

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Автономное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего профессионального образования  
«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт неразрушающего контроля

Дисциплина «Материалы электронной техники»

# *ПЛАСТМАССЫ*

Гормаков А.Н., доц. каф. ТПС  
ИНК НИ ТПУ, 2017 г.

**ПЛАСТМАССЫ** (пластические массы, пластики). Большой класс полимерных органических легко формуемых материалов, из которых можно изготавливать легкие, жесткие, прочные, коррозионностойкие изделия.

Эти вещества состоят в основном из углерода (С), водорода (Н), кислорода (О) и азота (N).

Все полимеры имеют высокую молекулярную массу, от 10 000 до 500 000 и более; для сравнения, кислород ( $O_2$ ) имеет молекулярную массу 32. Таким образом, одна молекула полимера содержит очень большое число атомов.

# Достоинства пластмасс:

- низкая плотность ( $\rho = 0.9 \dots 3 \text{ т/ м}^3$ ),
- прочность силовых пластиков сопоставима с прочностью стали,
- пластмассы имеют хорошие технологические свойства,
- хорошие электроизоляционные свойства,
- высокая химическая стойкость,
- фрикционные и антифрикционные свойства.

## **Недостатки пластмасс:**

- невысокая теплостойкость,
- низкий модуль упругости,
- склонность к старению.

По происхождению полимеры разделяют на *природные и синтетические*.

Типичными представителями природных полимеров являются целлюлоза, крахмал, натуральный каучук, слюда, асбест. *Природные полимеры* образуются в процессе биосинтеза в клетках живых организмов. Их выделяют с помощью экстракции фракционного осаждения из растительного и животного сырья.

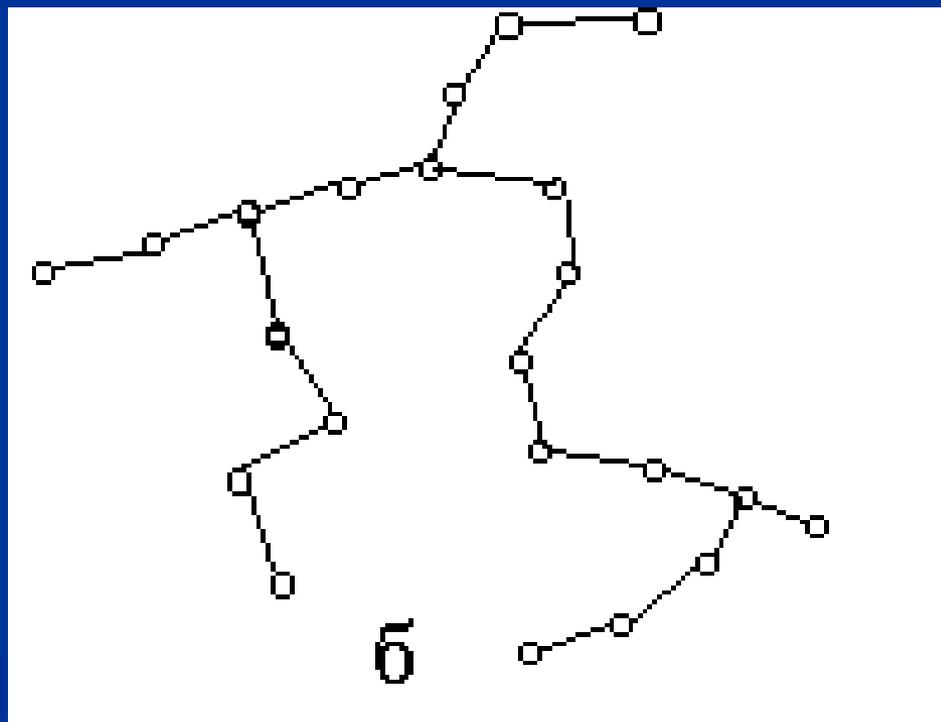
## *Синтетические полимеры*

представляют собой продукт синтеза (целенаправленного получения сложных веществ из более простых), основанного на знании молекулярного строения и реактивной способности.

Номенклатура синтетических полимеров постоянно расширяется.

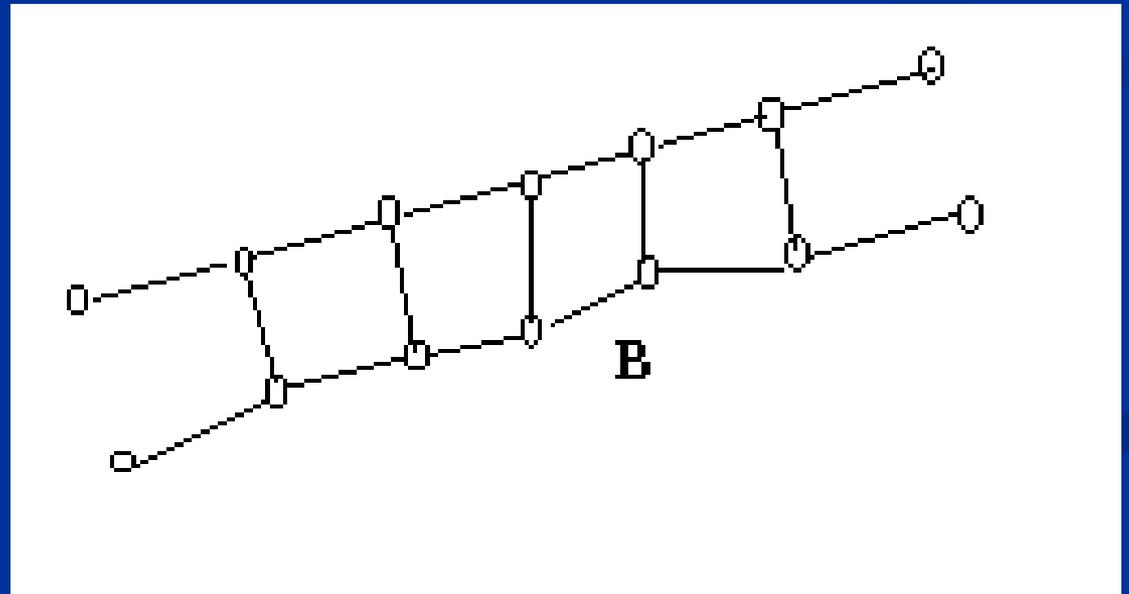


*Разветвленные макромолекулы*  
(рис. б) определяют меньшую  
прочность и повышенную  
легкоплавкость, а также растворимость  
полимера.



Это происходит потому, что разветвленная форма макромолекул препятствует их сближению, что и определяет пониженное межмолекулярное взаимодействие, а, следовательно, и пониженную прочность.

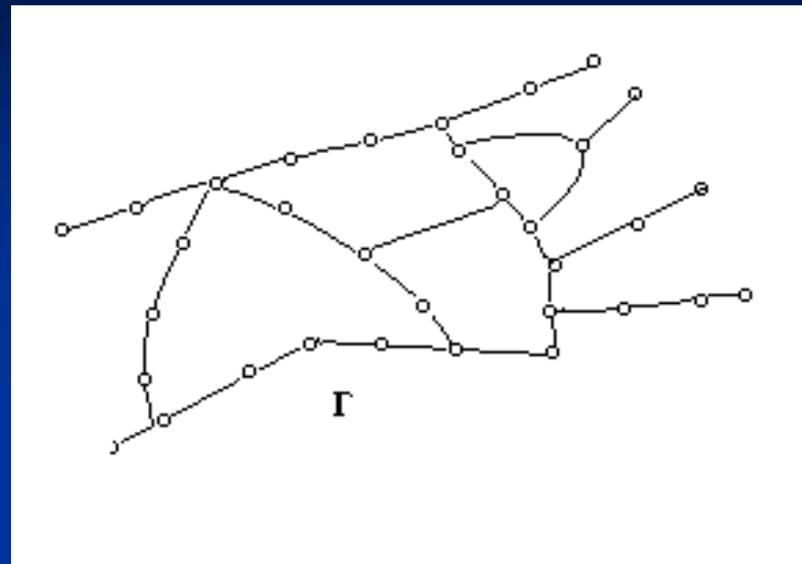
*Макромолекула ленточная или лестничная* состоит из двух цепей, соединенных химическими связями (рис. в). Лестничные полимеры обладают повышенной теплопроводностью, большей жесткостью, они нерастворимы в стандартных органических растворителях.

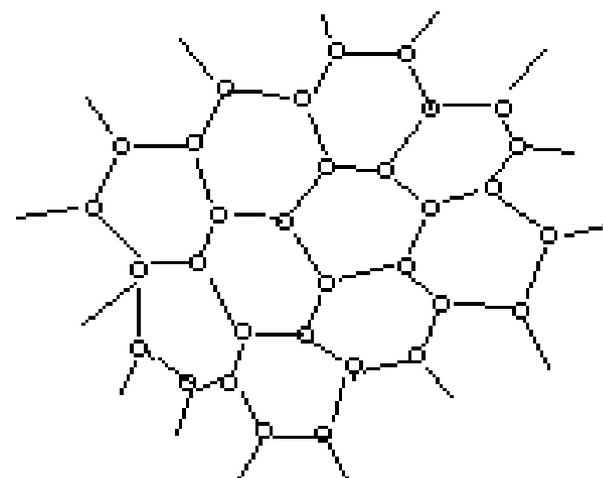
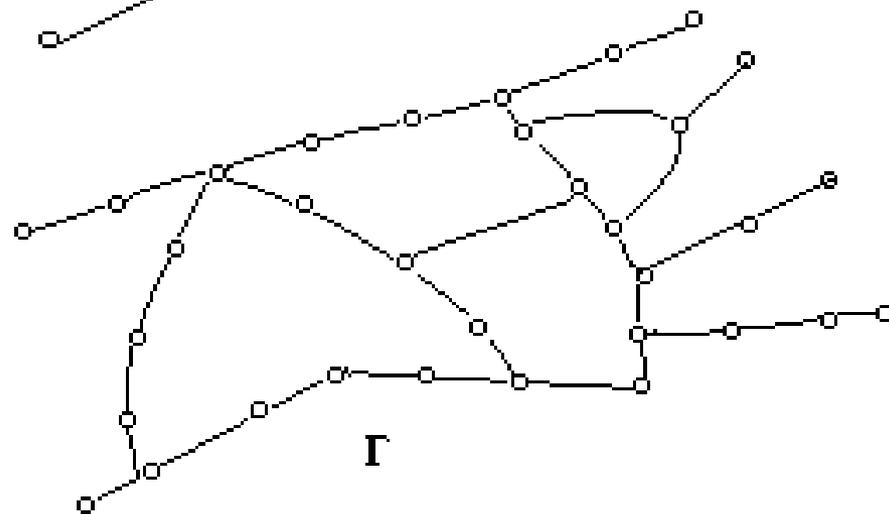
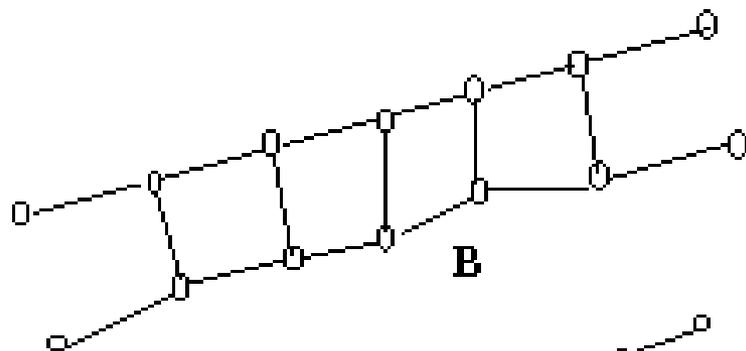
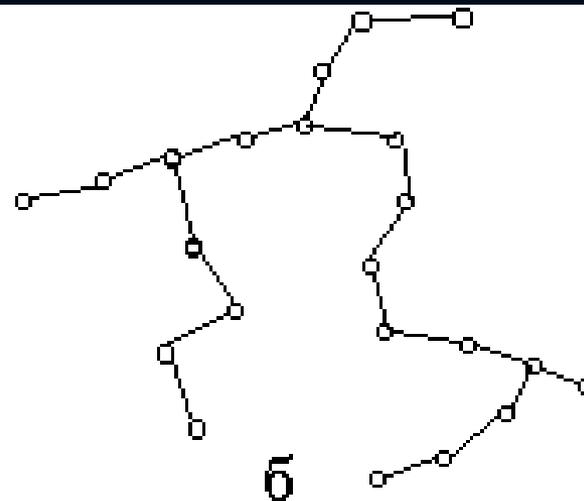
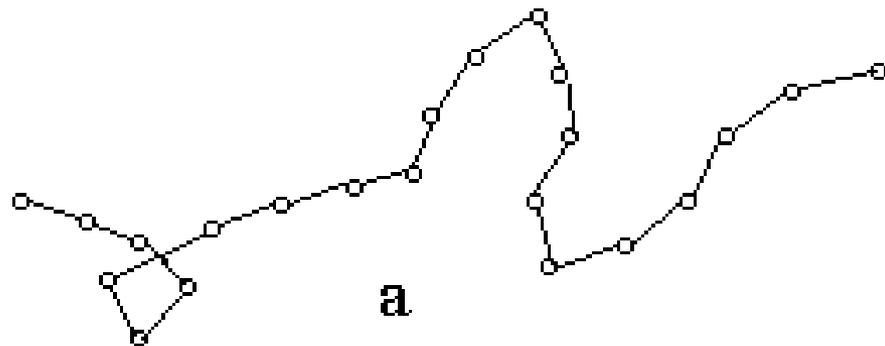


## *Пространственные или сетчатые полимеры*

получают при соединении (сшивке) макромолекул между собой в поперечном направлении (рис. г).

Пространственные полимеры лежат в основе конструктивных неметаллических материалов. К полимерам этого типа относятся также паркетные или пластинчатые структуры (рис. г).





# Формы макромолекул

Некоторые органические пластические материалы встречаются в природе, например асфальт, битум, шеллак, смола хвойных деревьев и копал (твердая ископаемая природная смола). Обычно такие природные органические формуемые вещества называют смолами. В ряде случаев в качестве сырья применяются природные полимеры – целлюлоза, каучук или канифоль;

Хотя модифицированные природные полимеры и находят промышленное применение, большинство используемых пластмасс являются синтетическими. Органическое вещество с небольшой молекулярной массой (мономер) сначала превращают в полимер, который затем прядут, отливают, прессуют или формуют в готовое изделие.

Сырьем обычно являются простые,  
легко доступные побочные продукты  
угольной и нефтяной  
промышленности или производства  
удобрений

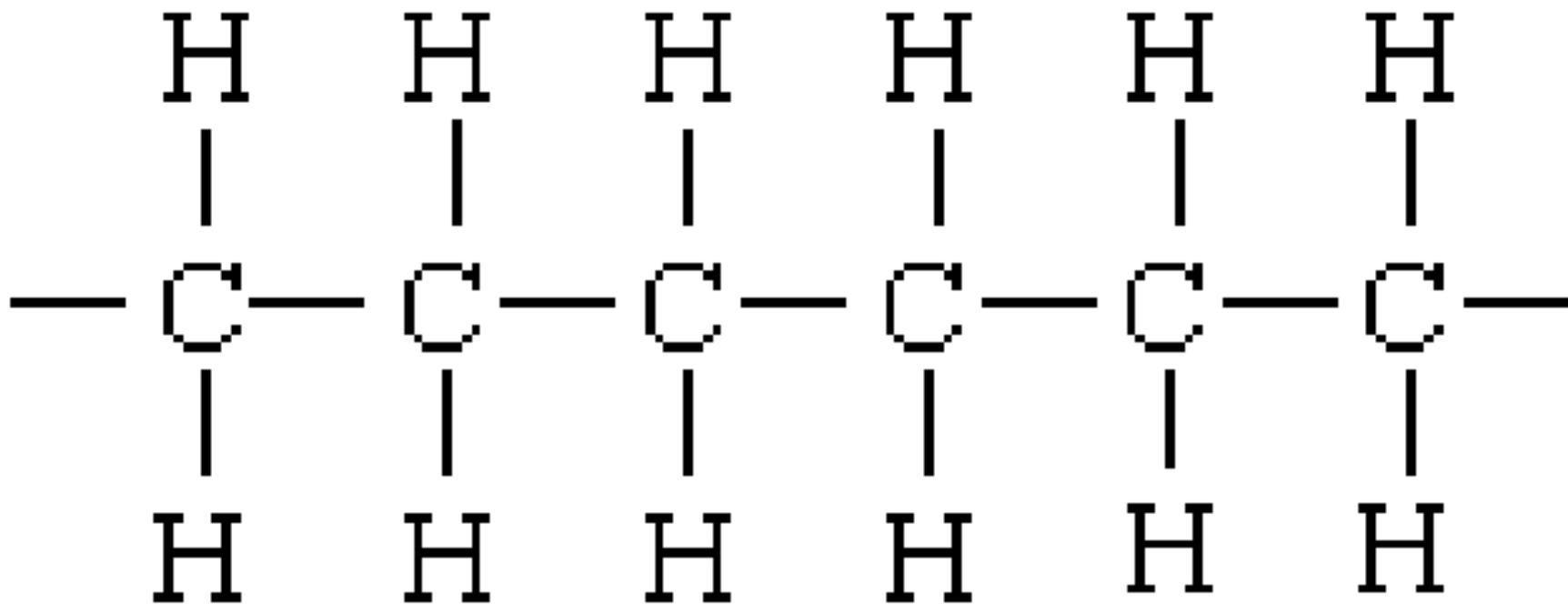
**Полимеризация.** Слово «полимер» - греческого происхождения.

Буквально, полимер - это молекула, состоящая из многих (*поли-*) частей (*мерос*), каждая из которых представляет собой мономерное, т.е. состоящее из одной (*монос*) части, звено полимерной цепи. Реакция получения полимера из мономера называется полимеризацией.

Полимерные молекулы обычно представляют собой очень длинные цепи, линейные или разветвленные. Образование этих молекул возможно благодаря тому, что атомы углерода легко и прочно соединяются друг с другом и со многими другими атомами.

Известно много типов полимеризации, однако наиболее распространены два из них: присоединительная (аддиционная) полимеризация и поликонденсация.

*В присоединительной полимеризации*  
мономеры присоединяются друг к  
другу непосредственно, без изменения  
состава. Например, молекулы этилена  
 $\text{H}_2\text{C}=\text{CH}_2$ , состоящие из 6 атомов  
каждая, соединяются, образуя  
полиэтилен. Фрагмент  
полиэтиленовой цепи выглядит  
следующим образом:



Вся цепь содержит более 6000 атомов.

Углеродные атомы цепи соединены простыми (одинарными), а не двойными связями (рисунок).

Присоединительная полимеризация редко идет самопроизвольно. Она может быть инициирована определенными катализаторами, обычно свободнорадикальными, катионными или анионными. Инициированные ими реакции - экзотермические (идущие с выделением тепла). Промышленные полимеризационные процессы, проводимые в интервале температур от  $80^{\circ}$  до  $120^{\circ}$  С, дают большие выходы полимеров за короткое время

*При поликонденсации* два или несколько различных мономеров реагируют, образуя цепь. При этом от их молекул отщепляются небольшие фрагменты, которые, соединяясь друг с другом, обычно образуют воду, т.е. в конечном полимерном продукте присутствуют не все атомы мономеров.

*Термопласты.* Все линейные или слегка разветвленные полимеры термопластичны. Это означает, что они могут многократно размягчаться при нагревании и затвердевать при охлаждении. При этом, в сущности, физическом процессе, похожем на повторяющиеся расплавление и кристаллизацию металла, химических изменений не происходит.

Важным отличительным признаком термопластов является их **кристалличность**.

Термопласты могут быть, как аморфными, так и частично-кристаллическими материалами.

*Частично-кристаллическая структура* создается у пластмасс, если они обладают упорядоченной и линейной структурой цепочек и могут уложиться в наиболее плотной упаковке

Это например полиэтилен высокой плотности (низкого давления, если рассматривать с т.з. синтеза), полипропилен (ПП), фторопласт, некоторые виды полиамидов (ПА), полиформальдегид

*Аморфная* структура характерна для всех сетчатых полимеров, а также для ряда широко распространенных термопластов. Неупорядоченно построенные цепочечные молекулы не могут воспринимать наиболее плотную упаковку, так что такие полимеры также как и стекло, затвердевают в аморфном состоянии.

Поэтому аморфные термопласты в неокрашенном состоянии, в принципе, прозрачны, как стекло.

К ним относятся:

- полиметилметакрилат (ПММА),
- полистирол (ПС),
- поливинилхлорид (ПВХ),
- сополимеры стирола (ABS).

*Реактопласты* (терморезактивные, или термоотверждающиеся, пластмассы).

Если процесс полимеризации протекает более чем в двух направлениях, то возникают молекулы, образующие не линейные цепи, а трехмерную сетку. Эти полимеры можно размягчить нагреванием, но при охлаждении они превращаются в твердые неплавящиеся тела, которые невозможно снова размягчить без химического разложения.

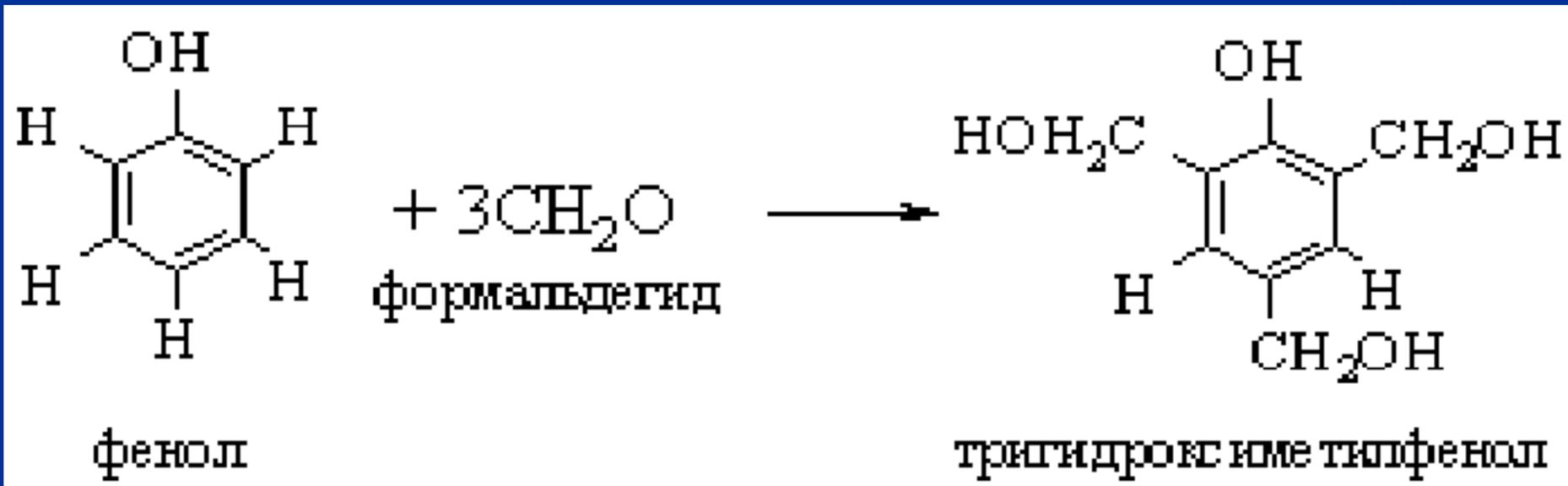
Материалы такого рода называют реактопластами. Необратимое затвердевание вызывается химической реакцией сшивки цепей.

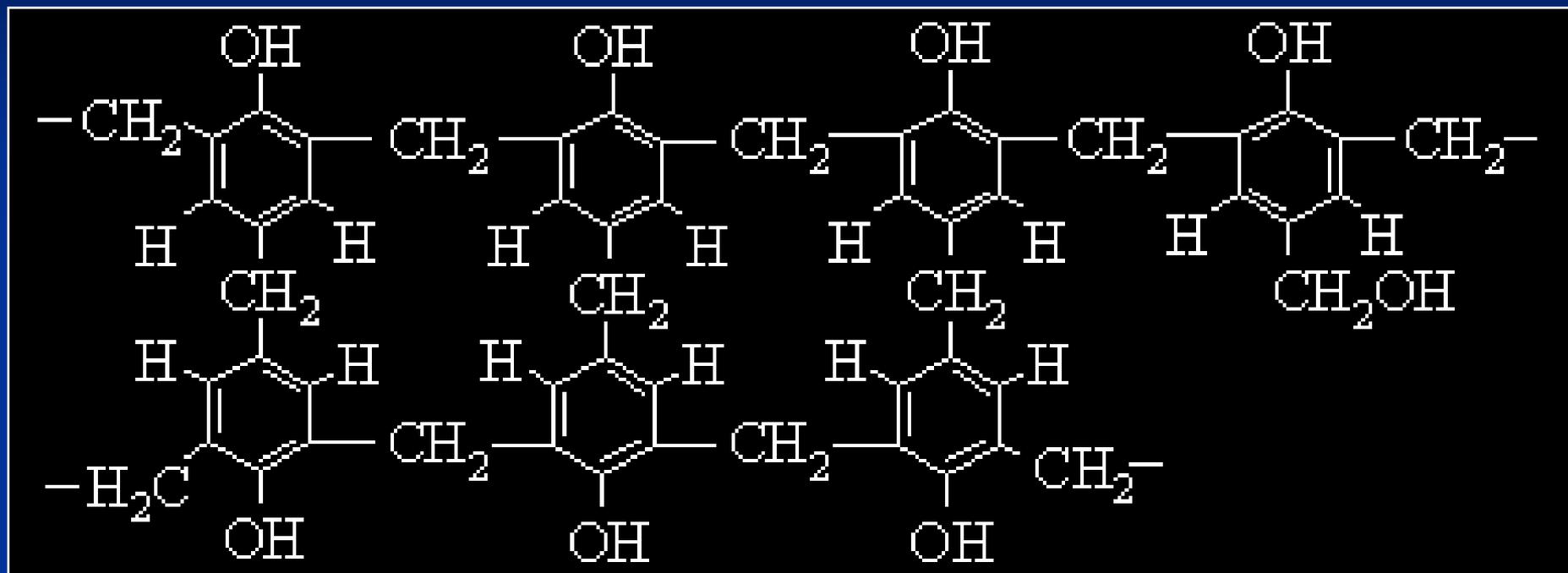
**Терморреактивные полимеры (реактопласты)** – состоят из молекул, соединенных поперечными ковалентными, т.е. химическими связями. Такая сетчатая химическая структура необратима. Нагревание сетчатых полимеров приводит не к расплавлению, а к разрушению пространственной сетки, сопровождающемуся деструкцией

Это означает, что реактопласты допускают лишь однократную переработку в изделия, которые формируются в результате химической реакции отверждения. Технологические и иные отходы производства практически не рециркулируются.

Вместе с тем сетчатая молекулярная структура придает полимерам этой группы ряд особых свойств, не наблюдаемых у термопластов: повышенные значения жесткости, модуля упругости, теплостойкости, высокая деформируемость, стойкость к истиранию.

Хорошо известный реактопласт – феноло-формальдегидную смолу – получают поликонденсацией фенола с формальдегидом. Первая стадия выглядит следующим образом:





Из вышесказанного следует простой и логичный вывод: все линейные полимеры термопластичны, а все сшитые сетчатые полимеры реактопластичны (терморреактивны).

## *Полиамиды*

Их получение обсуждалось выше при описании поликонденсации.

*Поликарбонаты* - еще одна группа линейных полиэфиров, получаемых в промышленных масштабах. Их производят реакцией фосгена  $\text{COCl}_2$  с бифункциональными фенолами.

Это белый, в основном аморфный, очень прочный и жесткий материал с хорошей термостойкостью до  $150^{\circ}\text{C}$ . Путем литьевого формования из него делают пластины, стержни, шестерни и другие предметы сложной конфигурации, которые успешно заменяют литые металлические детали.

# Технические свойства пластмасс

Механические и физические свойства пластмасс можно изменять в широких пределах смешиванием полимеров, добавлением пластификаторов и наполнителей, подбором условий формования и конструкции формуемых изделий.

*Наполнители.* Наилучшие результаты получены рациональным подбором наполнителей. Терморезистивные смолы по своей природе хрупки и, за исключением фенольных, редко используются без волокнистых наполнителей. Чаще всего применяются древесные опилки, хлопковые очесы, целлюлозные волокна и ткани, асбест и стекловолокно. Последнее позволяет получать слоистые структуры со значительно большей прочностью, чем целлюлозные или органические волокна.

Пенопласты и сотовые структуры,  
сделанные из бумаги и тканей,  
пропитанных пластиками,  
открывают возможность  
получения легких материалов  
высокой прочностью.

*Прозрачность.* Аморфные полимеры - светлые и прозрачные. Степень прозрачности оценивается по пропусканию света. У полиметилметакрилатов она наибольшая (свыше 90% светопропускания); полистирол и органические простые и сложные эфиры целлюлозы также обладают хорошей светопрозрачностью.

## *Электрическое сопротивление*

некоторых пластиков велико, и они находят разнообразные применения в электронном оборудовании.

Полистирол, полиэтилен, полиметилметакрилат, полипропилен и тефлон (политетрафторэтилен) обладают прекрасными диэлектрическими и изолирующими свойствами.

Несмотря на несколько бóльшую термостойкость, термоотверждающиеся пластики (реактопласты) не выдерживают продолжительного нагрева до  $200^{\circ}\text{C}$ ; этот предел можно повысить примерно до  $250^{\circ}\text{C}$  добавлением минеральных наполнителей.

*Хладостойкость* существенна для гибких элементов, используемых на открытом воздухе или в холодильниках.

Сополимеризация и использование пластификаторов позволяет пластмассам удовлетворительно выдерживать низкие температуры.

# По виду наполнителя пластмассы

делятся на:

- порошковые (тальк, графит, древесная мука);
- волокнистые (очёсы хлопка, льна, асбест, стеклянные волокна);
- слоистые (листы бумаги в гетинаксе, хлопчатобумажные листы, асбестовые, стеклянные ткани в текстолите, стеклотекстолите);
- газонаполненные.

# Диэлектрики

Диэлектрики различают на газообразные, жидкие и твердые, которые могут быть природными и синтетическими, а также органическими и неорганическими. По размерам молекул делятся на низкомолекулярные и высокомолекулярные, по форме молекул и поведению при температуре – на термопластические и терморезистивные, по электрическим свойствам классифицируются на полярные и неполярные, из-за широкой запрещенной зоны нет электронной электропроводности.

Согласно ГОСТ-19880-74

диэлектрик – вещество, основным свойством которого является способность поляризоваться в электрическом поле.

Диэлектрические материалы по ГОСТ 21515-76– это материалы, предназначенные для использования их диэлектрических свойств.

Процесс поляризации заключается в изменении расположения в пространстве частиц диэлектрика, имеющих электрические заряды, при приложении к диэлектрику электрического поля. После снятия поля частицы возвращаются в исходное состояние.

При приложении электрического поля диэлектрик приобретает наведенный электрический момент, и в конденсаторе, образованном диэлектриком и электродами, образуется электрический заряд

$$Q = C U ,$$

где  $Q$  - электрический заряд, Кл ;

$C$  - электрическая емкость конденсатора, Ф;

$U$  - приложенное напряжение, В.

Энергия электрического поля, Дж,  
запасенная на участке изоляции,  
определяется как

$$W = Q U / 2$$

При приложении к диэлектрику переменного синусоидального напряжения через участок изоляции, емкостью  $C$  (Ф) проходит емкостной ток

$$I = U \omega C = 2\pi f C,$$

где  $U$  - действующее значение приложенного напряжения, В;

$f$  - частота, Гц;

$\omega$  - угловая частота, рад/с.

При параллельном включении  $C_p$  будет больше, чем емкость каждого отдельного конденсатора и равна их сумме.

При последовательном их соединении результирующая емкость  $C_s$  определится как

$$1/ C_s = 1/ C_{s1} + 1/ C_{s2} + 1/ C_{si} .$$

При последовательном соединении емкость  $C_s$  меньше, чем емкость каждого отдельного конденсатора,

# Поляризация диэлектриков

Поляризация – это ограниченное смещение связанных зарядов или ориентация дипольных молекул в электрическом поле. Под влиянием силовых линий электрического поля заряды диэлектрика смещаются по направлению действующих сил в зависимости величины напряженности. При отсутствии электрического поля заряды возвращаются в прежнее состояние.

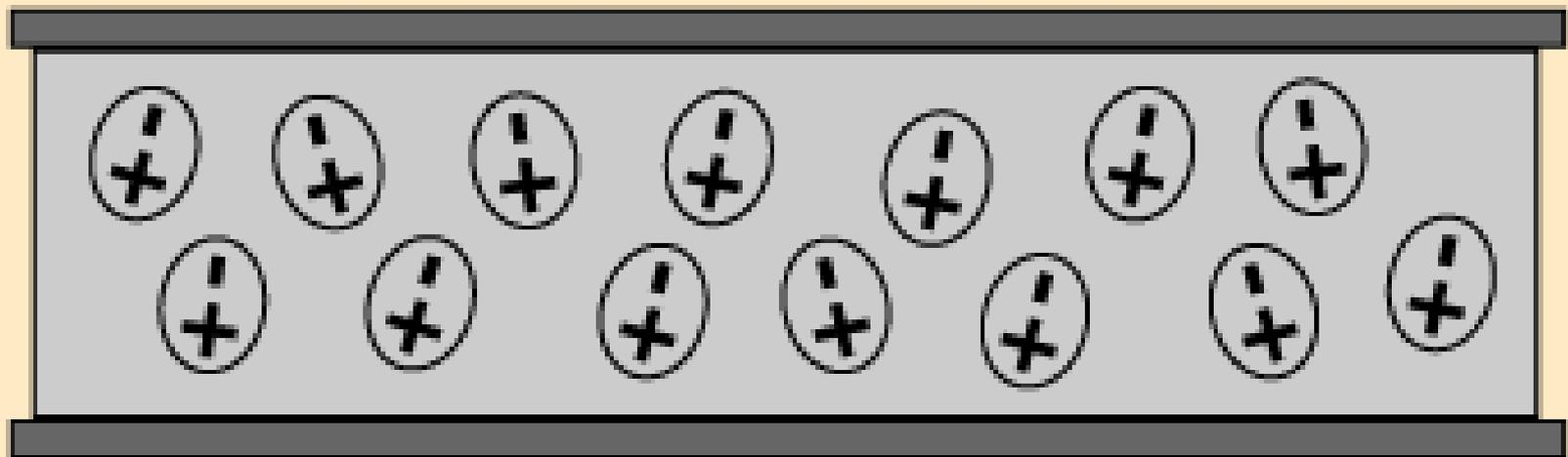
Различают два вида поляризации: поляризация мгновенная, вполне упругая, без выделения энергии рассеяния, т.е. без выделения тепла, за время  $10^{-15}$  –  $10^{-13}$  с; поляризация не совершается мгновенно, а нарастает или убывает замедленно и сопровождается рассеянием энергии в диэлектрике, т.е. его нагревает - это релаксационная поляризация за время от  $10^{-8}$  до  $10^2$  с.

Unpolarized



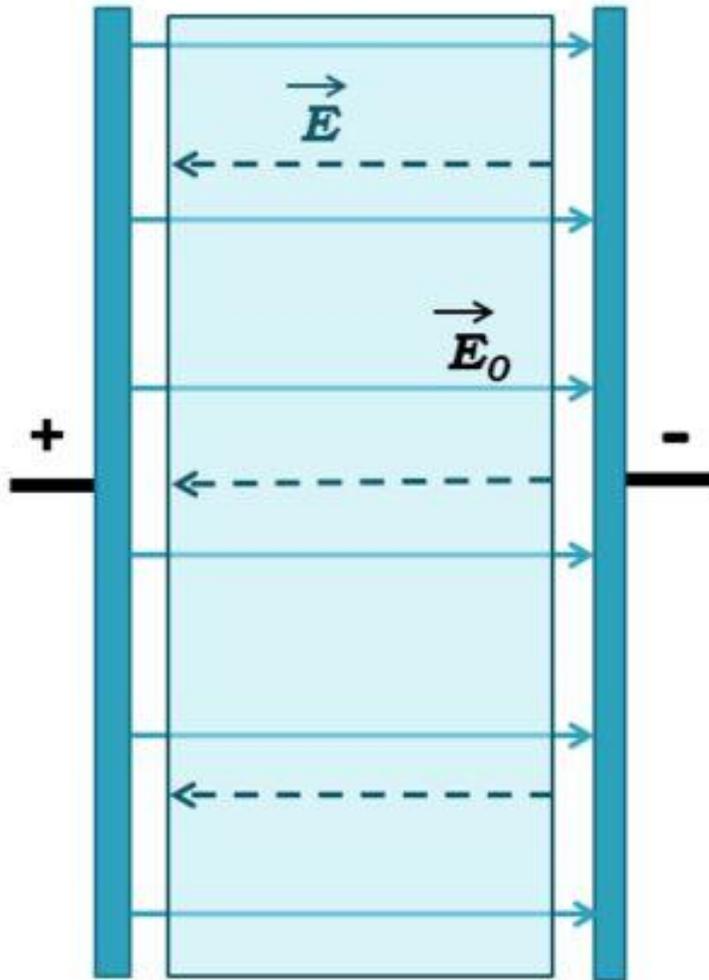
Polarized by an applied electric field.

+ + + + + + + + + + +



- - - - - - - - - - -

# Диэлектрическая проницаемость



Связанный заряд создает в диэлектрике электрическое поле напряженностью  $\vec{E}$ , которая направлена **против напряженности внешнего поля** зарядов на пластинах



**Поле внутри диэлектрика ослабляется**

Диэлектрическая проницаемость – физическая величина, показывающая, во сколько раз модуль напряженности электрического поля  $\vec{E}$  внутри однородного диэлектрика меньше модуля напряженности поля  $\vec{E}_0$  в вакууме

$$\epsilon = E_0 / E$$

# Диэлектрическая проницаемость

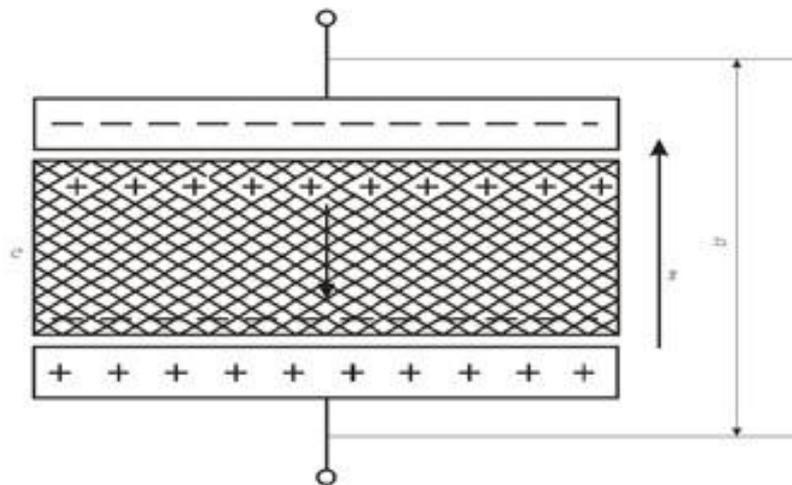
- Физическая величина, равная отношению модуля напряженности внешнего электрического поля в вакууме к модулю напряженности полного поля в однородном диэлектрике, называется **диэлектрической проницаемостью** вещества:

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}$$

## Диэлектрическая проницаемость

**Количественной оценкой способности** диэлектриков поляризоваться под действием внешнего электрического поля является относительная диэлектрическая проницаемость ( $\epsilon$ ).

**Величина  $\epsilon$**  представляет собой отношение заряда  $Q$ , полученного при некотором напряжении на конденсаторе с данным диэлектриком к заряду  $Q_0$ , который можно получить в конденсаторе тех же геометрических размеров и при том же напряжении, если бы между электродами, находился вакуум.



# Диэлектрическая проницаемость веществ

| Вещество                             | $\epsilon$ | Вещество  | $\epsilon$ |
|--------------------------------------|------------|---|------------|
| <i>Газы и водяной пар</i>            |            | <i>Кислород жидкий (при <math>t = -192,4</math> °C)</i> |            |
| Азот                                 | 1,0058     | Масло трансформаторное                                  | 1,5        |
| Водород                              | 1,00026    | Спирт   | 2,2        |
| Воздух                               | 1,00057    | Эфир  | 26         |
| Вакуум                               | 1,00000    | <i>Твердые тела</i>                                     |            |
| Водяной пар (при $t = 100$ °C)       | 1,006      | Алмаз   | 4,3        |
| Гелий                                | 1,00007    | Бумага парафинированная                                 | 5,7        |
| Кислород                             | 1,00055    | Дерево сухое  | 2,2        |
| Углекислый газ                       | 1,00099    | Лёд (при $t = -10$ °C)                                  | 2,2–3,7    |
| <i>Жидкости</i>                      |            | Парафин   | 70         |
| Азот жидкий (при $t = -198,4$ °C)    | 1,4        | Резина  | 1,9–2,2    |
| Бензин                               | 1,9–2,0    | Слюда   | 3,0–6,0    |
| Вода                                 | 81         | Стекло  | 5,7–7,2    |
| Водород жидкий (при $t = -252,9$ °C) | 1,2        | Титан бария   | 6,0–10,0   |
| Гелий жидкий (при $t = -269$ °C)     | 1,05       | Фарфор  | 1200       |
| Глицерин                             | 43         | Янтарь  | 4,4–6,8    |
|                                      |            |   | 2,8        |

# Пробой диэлектрика

Любой диэлектрик, находясь в электрическом поле, теряет свойство электроизоляционного материала, если напряженность поля превысит некоторое критическое значение. Это явление носит название пробоя диэлектрика или нарушения его электрической прочности.

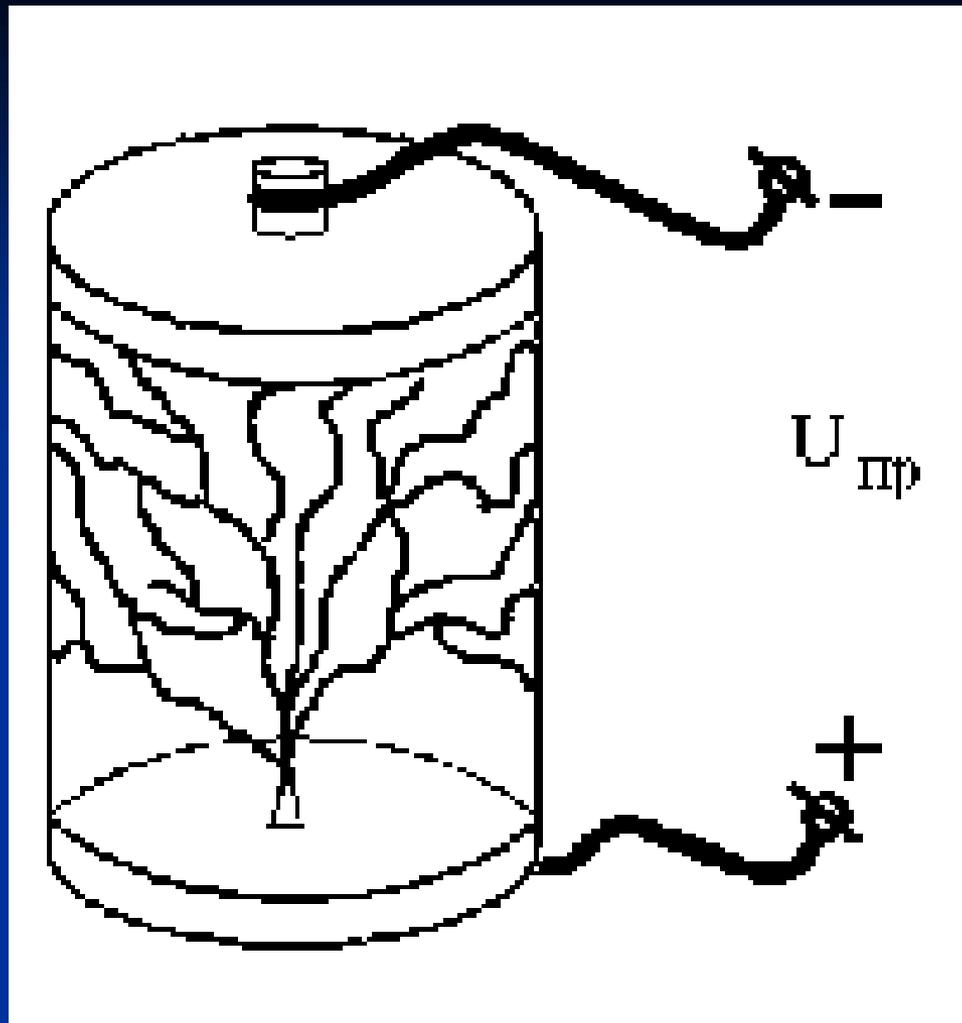
Значение напряжения при котором проходит пробой диэлектрика, называется пробивным напряжением, а соответствующее значение напряженности поля – пробивной напряженностью  $E_{пр}$  и измеряется чаще всего в киловольтах.

Пробивная напряженность определяется величиной пробивного напряжения, отнесенного к толщине диэлектрика в месте пробоя

$E_{пр} = U_{пр} / h$ , кВ/ мм, где  $h$  толщина диэлектрика в мм.

Пробой газов обуславливается явлением ударной и фотоионизации. В однородном поле пробой газа наступает внезапно, в неоднородном поле пробой предшествует явление короны.

Пробой твердых тел может вызываться как электрическими, так и тепловыми процессами, возникающими под действием поля.



Каналы проводимости при пробое сплошного цилиндра из оргстекла

Если сплошной цилиндр из оргстекла поместить между двумя соответствующим образом выполненными электродами (рис. 2.14) высоковольтной установки, то при пробивном напряжении происходит образование каналов проводимости (пробой) в цилиндре, напоминающих по структуре дерево. Для полиметилметакрилата (оргстекло) пробивная напряженность

$$E_{пр} = 15 - 25 \text{ кВ/мм}$$