

# ФЛУОРОПЛАСТИ

**Тема.** Будова, властивості та одержання ПТФЕ.

**План.**

1. Загальні відомості про флуоропласти.
2. Властивості та застосування політетрафлуоретилену.
3. Виробництво політетрафлуоретилену.

## 1. Загальні відомості про флуоропласти

Після того, як був отриманий молекулярний флуор (виділений у вільному вигляді Анрі Муассаном у 1886 році при електролізі рідкого безводного флуористого водню, що містить домішки кислого флуориду калію  $\text{KHF}_2$ ; виробництво флуору здійснюється електролізом розплаву кислого флюориту калію  $\text{KF} \cdot 3\text{HF}$ , який утворюється при насиченні розплаву  $\text{KF} \cdot 3\text{HF}$  флуористим воднем до вмісту 40-41%  $\text{HF}$ ), почався стрімкий розвиток методів синтезу, заснованих на використанні флуору і деяких його найпростіших сполук як реагентів для заміни водню на флуор в органічних молекулах.

Назва «фтор» (від грец.  $\Phi\theta\acute{o}\rho\omicron\varsigma$  – руйнування), запропонована Андре Ампером в 1810 році, використовується лише в грецькій ( $\Phi\theta\acute{o}\rho\omicron$ ) та східнослов'янських мовах, а також у мовах, які запозичили цю назву з російської (наприклад, чуваська, таджицька чи монгольська). У багатьох країнах для елемента та речовини прийнято назви з коренем «флуор» від латинського *fluere* — «текти», за властивістю сполуки флуору флюориту ( $\text{CaF}_2$ ), знижувати температуру плавлення руди й збільшувати текучість розплаву.

Для **флуору** характерні **унікальні** властивості та можливості, серед яких найбільш чудовою є властивість, яка немає аналогів – можливість заміни будь-якого числа атомів водню на атоми цього елемента із збереженням багатьох властивих органічній речовині рис, таких, як рухливість, леткість, тугоплавкість, і одночасною появою принципово нових властивостей. Особливо яскраво це проявляється при повній заміні водню на флуор, що визначило трансформацію органічної хімії як хімії вуглеводнів та їх похідних в хімію флуорвуглеводнів – сполук з унікальним поєднанням властивостей, завдяки чому вони проникли практично в усі галузі науки і техніки.

Як і найпростіші алкени, **флуоровані похідні етилену** використовуються як мономері для отримання полімерів. Однак полімери, отримані з алкенів з

малим вмістом флуору – вінілфлуориду і флуоровмісних стиролів, за своїми властивостями мало відрізняються від вуглеводневих аналогів, що не виправдовує їх виробництво у великих масштабах.

З використанням **поліфлуорованих алкенів** в якості мономерів відкрилася принципово нова область в хімії та застосуванні полімерів. До того ж цікавою особливістю органічної хімії флуору є те, що поліфлуоровані сполуки найчастіше виявляються більш доступними, ніж сполуки з низьким вмістом флуору.

Флуоровмісні мономери володіють високою активністю в радикальному процесі. Всі мономери є газуватими, тому їх полімеризують під високим тиском в автоклавах з високоміцних сталей (витримують не менше 100 атм.). Їх полімеризація відбувається з великим екзотермічним ефектом, тому її проводять у водних середовищах в емульсії або суспензії для одержання високомолекулярних полімерів і в розчинах – для одержання низькомолекулярних полімерів.

До флуоропластів належать полімери тетрафлуоретилену (флуоропласт-4), трифлуорохлоретилену (флуоропласт-3), вініліденфлуориду (флуоропласт-2) та вінілфлуориду (флуоропласт-1), а також їхні кополімери: тетрафлуоретилену з гексафлуорпропіленом (ГФП) (флуоропласт-4МБ), співполімер тетрафлуоретилену з етиленом, відомий під торговими марками флуоропласт-40, співполімер тетрафлуоретилену з вініліденфлуоридом, відомий під торговою маркою флуоропласт-42, тетрафлуоретилену з вініліденфлуоридом (ВДФ) та етиленом, вініліденфлуориду з гексафлуорпропіленом, тетрафлуоретилену з флуорангідридом перфлуорвінілсульфокислоти.

**Унікальні властивості** флуоровмісних полімерів висунули їх у число провідних полімерних матеріалів. Вони володіють, зокрема, підвищеною термостійкістю (до 260°C), міцністю, хімічною стійкістю (навіть до окисників). Специфічні властивості флуоропластів визначаються, в основному, високим ступенем кристалічності, а також високою міцністю зв'язку C–F.

Таблиця. 7.1.

## Фізико-механічні властивості флуоропластів

Властивості	ПТФЕ	ПТФХЕ	ПВФ	ПВДФ
Густина при 20°C, кг/м <sup>3</sup>	2140 - 2250	2080 - 2160	1380 - 1400	1770 - 1800
Руйнуюча напруга, МПа:				
при розтягненні матеріалу	14 - 15	35 - 40	50 - 60	45 - 60
згині	11 - 14	60 - 80	80 - 90	80 - 100
стискуванні	20	60 - 85	-	90 - 100
Відносне видовження при розриві, %	250 - 500	20 - 40	70 - 150	40 - 100
Ударна в'язкість, кДж/м <sup>2</sup>	170 - 190	20 - 160	100	160 - 190
Твердість за Брінеллем, МПа	30 - 40	100 - 130	100 - 120	130 - 150
Темп.розм'якшення за Віка, °C	110	130	-	140 - 160
Діелектрична проникність при 10 <sup>10</sup> Гц	1,9 - 2,2	2,3 - 3	5 - 5,9	8 - 9
Тангенс кута діелектр. втрат при 10 <sup>10</sup> Гц	0,0002 - 0,0003	0,01 - 0,015	0,009 - 0,02	0,016 - 0,019
Питомий електропір поверхневий, Ом	10 <sup>18</sup>	10 <sup>17</sup>	-	-
об'ємний, Ом·м	10 <sup>15</sup>	10 <sup>16</sup>	4·10 <sup>11</sup> - 7·10 <sup>12</sup>	2·10 <sup>10</sup> - 10 <sup>12</sup>
Електрична міцність при товщині зразку 4мм, МВ/м	25 - 27	13 - 15	25	14 - 16

Клас флуоровмісних полімерів включає найрізноманітніші за властивостями продукти, зокрема:

- жорсткі пластики і еластомери;
- нерозчинні полімери і такі, що не набухають, та полімери, які легко розчиняються у звичайних розчинниках;
- полімери, що витримують тривале радіаційне опромінення;
- полімери, здатні працювати в особливо жорстких умовах, зокрема, плівки, що витримують температуру рідкого водню;
- волокна з міцністю, що перевершує міцність високолегованої сталі;
- корозійностійкі покриття, малопроникні для вологи та інших корозійних середовищ, стійкі до атмосферних впливів;
- плівки з унікальними діелектричними властивостями.

**Особливості переробки** флуоровмісних полімерів визначаються кількістю атомів флуору в молекулі мономеру. Так, наприклад, політетрафлуоретилен (ПТФЕ) не плавиться і сформувати вироби з нього можна лише спіканням при високій температурі (360-380°C) попередньо спресованих полімерних таблеток.

Полімер трифторхлоретилену уже можна переробляти звичайними методами переробки полімерів, однак при дуже жорстких режимах. Полімери вінілфлуориду переробляються більш легко, але тільки в присутності стабілізаторів.

Всі флуорвмісні полімери значно дорожчі за аналогічні полімери, що не містять флуору. Через необхідність старанної їх очистки від кисню, який призводить до вибухонебезпечного процесу розкладу, а також через складність проведення технологічного процесу полімеризації (підвищений тиск, значне виділення тепла при полімеризації мономерів) і складність переробки вони менш доступні, ніж інші полімери. Однак цінний комплекс властивостей і більший термін служби в агресивних середовищах робить виправданим використання флуоровмісних полімерів, особливо в спеціальних областях техніки.

## 2. Властивості та застосування політетрафлуоретилену

Найбільш великотоннажний флуорвмісний полімер (90 % виробництва від 18. тис. тонн світового виробництва флуоропластів) – політетрафлуоретилен (флуоропласт-4), володіє різноманітними унікальними властивостями.

ПТФЕ має лінійну будову, що впливає на його ступінь кристалічності, який становить 80-85 %. Це є білий, непрозорий термопластичний полімер з густиною 2250-2270 г/см<sup>3</sup> та насипною густиною 400-500 кг/м<sup>3</sup> – найважчий з усіх відомих органічних полімерів. ММ полімеру лежить у межах  $2,5 \cdot 10^6$  -  $10^7$  (в залежності від методу одержання).

Молекула ПТФЕ в кристалічному стані має форму спіралі (рис. 7.1). Таку форму молекула приймає у зв'язку з тим, що атоми флуору мають великий радіус Ван дер Ваальса і при плоскій зигзагоподібній конформації, як у поліетилену, не вкладаються на довжині 0,254 нм (2,54 Å), яка відповідає відстані між двома атомами вуглецю, які розділені третім атомом.

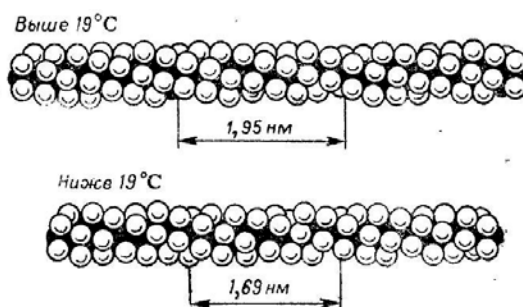


Рис. 7.1. Модель ланцюга ПТФЕ

Рентгеноструктурний аналіз ПТФЕ показує, що кристалічна структура зазнає два оборотних переходи при  $19^{\circ}\text{C}$  і  $30^{\circ}\text{C}$ . Нижче  $19^{\circ}\text{C}$  ланка, яка повторюється, складається з 6 витків і 13 груп  $\text{CF}_2$ , спіраль укладається в триклинну гратку. При  $19\text{-}30^{\circ}\text{C}$  спіраль злегка розкручується і складається з 7 витків і 15 груп  $\text{CF}_2$ , утворюючи гексагональну упаковку. Вище  $30^{\circ}\text{C}$  спіраль стає нерегулярно закрученою, але аж до температури плавлення в кристалічній області зберігається гексагональна упаковка ланцюга. Нижче  $19^{\circ}\text{C}$  відстань між повторюваними ланками ланцюга 1,688 нм (16,88 Å), вище  $19^{\circ}\text{C}$  – 1,95 нм.

У розплаві форма молекулярних ланцюгів практично не змінюється і зберігається висока впорядкованість структури. Розплав ПТФЕ має надзвичайно низьку міцність і не проявляє каучукоподібних властивостей. Це вказує на високу жорсткість молекули ПТФЕ.

Визначальну роль у конфігурації ланцюга в кристалічному ПТФЕ грають внутрішньомолекулярні, а не міжмолекулярні сили взаємодії. Про малу кінетичної гнучкості молекули ПТФЕ свідчить таке специфічне випробування, як удар кулею. ПТФЕ розлітається на дрібні осколки, як скло, тоді як поліетилен зазнає пластичну течію. Завдяки закручуванню вуглецевого ланцюга і великому радіусу ван дер Ваальса флуору молекула ПТФЕ утворює майже ідеальний циліндр з щільною зовнішньою оболонкою з атомів флуору. Саме такою будовою молекули пояснюється унікальна хімічна стійкість і багато інших властивості ПТФЕ. Жорстка стержнеподібна конфігурація молекули зумовлює дуже низький коефіцієнт тертя, холодотекучість, високу пластичність ПТФЕ при низьких температурах.

ПТФЕ стійкий до високих температур і вироби з нього можуть експлуатуватися при  $260^{\circ}\text{C}$ , а іноді і при температурі до  $327^{\circ}\text{C}$ . При  $327^{\circ}\text{C}$  руйнується кристалічна гратка полімеру і він стає прозорим та аморфним полімером з високою в'язкістю розплаву, що потребує спеціальних методів переробки цього полімеру у вироби. При охолодженні він знову кристалізується. Кристалізація супроводжується значною усадкою і підвищенням густини полімеру з 1830 до 2240  $\text{кг}/\text{м}^3$ . Співвідношення кристалічної та аморфної фаз у охолодженого полімеру залежить від швидкості охолодження. Повільне охолодження призводить до підвищеної кристалічності, а швидке охолодження з  $327$  до  $250^{\circ}\text{C}$  – до загартування, тобто нижче  $250^{\circ}\text{C}$  полімер зберігає структуру зі зниженою кристалічністю. Температура

склування аморфної фази політетрафлуоретилену 120°C, однак еластичність полімеру зберігається і при температурах, близьких до нуля.

При 350 °C починається розклад, який супроводжується виділенням ТФЕ та інших продуктів, при 450°C починається видима деструкція ПТФЕ.

Його мінімальна робоча температура рекордна для полімерів і близька до температури абсолютного нуля (-269°C).

Хімічна стійкість ПТФЕ перевищує стійкість всіх інших полімерів, благородних металів та антикорозійної кераміки: він не розчиняється і не набухає ні в одному з відомих розчинників при звичайних температурах, лише при 300 °C починає розчинятися у флуорорганічних сполуках та руйнується при дії розплавлених лужних металів (та розчинів їх в аміаку) і флуору при підвищених температурах. Вода не пом'якшує ПТФЕ та не має ніякої дії на нього при найдовшому випробуванні. ПТФЕ називають “органічною платиною” та “алмазним серцем в шкурі носорога”.

ПТФЕ має надзвичайно високі діелектричні властивості: питомий опір складає  $10^{18}$  Ом, що на три порядки вище, ніж у поліетилену та полістиролу, причому цей опір практично не залежить від температури і зберігається до 260°C.

ПТФЕ має найменший серед відомих матеріалів коефіцієнт тертя (занесений у книгу рекордів Гіннеса як найслизькіший матеріал у світі). Високий опір зносу і низький коефіцієнт тертя зробили цей полімер незамінним матеріалом для виробництва підшипників, що працюють в агресивних середовищах або в контакті зі зрідженими газами (кисень, водень і т.п.) та не вимагають мастила.

Незвичайні властивості (надзвичайно висока в'язкість розплаву, не розчиняється у жодному з відомих розчинників) унеможливають застосування для нього традиційних методів переробки термопластів, внаслідок чого його переробку доводиться вести методами, подібними з процесами порошкової металургії та отримання кераміки. Порошки дрібнодисперсного ПТФЕ можна переробляти екструзією в трубі та наносити у вигляді тонких плівок на метали.

ПТФЕ нестійкий до дії радіоактивного випромінювання, і за цих умов відбувається його деструкція з утворенням крихких олігомерів та  $\text{CF}_4$ .

Введення в полімер різних матеріалів, що витримують температуру спікання флуоропласту дозволяє підвищити його зносостійкість, міцність,

твердість або пружність. Найбільш поширені наповнювачі можна розділити на наступні групи:

1) порошкоподібні: металеві – мідь, срібло, свинець, нікель, бронза, олово, алюміній; мінеральні – кварц, склопорошок, сита, кераміка, слюда, каолін; органічні – графіт, сажа, вугілля, кокс;

2) волокнисті (армувальні наповнювачі): неткані – скловолокно, азбестове, графітове, кварцове, базальтове волокно, металеві вуса; ткані – склотканини, графітові, азбестові і базальтові тканини;

3) армувальні наповнювачі каркасного типу: металева зім'ята сітка; зім'ята фольга.

Багато пластмас випереджають ПТФЕ за міцністю, але з усіх пластмас лише він зберігає свої властивості в такому широкому інтервалі температур.

**ПТФЕ широко використовується:**

- в машинобудуванні для виготовлення антифрикційних виробів (підшипники ковзання, поршневі кільця, транспортні стрічки, втулки та ін.);

- для ущільнюючих матеріалів при роботі в агресивних середовищах (стрічки, прокладки, сальникові набивки);

- у виготовленні електро- та радіотехнічних виробів (теплостійка та морозостійка електроізоляція – конденсаторна та електроізоляційна плівка, пластини, кільця, диски, лакотканина та ін.);

- в хімічній промисловості для виготовлення пластин, кранів, вентилів, клапанів, насосів, мембран і т.д., які використовуються при високій температурі в середовищі концентрованих мінеральних кислот;

- для покриттів по металах та кераміці;

- для одержання порошків для фільтрування агресивних рідин;

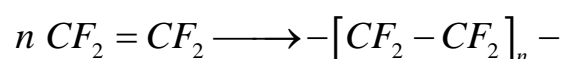
- для волокна та тканин;

- в ядерній техніці, авіабудуванні, космічній техніці та ін.

### **3. Виробництво політетрафлуоретилену**

#### **3.1. Одержання ТФЕ і ПТФЕ.**

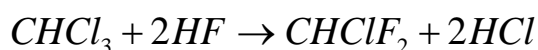
Політетрафлуоретилен (ПТФЕ) отримують полімеризацією вихідного мономера – тетрафлуоретилену (ТФЕ) згідно схеми



різними методами у вигляді пухкого волокнистого порошку або білої чи жовтуватої непрозорої водної дисперсії, з якої при необхідності осаджують тонкодисперсний порошок полімеру з частками розміром 0,1-0,3 мкм.

ТФЕ – безколірний газ без запаху, нетоксичний,  $t_{\text{кип.}} = -76,3^\circ \text{C}$ . Нерозчинний у воді, розчинний у органічних розчинниках. Легко вступає в реакції з хлором і бромом, а також в реакції заміщення галогенів і полімеризації.

У промисловості отримують через дифлуорхлорметан (фреон-22). На першій стадії флуорують хлороформ сухим флуороводнем в автоклаві при  $100^\circ \text{C}$  (в присутності  $\text{SbF}_5$ ):



На другій стадії здійснюють піроліз дифлуорхлорметану в трубчастому реакторі зі срібла чи платини при  $t = 600\text{-}800^\circ \text{C}$  за реакцією:



ТФЕ легко полімеризується за радикальним механізмом у присутності будь-яких джерел радикалів. В якості ініціаторів застосовують переважно пероксиди, персульфати, азосполуки або різні редокс-системи. Редокс-системи знижують енергію активації полімеризації, причому збільшується швидкість і знижується оптимальна температура полімеризації. Ініціювання може також здійснюватися випромінюваннями високих енергій. Діапазони можливих температури і тиску полімеризації широкі (від  $-150$  до  $200^\circ \text{C}$  і тиск від декількох сотень паскаль до  $10^6$  МПа).

З цим пов'язане випадкове відкриття його полімеризації: в 1938 р. американець Рой Планкетт експериментував з властивостями газів в ході розробки охолоджувальних речовин; випадково залишивши на вулиці один із зразків, на ранок Планкетт виявив, що з балона з тетрафлуоретиленом раптово припинився вихід газу, а після розкриття балона виявили білий порошок – політетрафлуоретилен, що виявився унікальним матеріалом.

Для підтримки певного значення рН середовища (2,5-3) вводять буферні речовини.

Полімеризація тетрафлуоретилену екзотермічна з великим тепловиділенням ( $197$  кДж/моль або  $47$  ккал/моль), і при її неконтрольованому перебігу може статися вибух, наприклад при полімеризації в блоці через місцеві перегріву.

ТФЕ легко полімеризується при зберіганні. Для безпечного зберігання тетрафлуоретилен ретельно очищають від кисню, який може спричинити вибух мономера з розкладанням його до  $\text{C}$  та  $\text{CF}_4$ , і додають інгібітори полімеризації



(бутилмеркаптан, третинні аміни та ін.). При її проведенні приймаються спеціальні заходи для ефективного відведення тепла. В іншому випадку процес супроводжується термічним розкладанням як мономера, так і утвореного полімеру, що різко погіршує якість одержуваного матеріалу.

ТФЕ відрізняється не тільки найбільш високою швидкістю полімеризації, але і здатністю утворювати полімери особливо високої молекулярної маси, що досягає значень десятків мільйонів. Молекулярна маса інших флуоровмісних полімерів може коливатися в межах  $8 \cdot 10^4$ - $6 \cdot 10^5$ . Високу активність ТФЕ в реакціях полімеризації обумовлює надзвичайно низька енергія розкриття подвійного зв'язку (168 кДж/моль). Однак до відкриття Планкеттом в 1938 р. самовільної полімеризації ТФЕ навіть не припускали можливості отримання полімерів ТФЕ.

Дивовижні властивості політетрафлуоретилену і легкість полімеризації ТФЕ привели до запатентування тefлону в 1945 р. і виробництва з 1946 р. першим дослідно-промисловим виробництвом американської фірми «Дюпон». На сьогоднішній день винахід приніс його автору і компанії-виробнику мільярди доларів остання займає 3-є місце у світовому рейтингу виробників хімії.

Полімеризація ТФЕ може здійснюватися суспензійним, емульсійним способами, і в розчині (а також деякими специфічними).

Виробництво **високомолекулярного** ПТФЕ здійснюють полімеризацією ТФЕ в водній суспензії та емульсії.

Особливий інтерес представляють способи отримання **низькомолекулярного** ПТФЕ в розчині, що пов'язано як з особливостями цього методу полімеризації, так і з тим, що властивості і призначення такого полімеру принципово відрізняються від таких для високомолекулярного ПТФЕ. В розчині звичайно одержують низькомолекулярні рідкі речовини, наприклад, фторовані спирти  $\text{H}(\text{CF}_2\text{CF}_2)_n\text{CH}_2\text{OH}$ , де  $n=1\div 6$ , здатні для одержання гідроперфторкарбонів кислот – емульгаторів емульсійної полімеризації, або полімери з низькою молекулярною масою, які використовують в якості пластифікаторів та мастил. Для цього полімеризацію проводять в присутності  $\text{CHCl}_3$  або  $\text{CCl}_4$ , на яких передають полімеризаційний ланцюг.

Полімеризація ТФЕ в масі протікає швидко, але вона не застосовується в промисловості через небезпеку бурхливого розвитку процесу і можливість вибуху.

При полімеризації слід дотримуватись таких умов:

– застосування мономерів особливо високого ступеня чистоти,

- максимально можлива відсутність в середовищі полімеризації кисню (менше 0,002 %),
- виключення попадання в реакційне середовище мастил, які використовуються для ущільнення сальника мішалки реактора, та інших забруднень,
- здійснення полімеризації в реакторах з нержавіючої сталі.

### **3.2. Одержання і властивості суспензійного ПТФЕ**

Процес виробництва ПТФЕ полімеризацією ТФЕ в воді під тиском і нагріванні в присутності ініціатора, але без застосування емульгатора носить назву **суспензійного** (в суспензійних методах слабкі емульгатори використовують як стабілізатори суспензії).

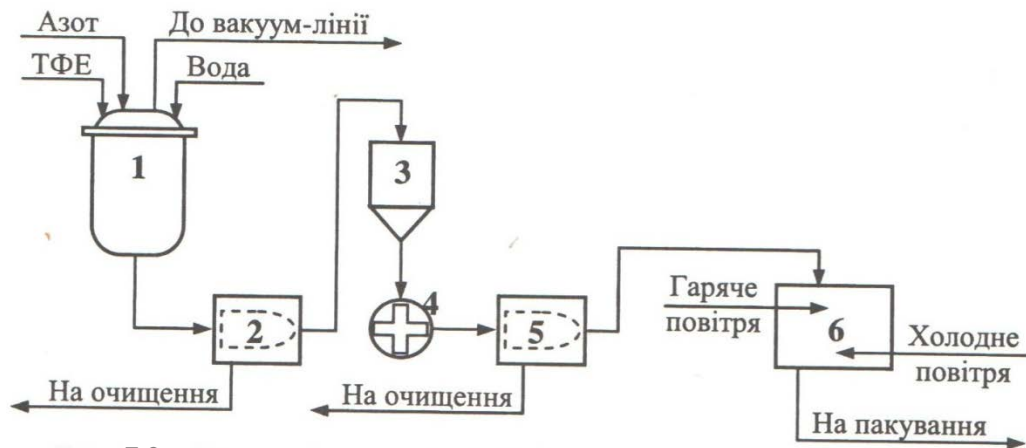
Проведення суспензійної полімеризації у воді дозволяє досить ефективно відводити теплоту, що виділяється при полімеризації. У зв'язку з тим, що вода не бере участі в реакціях передачі ланцюга при радикальній полімеризації вінілових мономерів, здійснення полімеризації у воді дозволяє, застосовуючи чисті мономер та інші компоненти, отримувати ПТФЕ з високою молекулярною масою (до  $10^7$ ).

Технологічний процес складається з таких стадій: завантаження компонентів в автоклав, полімеризація ТФЕ, виділення, промивка та сушка полімеру (рис. 7.2).

В автоклав 1 з мішалкою, сорочкою для нагріву і охолодження, попередньо продутий азотом для повного витіснення повітря, яке інгібує реакцію полімеризації і призводить до утворення полімеру з невеликою ММ, завантажують деіонізовану воду, ініціатор (персульфат калію в кількості 0,2% від водної фази) та регулятор рН середовища (буру). Потім після охолодження та вакуумування в автоклав вводять ТФЕ (в кількості 30% від водної фази) та при перемішуванні піднімають температуру до 70-80°C. Реакція протікає під тиском 4-10 МПа. Швидкість реакції зростає із підвищенням тиску в автоклаві. Реакційну масу потрібно охолоджувати. Зазвичай за 1 годину при 80°C утворюється 85-90% ПТФЕ. Закінчення реакції визначають за падінням тиску.

Після закінчення процесу автоклав охолоджують, ТФЕ, який не вступив в реакцію, витісняють азотом, суспензію полімеру в воді подають в центрифугу 2 та відділяють рідку фазу. ПТФЕ збирають в бункер 3, подрібнюють в дробарці 4,

багатократно промивають гарячою водою та після центрифугування в центрифугі 5 сушать в сушарці 6 при 150°C.



**Рис. 7.2. Технологічна схема виробництва політетрафлуоретилену суспензійним методом:**

*1 – автоклав; 2, 5 – центрифуги; 3 – бункер; 4 – дробарка; 6 – сушарка*

ПТФЕ являє собою білий прозорий волокнистий порошок.

Суспензійний ПТФЕ через високу в'язкість розплаву переробляється спеціальними методами, тому прагнуть отримати полімер з максимальною молекулярною масою (більше  $10^7$ ). Така особливість дозволяє в певних межах варіювати умови полімеризації (температуру, тиск), а не дотримуватися суворо визначених параметрів.

Полімер при суспензійній полімеризації отримують у вигляді пухких гранул діаметром від 1 до 6 мм. Гранули мають пористість до 80% і через незмочуваність полімеру в основному плавають на поверхні води. Для отримання придатних до переробки порошоків гранули подрібнюють у воді і сушать. Звичайні марки ПТФЕ представляють собою порошки з розміром частинок 50-500 мкм, насипною густиною 0,2-0,8 г/см<sup>3</sup> і питомою поверхнею 2-4 м<sup>2</sup>/г.

Виробництво електроізоляційної плівки, виготовлення тонких листів та одержання інших прецизійних виробів вимагають застосування більш тонких за дисперсністю порошоків. Такі порошки дозволяють отримувати вироби з високими фізико-механічними властивостями, малою усадкою, мінімальною пористістю, стабільністю розмірів і гладкою поверхнею. Вони незамінні для приготування наповнених композицій ПТФЕ з графітом, склом, коксом і іншими наповнювачами. Порошки з розміром частинок 10-50 мкм отримують

подрібненням звичайного порошку на струменевих млинах. Питома поверхня таких порошоків доходить до 5 м<sup>2</sup>/г.

Зазначені марки ПТФЕ представляють собою порошки, які легко утворюють грудки, вони не володіють сипучістю і не можуть бути використані для автоматичних методів переробки. Для додання сипучості порошоків ПТФЕ розроблені різні способи гранулювання. Гранули можна отримати при інтенсивному механічному перемішуванні порошку у воді, в галогеновмісних органічних середовищах (C<sub>2</sub>C<sub>14</sub>, СНС<sub>13</sub>, СС<sub>14</sub> та ін) або в емульсії води з органічними рідинами (бензин, гексан, октан та ін.) Гранулювання здійснюється і при сухому перемішуванні.

Суспензії тefлону в органічних розчинниках застосовують для отримання покриттів.

В інших випадках органічні розчинники при отриманні високомолекулярного ПТФЕ, як правило, не використовуються, так як, по-перше, вони мають високу вартість, а по-друге, в їх присутності знижується молекулярна маса ПТФЕ через розвиток реакції передачі ланцюга на розчинник.

### **3.3. Одержання і властивості емульсійного ПТФЕ**

**Емульсійний** метод полімеризації тетрафлуоретилену був розроблений і здійснений в промисловості на десять років пізніше, ніж суспензійний спосіб. Він дозволяє отримувати водні дисперсії ПТФЕ, придатні для нанесення плівкових покриттів, просочення субстратів, а також для отримання тонкодисперсного порошку, здатного перероблятися в готові вироби екструзією з паст (суміш порошку ПТФЕ з вуглеводнями).

В процесі полімеризації тиск і температуру підтримують постійними. Залежно від застосовуваного ініціатора (персульфат амонію, пероксид янтарної кислоти, пероксид водню) температуру полімеризації підтримують у межах від 30 до 90°C, тиск від 0,8 до 35 МПа.

Полімеризація проводиться в присутності невеликих кількостей йоногенних поверхнево-активних речовин (амонієвої чи калієвої солі перфторкарбонної чи моногідроперфторкарбонної кислоти), водорозчинних ініціаторів і стабілізаторів дисперсії (парафінові вуглеводні або флуорхлорвуглеводні).

В якості емульгаторів, крім солей перфлуоркислот, можуть використовуватися солі:  $\text{N}(\text{C}_2\text{F}_4)_4\text{COONH}_4$ ;  $\text{Cl}(\text{CF}_2\text{CFCl})_n\text{COONH}_4$ , де  $n = 3-5$ ;  $\text{N}(\text{CF}_2)_n(\text{CH}_2)_m\text{A}$ , де А – іонна гідрофільна група. Нефлуоровані диспергуючі агенти не застосовуються в якості емульгатора внаслідок участі водню в реакціях передачі ланцюга і інгібування процесу. Вміст емульгатора в реакційному середовищі завжди значно нижчий критичної концентрації міцелоутворення (0,68%). При високому вмісті емульгатора утворюються частинки полімеру, які мають витягнуту форму і погано підлягають екструзії.

Для виключення коагуляції дисперсії при малому вмісті емульгатора вводиться стабілізатор. В якості стабілізаторів запропоновані різні рідкі в умовах полімеризації вуглеводні (октадекан, цетан, парафінова олія, парафіни та ін), а також флуорхлорвмісні вуглеводні ( $\text{CCl}_4$ ,  $\text{CHCl}_3$ ,  $\text{CHF}_2\text{Cl}$ ,  $\text{CF}_2\text{ClCFCl}_2$  тощо) і перфлуорвуглеводні.

Недоліком емульсійної процесу в порівнянні з суспензійним, є його чутливість майже до всіх змін параметрів полімеризації і складу суміші, що полімеризується. Неправильно підібраний режим полімеризації може призвести до втрати екструзійної здатності полімеру і зниження якості покриттів, які одержуються з водних дисперсій. Велике значення для переробки полімеру має форма дисперсних частинок, що утворюються при полімеризації. Необхідно, щоб частки мали еліпсоїдну форму близьку до сферичної.

Недоліком є також низька технологічність процесу в силу необхідності використання ПАР і малої стійкості емульсії, яка легко коагулюється при руйнуванні стабілізатора.

Молекулярна маса емульсійного ПТФЕ трохи нижче, ніж суспензійного, і досягає  $2,5 \cdot 10^6 - 3,5 \cdot 10^6$ . Це пов'язано з більш високою температурою полімеризації, іншою, в порівнянні з суспензійною полімеризацією, системою ініціювання, колоїдною формою частинок полімеру, поверхня яких змочується водою за рахунок сорбції ПАР, і наявністю стабілізатора (вуглеводню), здатного брати участь в реакціях передачі ланцюга.

Середній розмір часток, які зазвичай одержуються при емульсійній полімеризації ТФЕ, становить 0,25 мкм (0,1-1 мкм). У ряді випадків для прискорення нанесення покриттів і інших призначень доцільно використовувати дисперсії з більш великими частками. Для збільшення стійкості дисперсій з укрупненими частинками додають невелику кількість (0,0005-0,0015% мас.) антикоагулянтів (терпенових вуглеводнів) перед

полімеризацією або після досягнення ступеня перетворення 7-10% вводять звичайні або флуоровані аніоногенні ПАР. Цей прийом дозволяє отримати дисперсії з вмістом ПТФЕ 30%.

Нижче приведені типові рецептури суспензійної (1), емульсійної (2) полімеризації тетрафлуоретилену та суспензійної (2) полімеризації трифлуорхлоретилену (мас. ч):

Склад рецептури полімерів	1	2	3
Тетрафторетилен.....	100	100	-
Трифторхлоретилен.....	-	-	100
Вода.....	300 – 1000	300 – 1000	100 – 200
Ініціатор.....	0,15 – 1,0	0,15 – 1,0	0,01 – 0,5
Регулятор рН середовища	0,6 – 1,5	0,6 – 1,5	0,3 – 1,5
Емульгатор.....	-	0,5 – 2,0	-
Фосфат заліза.....	-	-	0,01 – 0,5
Бісульфат натрію.....	-	-	0,01 – 0,5

Введення в готову суспензію ПТФЕ поверхнево-активних речовин в кількості 9-12% призводить до покращення концентрованих суспензій, які містять 50-60% полімеру.

### 3.4.Фотополімеризація ТФЕ.

Фотополімеризація ТФЕ становить інтерес у зв'язку з можливістю отримання найтонших плівок для електроізоляції деталей мікроелектронних установок. Такі плівки отримують при температурі 0-200 ° С і тиску 1,33-101 кПа, а в ряді випадків – менше 0,4 кПа, шляхом опромінення УФ-випромінюванням з довжиною хвилі 180-240 нм. Температура плавлення одержуваного полімеру 330° С.

## Лекція 8.

**Тема.** Будова, властивості та одержання флуоропласту–1, флуоропласту–2 і флуоропласту–3 та кополімерів флуормономерів.

### План.

1. Одержання, властивості та застосування політрифлуохлоретилену.
2. Одержання, властивості та застосування полівініліденфлуориду.
3. Одержання, властивості та застосування полівінілфлуориду.
4. Одержання, властивості та застосування кополімерів флуормономерів.
5. Техніка безпеки при виробництві фторопластів.

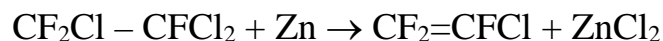
### 1. Одержання, властивості та застосування політрифлуорхлоретилену.

#### 1.1. Одержання політрифлуорхлоретилену.

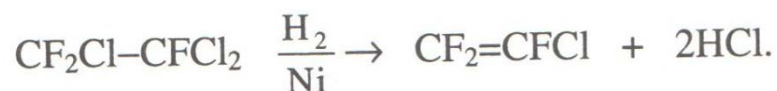
Політрифлуорхлоретилен отримують з трифлуорхлоретилену.

Трифлуорхлоретилен (ТФХЕ)  $\text{CF}_2=\text{CFCl}$  (фреон-113) – за н.у – газ без запаху, який конденсується в рідину при  $-26,8^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{топл.}} -157,2^\circ\text{C}$ . При зберіганні мономер в присутності кисню повітря здатний полімеризуватися при кімнатній температурі.

Одержують дехлоруванням 1,1,2-трифлуор-1,2,2-трихлоретану цинковим порошком у спиртовому середовищі при  $40^\circ\text{C}$  з виходом 80-90 %:



За іншим методом синтез ведуть у трубчастому реакторі з неіржавіючої сталі при  $550^\circ\text{C}$ . Хлор тут відщеплюється під дією водню над нікелевим каталізатором:



Використовується ТФХЕ для гомополімеризації і кополімеризації з вініл- і вініліденфлуоридом, ВХ, вінілацетатом, стиролом і деякими іншими мономерами.

Отримання флуоропласту-3 можна подати рівнянням:



Флуоропласт-3 має молекулярну масу від 20000 до 360000.

Широкий молекулярно-масовий розподіл у флуоропласту-3 пов'язаний з наявністю у мономері атома хлору, що уможливорює, на відміну від тетрафлуоретилену, реакцію передавання ланцюга на мономер:



Саме ця реакція не дає змоги одержати флуоропласт-3 з молекулярною масою понад 360000.

ТФХЕ полімеризується в масі, органічному розчиннику і водному середовищі. В усіх випадках високомолекулярні продукти, які утворилися, випадають з розчину, так як вони не розчиняються ні в рідкому мономері, ні в інших розчинниках. Процес вимагає високої чистоти вихідного мономера.

Полімеризацією в розчиннику, як правило, одержують низькомолекулярні сполуки (оливи), а полімеризацією ТФХЕ в водному середовищі (суспензійний метод) одержують високомолекулярний полімер. На швидкість процесу великий вплив надає рН середовища, який повинен бути в межах 2,5-4,0.

Низькомолекулярний ПТФХЕ одержують полімеризацією ТФХЕ в автоклаві у хлороформі при 100-150°C в присутності пероксидів, зокрема пероксиду бензоїла, впродовж 15 хв. Хлороформ є не тільки середовищем, але й передавачем ланцюга, який понижує молекулярну масу полімеру.

Блочна полімеризація проходить при -16 °C при тиску власної пари мономера в реакторах діаметром 15 см, занурених в охолоджувальну суміш. Процес періодичний. Тривалість реакції полімеризації 45 діб. Конверсія мономера становить 70%. Після закінчення реакції відокремлюють непрореагований мономер, а флуоропласт-3 у вигляді поруватих блоків передають на подрібнення.

Суспензійний метод є екологічнішим і дає змогу отримувати полімер з більшою молекулярною масою. Ініціаторами у цьому разі слугують окисно-відновні системи або пероксиди, здатні розкладатись за низьких температур. Це, насамперед, пероксид діізопропілдикарбонату, персульфати, пероксид водню, трет-бутилпербензоат та ін.

Технологічний процес виробництва ПТФХЕ виконується за схемою, описаної для ПТФЕ. Полімеризація ТФХЕ протікає при 20-35°C та тиску 0,3-1,7 МПа, конверсію доводять до 80-90%. Після відділення ТФХЕ, який не прореагував, реактор розвантажують, ПТФХЕ, що являє собою білий порошок,



відділяють від водного середовища, промивають декілька разів гарячою водою та сушать.

Сополімери ТФХЕ з ВДФ, ГФП та етиленом одержують аналогічним методом.

## **1.2. Властивості та застосування політрифлуохлоретилену.**

Флуоропласт-3 – білий прозорий полімер з густиною 2,11-2,15 г/см<sup>3</sup> і ступенем кристалічності 40-90%. Ступінь кристалічності залежить від швидкості охолодження нагрітого полімера: при повільному охолодженні ступінь кристалічності досягає 85-90%; при швидкому охолодженні до кімнатної температури – 35-40%.

Флуоропласт-3 плавиться при 210 °С. Його переробляють як термопласт при 240-300 °С. Температура його склування 50 °С, але нижче від цієї температури кристалізація не відбувається протягом багатьох місяців.

Флуоропласт-3 поступається флуоропласту-4 за хімічною стійкістю, але вона все одно вища, ніж у інших полімерів. Він стійкий до дії звичайних органічних розчинників, але розчиняється в деяких флуор- і флуорхлорорганічних сполуках та при 150°С – в хлорованих та ароматичних вуглеводнях. Винятково стійкий до розведених і концентрованих мінеральних і органічних кислот, а також до лугів.

Фізико-механічні властивості полімеру сильно залежать від молекулярної маси та ступеня кристалічності і понижуються з підвищенням температури. Без навантаження флуоропласт-3 можна експлуатувати в інтервалі температур від -195 до +160 °С. Під навантаженням цей інтервал лежить в межах від -60 до +70 °С.

Завдяки порівняно добрій текучості ПТФХЕ перероблюється у виробі звичайними для термопластичних матеріалів методами. Застосування флуоропласту-3 таке саме, як і флуоропласту-4, але виробі з нього дешевші завдяки звичайним методам переробки.

Методами пресування, лиття під тиском та екструзією з ПТФХЕ виготовляють електро- та радіодеталі (панелі, цоколі радіоламп, муфти, перемикачі та ін.), мембрани та клапани для вимірювальних пристроїв, прокладки, втулки, сідла та тарілки клапанів для хімічного машинобудування, рукавні та плоскі плівки для печатних схем, транспортних стрічок,

термокопіювальних апаратів, ізоляції проводів і для упакування реактивів, медикаментів та ін.

Велике значення мають неводні суспензії ПТФХЕ, які використовуються для нанесення полімеру на металічні поверхні з метою захисту від корозії. Низькомолекулярні полімери ТФХЕ (масла та воски) служать в якості добавок до мінеральних та синтетичних масел, а також для змащення кранів, вентилів, насосів та компресорів.

Флуоропласти виробляють під назвами: Kel-F (США), Liaflon (Японія), Hostaflon (Німеччина), Voltaleft (Франція).

## 2. Одержання, властивості та застосування полівініліденфлуориду.

Полівініліденфлуорид отримують радикальною полімеризацією вініліденфлуориду:

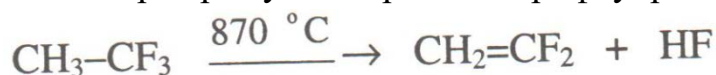


Вініліденфторид (ВДФ)  $\text{CH}_2=\text{CF}_2$  – безбарвний газ з  $t_{\text{кип.}} -85^\circ\text{C}$ , розчинний в спирті і хлороформі, нерозчинний у воді.

Одержують ВДФ відщепленням хлору від 1,2-дихлор-2,2-дифлуоретану цинком у присутності NaI у розчині ацетаміду або 2-етилгексанола при  $145^\circ\text{C}$ :



Крім того, цей мономер отримують піролізом трифлуоретану:



ВДФ стійкий навіть на сонячному світлі, є менш активним, ніж вініліденхлорид. Для його полімеризації необхідні, крім ініціаторів (пероксидів бензоїлу, ацетила, водню, персульфатів), висока температура і тиск.

Полімеризацію вініліденфлуориду виконують емульсійним методом у воді, а також у водних розчинах ацетону, трет-бутилового спирту й етерах. Процес ведуть при  $50-130^\circ\text{C}$  і тиску 2,1-8,4 МПа. Емульгаторами слугують солі пентахлорбензойної і тетрахлорфталевої кислот та амонієві солі хлор- або флуоркарбонічних кислот.

Флуоропласт-2 можна також отримувати і суспензійним методом при 0-50 °С і тиску 4 МПа. Ініціаторами реакції у такому разі слугують перестери кислот у кількості 0,01-3,0 %. Вихід полімеру за цим методом становить 98 %.

Емульсійний полімер володіє гіршими властивостями, ніж суспензійний, який відрізняється вузьким молекулярно-масовими розподілом, пониженою розгалуженістю та великою чистотою.

Випускають ПВДФ в вигляді білого порошку, дисперсії в органічних розчинниках (суміші диметилфталату з діізобутилкетонем) та в розчині диметилацетаміду.

Схема процесу одержання ПВДФ подібна до схеми одержання ПТФЕ.

Полівініліденфлуорид – кристалічний полімер білого кольору з густиною 1,76 г/см<sup>3</sup>,  $t_{\text{топ.}}$  171-180°C,  $t_{\text{скл.}}$  -40°C,  $\text{MM} \geq 100000$ , ступінь його кристалічності досягає 60 – 65%, розчиняється в диметилсульфоксиді, диметилацетаміді та диметилформаміді.

Флуоропласт-2 стійкий до механічних навантажень – володіє найвищими механічними властивостями порівняно з усіма іншими фторопластами, до УФ та іонізуючого випромінювання, а також до дії мінеральних кислот, за винятком 98%-вої сульфатної. Полімер не змінює своїх властивостей при температурі +150 °С протягом року.

Флуоропласт-2 належить до найтвердіших полімерних матеріалів. Його руйнівне напруження на розтягування за кімнатної температури становить 50-60 МПа, а середнє відносне видовження під час розривання – 200-300 %.

Найкращою переробкою в виробі є метод лиття під тиском та екструзія. Застосовується, як і флуоропласт-4. Завдяки міцності, зносостійкості, жорсткості та стійкості до ковзання, стабільності розмірів виробів в широкому інтервалі температур, хорошій радіаційній та хімічній стійкості, ПВДФ використовується для виготовлення труб та деталей трубопроводів для транспортування агресивних рідин, облицювальних матеріалів для ємностей, насосів, вентилів, клапанів, електроізоляції проводів та захисних покриттів для електротехнічного обладнання, лакотканин.

Полівініліденфлуорид виробляють під назвами: Кунаг (США), KF-polymer (Японія), Vidar (Німеччина), Solef (Бельгія), Foraflon (Франція).

### 3. Одержання, властивості та застосування полівінілфлуориду.

Полівінілфлуорид одержують з вінілфлуориду за реакцією полімеризації



ВФ – безколірний газ зі специфічним запахом,  $t_{\text{кип.}} -72,2^\circ\text{C}$ , замерзає при  $-160^\circ\text{C}$ , нерозчинний у воді.

Отримують його, подібно до вінілхлориду, з ацетилену та флуороводню (у співвідношенні 1 : 1,5) при  $150 - 160^\circ\text{C}$  у присутності каталізатора  $\text{HgCl}_2$ , нанесеного на активоване вугілля:



Самовільно вінілфлуорид не полімеризується, він менш активний, ніж вінілхлорид. ВФ полімеризується при нагріванні і тиску в присутності пероксидних ініціаторів (пероксиду лаурилу, діізопропілпероксикарбонату та ін.) або редокс-систем.

ПВДФ – прозорий термопластичний полімер, який випускається в вигляді тонкого чи волокнистого порошку білого кольору, а також як суспензія в суміші спирту з диметилформаліном.

Густина полівінілфлуориду  $1,39 \text{ г/см}^3$ ,  $t_{\text{топ.}} 198^\circ\text{C}$ ,  $t_{\text{крихкості}} -180^\circ\text{C}$ . ММ 28000-50000. При температурах нижче за  $110^\circ\text{C}$  флуоропласт-1 не розчиняється в органічних розчинниках. Полівінілфлуорид сильно поглинає в ІЧ-діапазоні (в інтервалі  $770-1430 \text{ см}^{-1}$ ).

В його полімерному ланцюзі помітна кількість аномальних з'єднань типу "голова-голова" та "хвіст-хвіст".

Цей полімер поєднує високу міцність з відмінною стійкістю до амфотерної дії і з хорошою адгезією до металів, дерева, пластмас, будівельних матеріалів. Діелектричні показники його гірші, ніж у інших фторопластів.

Найчастіше ПВФ застосовують в вигляді плівкового матеріалу в хімічній промисловості та в будівництві для антикорозійної та декоративної обробки зовнішніх та внутрішніх стін приміщення, промислових будівель, суспільних установ, вагонів, гелікоптерів. Плівку готують методом екструзії та з розчину полімеру в диметилсульфоксиді, бутиролактоні чи диметилфталаті.

Найцінніші вироби з флуоропласту-1 – гнучкі і прозорі у видимому та УФ-діапазоні плівки з коефіцієнтом заломлення 1,45. Такі плівки залишаються

прозорими і гнучкими за будь-яких погодних умов до 20 років! Їх застосовують як антикорозійні покриття алюмінієвих та оцинкованих сталевих листів.

#### 4. Властивості та застосування кополімерів флуоромономерів

Унікальні властивості флуоропласту-4 та флуоропласту-3 не завжди можна використати через складність перероблення цих полімерів на виробі. Тому упродовж 1950–1960-х років, насамперед у Сполучених Штатах Америки, вівся інтенсивний пошук нових флуорвмісних полімерів. Найкращі властивості виявились у кополімерів флуоролефінів.

Ряд властивостей ПТФЕ (розчинність, переробку у виробі) змінюють шляхом кополімеризації з іншими мономерами: етиленом, ГФП, ВДФ. Серед них на особливу увагу заслуговують кополімери тетрафлуоретилену з гексафлуорпропіленом:



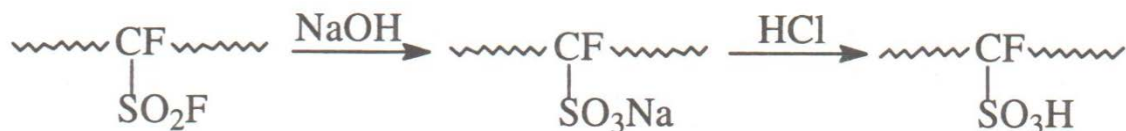
Такі кополімери містять до 20 % гексафлуорпропілену і мають ступінь кристалічності 40-50 %. За комплексом властивостей ці кополімери майже не відрізняються від флуоропласту-4, але топляться при 280-290 °С і мають достатньо невелику в'язкість розплаву, що дає змогу їх легко переробляти як звичайні термопласти.

Кополімери тетрафлуоретилену з вініліденфлуоридом та етиленом поступають йому за теплостійкістю та хімічною стійкістю, але перевищують його за механічною міцністю та стійкістю до йонізуючого випромінювання.

Особливу групу становлять кополімери тетрафлуоретилену з флуорангідридом перфлуорвінілсульфо кислоти:



Висока реакційна здатність бічних флуорсульфонових груп дає змогу перетворювати їх на сульфогрупи:



Оброблені в такий спосіб плівки кополімерів стають йонообмінними мембранами, які під торговою назвою "нафїон" (nafion) застосовують як перепони в промислових електролізерах, а також як електроліти в паливних елементах.

Кополімери ПТФЕ використовуються в тих же галузях техніки, що і ПТФЕ, але можуть бути перероблені у виробі методами пресування і лиття під тиском, можуть зварюватися та склеюватися. Асортимент антифрикційних, електроізоляційних та хімічностійких виробів при цьому значно розширюється.

Кополімери трифлуорохлоретилену ТФХЕ з етиленом, ГФП та ВДФ застосовуються для роботи в агресивних середовищах, тари для зберігання та транспортування кислот і різних рідин, антикорозійних, антиадгезійних та антифрикційних покриттів.

Кополімери вініліденфлуориду з гексафлуорпропіленом залежно від складу можуть бути повністю аморфними і використовуються як каучук для одержання термостійких гум з робочою температурою 300 °С:



Схеми технологічного процесу одержання кополімерів флуоролефінів з іншими ненасиченими сполуками аналогічні схемі одержання ПТФЕ.

## 5. Техніка безпеки при виробництві фторопластів.

Флуорвмісні мономери володіють токсичною дією, подразнюють слизову оболонку дихальних шляхів, очей та носоглотки, тому всі роботи з ними обов'язково проводять у витяжній шафі з ефективною вентиляцією. Токсичність ТФЕ і ТФХЕ пояснюється їх здатністю при змішуванні з повітрям окиснюватися з утворенням нестійких пероксидних сполук, які легко розкладаються утворенням отруйного флуорфосгену. Флуорфосген реагує з вологою повітря і легко гідролізує при попаданні на слизові оболонки дихальних шляхів та легенів, в результаті чого утворюється гідроген флуорид, який викликає сильні хімічні опіки.

**Технічні властивості флуорованих ненасичених вуглеводнів**

Властивості	ТФЕ	ТФХЕ	ГФП	ВФ	ВДФ
Молекулярна маса	100,2	116,47	150,03	46,02	64,04
Температура плавлення, °С	-142,5	-158,2	-156,2	-160,5	-117
Температура кипіння, °С	-76,3	-28,4	-29,4	-72,2	-84
Самозаймання, °С	-	600	510	-	480
ГКВ в суміші з повітрям, % (об.)	13,4–46,7	28,5–35,2	-	-	5,8 – 20,3
ГДК в повітрі виробничих приміщень, мг/м <sup>3</sup>	20	8	5,0	30	50

Полімери та кополімери флуорвмісних мономерів – хімічно інертні безпечні речовини, але під час їх термоокиснювального розкладу ( $t > 300^{\circ}\text{C}$ ) відбувається виділення токсичних речовин (карбон(II) оксиду, гідроген флуориду, фторфосгену, перфторізобутилену та ін.).

Полімеризація мономерів в присутності ініціаторів протікає інтенсивно з великим виділенням тепла. При недостатньому його відводі із зони реакції процес стає некерованим і може закінчитися вибухом.

Флуоровані ненасичені вуглеводні відносяться до категорії вибухонебезпечних речовин. При зберіганні всі флуорвмісні мономери легко приєднують кисень та утворюють вибухонебезпечні сполуки.

Для створення безпечних умов праці виробництва флуоропластів винесені в спеціальні приміщення, виконані в вибухобезпечному стилі. Завантаження компонентів в реактори, проведення реакцій полімеризації та кополімеризації, відгін мономерів, які не прореагували, виконуються дистанційно на пульті управління. Мірою захисту від можливих вибухів являється ретельне видалення кисню з апаратів, реакторів та трубопроводів, автоматичне регулювання температури реакції, можливість швидкого охолодження апаратів та зняття залишкового тиску за допомогою запобіжних пристроїв (мембран та ін.).

З ціллю захисту робочих від можливого отруєння токсичними речовинами виробничі помешкання обладнують ефективною витяжною вентиляцією, місцевими підсосами повітря, пристроями для аварійної вентиляції, а робочі забезпечуються індивідуальними засобами захисту (протигазами, масками,

респіраторами), кожен день одержують нейтралізуючу речовину (молоко, спеціальне харчування), мають скорочений робочий день та додатковий відпуск.

В усіх приміщеннях, де відбувається переробка фторопластів в виробі (спікання порошку, сплавлення частинок з суспензії, лиття під тиском, пресування, екструзія, зварювання, механічна обробка (на металоріжучих станках різанням, зняттям стружки – стрічки, свердлення та ін.) кратність обміну повітря повинна бути не менше 5.

Небезпечною являється концентрація продуктів розкладу фторопластів 0,001%. При використанні аерозолів гранично допустима концентрація ПТФЕ в повітрі виробничих приміщень складає 10 мг/м<sup>3</sup>.