור 0.1 m , מהירות זרימה 1.2 m/s ,
מוליכות נוזל 0.1 pS/m , מק. דיאלקטרי $\epsilon = 2.1$,

חישוב פוטנציאל פני השטח כאשר המטען אינו דועך בזמן המילוי:

$$\tau_{theor} = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{\gamma} = \frac{8.85 \cdot 10^{-12} \cdot 2.1}{0.1 \cdot 10^{-12}} = 185.85\text{ sec}$$

$$I = 3.75 \cdot 10^{-6} \cdot 1.2^2 \cdot 0.1^2 = 0.054 \cdot 10^{-6}\text{ A}$$

$$\rho_p = \frac{I \cdot t_{300}}{c_{300}} = \frac{0.054 \cdot 10^{-6} \cdot 510}{4.8} = 5.732 \cdot 10^{-6}\text{ c/m}^3$$

$$\phi_{SURF} = 5.31 \rho_t = 5.31 \cdot 5.732 = 30.43\text{ kV} \square 25\text{ kV}$$

הזרמה של נוזלים בצנרת ומילוי מכלי אחסון – ניתוח וחישוב תנאי הצתת חשמל סטטי

סיכום

- (1) הפרמטרים הפיסיקליים המשפיעים על סיכון ההתלקחות שייכים למבנה המכלים, תכונות הנוזלים, והתכן ההנדסי של הפעילות.
- (2) לא ניתן להחיל "הנחיה כללית" על הזרמת נוזלים, אשר תבטיח מניעת התלקחות בכל סוגי הצינורות והמכלים.
- (3) סיכוני התלקחות מחשמל סטטי ניתנים לחישוב ולהערכה באופן כמותי, באמצעות ניתוח פיסיקלי ומתמטי.
- (4) בתהליכי היצור יש לבחון את הסיכון של התלקחות מחשמל סטטי, באמצעות בדיקה פרטנית בכל תהליך ולא באמצעות מידע כללי.

הזרמה של נוזלים בצנרת ומילוי מכלי אחסון – ניתוח וחישוב תנאי הצתת חשמל סטטי

מסמכי רקע וסימוכין

- [1] - Engineering Design for Lowering Fire Risk / G. Miller, ALTA 2005.
- [2] - Electrostatic Hazards in the Petroleum Industry / W.M. Bustin, W.G. Dukek.
- [3] - Incendivity of Sparks from Surfaces of Electrostatically Charged Liquids / H. Kramer, K. Asano.
- [4] - Avoiding Static Ignition Hazards in Chemical Operations / L.G. Britton.
- [5] - B.S. 5958 Part 1 & 2.
- [6] - CENELEC CLC/TR 50404.
- [7] - Static Hazards Study in Petroleum Facility Operations (internal report) / E. Zadok, 1/2007.
- [8] - The FPA© Method for Analysis of Static Electricity Risks / E. Zadok, 6/2006.

היווצרות מטען אלקטרוסטטי בזרימת נוזלים דליקים וחישוב הסיכון להתלקחות

לשאלות וקבלת הסברים בנושאי המצגת ניתן לפנות אל:

איל צדוק

מהנדס מומחה לבקרת חשמל סטטי

מנתח סיכונים של אוירה דליקה וציוד חשמלי

ת.ד. 108, הילה 24953, טל: 04-9572126, פקס: 04-9974585,

eyalzac@netvision.net.il

כל הזכויות שמורות