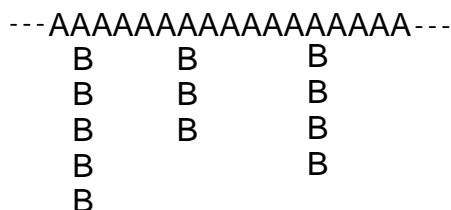


ЗАДАЧА К ПРАКТИКУМУ ДЛЯ СТУДЕНТОВ 4 КУРСА

«СИНТЕЗ СОПОЛИМЕРА N-ВИНИЛКАПРОЛАКТАМА И АКРИЛОВОЙ КИСЛОТЫ»

ТЕОРЕТИЧЕСКАЯ ЧАСТЬ

СОПОЛИМЕРЫ - высокомолекулярные соединения, макромолекулы которых содержат мономерные звенья разных типов. В зависимости от расположения этих звеньев различают *нерегулярные (статистические)* и *регулярные* сополимеры, а также *привитые сополимеры* и *блоксополимеры*. В статистических сополимерах мономерные звенья (А и В) расположены беспорядочно (например, АВАААВАВВ...), в регулярных сополимерах распределены с определенной периодичностью. Среди последних наиболее распространены чередующиеся сополимеры, построенные по принципу: АВАВАВ... В привитых сополимерах и блоксополимерах может быть большое число блоков одного типа. Сами блоки могут состоять из одного или нескольких видов мономерных звеньев. Например,



где А – основная цепь, ”ствол”,

В – привитые цепи, ”ветви”.

Свойства различных видов сополимеров зависят от соотношения, природы и характера чередования мономерных звеньев в макромолекуле, от длины, частоты разветвлений и т.д.

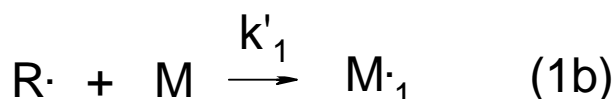
Для синтеза сополимеров применяют различные способы сополимеризации и сополиконденсации. Статистические, чередующиеся и привитые сополимеры получают преимущественно методами радикальной полимеризации, блоксополимеры - методами анионной полимеризации и поликонденсации.

РАДИКАЛЬНАЯ ПОЛИМЕРИЗАЦИЯ - полимеризация, в которой активные центры роста представляют собой свободные радикалы. Радикальная полимеризация возможна для большинства виниловых, диеновых мономеров, а также для некоторых напряженных циклических соединений.

Схема радикальной полимеризации включает четыре элементарные стадии: инициирование, рост, передачу и обрыв цепи.

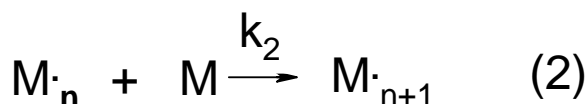
На стадии инициирования образуются первичные радикалы мономера в результате непосредственного энергетического воздействия (тепло, УФ либо ионизирующее

излучение) или чаще при взаимодействии мономера с радикалами, возникающими при гомолитическом распаде специально вводимых веществ - инициаторов (например, пероксидов, гидропероксидов, азосоединений). Стадия иницирования включает по меньшей мере два последовательных элементарных акта - генерирование радикалов R^\bullet (реакция 1a) и их взаимодействие с мономером (реакция 1б):



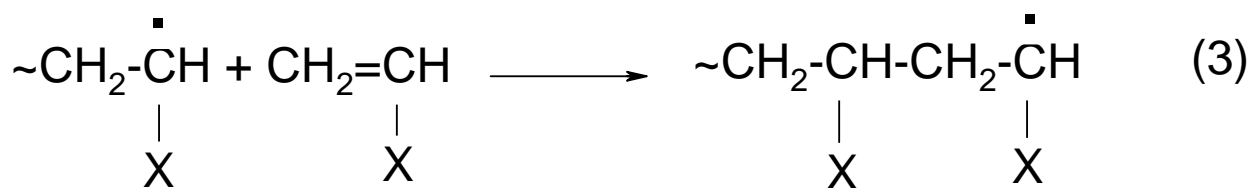
(I-инициатор, M-мономер, M_1^\bullet -первичный мономерный радикал, k_1 и k'_1 - константы скоростей соответствующих реакций). Помимо реакций (1б), радикалы R^\bullet могут участвовать в побочных реакциях, что учитывают с помощью коэффициента эффективности иницирования (f), который характеризует отношение числа радикалов, участвующих в реакции (1б), к общему числу радикалов, образовавшихся по реакции (1a).

Основная стадия полимеризации - реакция роста цепи, при многократном повторении которой образуется макромолекулярная цепь, - описывается уравнением:



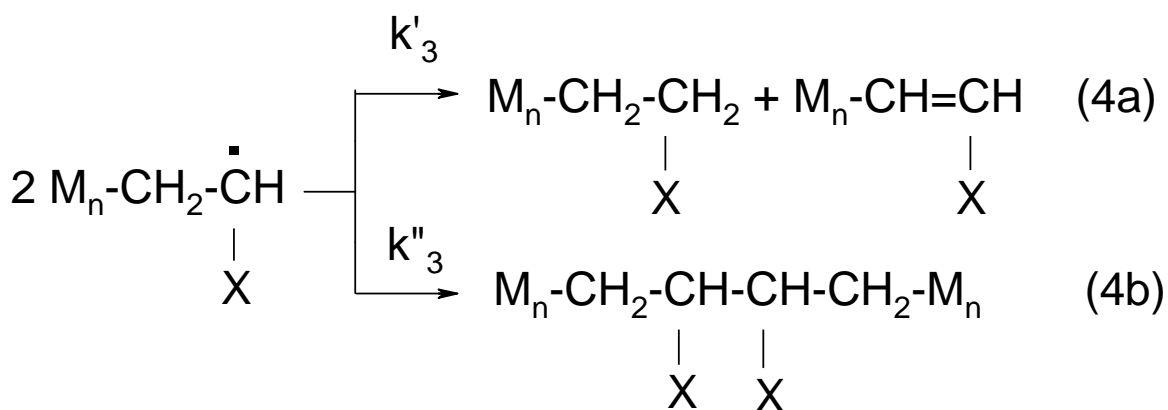
(M_n^\bullet -макрорадикал, содержащий n мономерных звеньев).

Присоединение мономеров при радикальной полимеризации происходит преимущественно по типу "голова к хвосту":



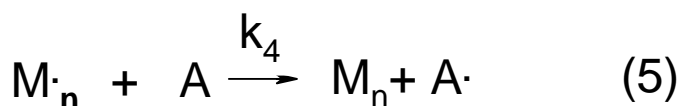
Доля звеньев, присоединенных по типу "голова к голове" и "хвост к хвосту" обычно не превышает нескольких процентов и уменьшается при полимеризации мономеров, содержащих объемные заместители X.

Ограничение растущих цепей при радикальной полимеризации возможно путем обрыва и (или) передачи цепи. Обрыв цепи протекает обычно в результате диспропорционирования двух макрорадикалов (реакция 4a) или их рекомбинации (4б):



(k'_3 и k''_3 -константы скоростей соответствующих реакций).

Передача цепи - реакция, приводящая к переносу активного центра от растущего макрорадикала на любую другую молекулу (растворитель, мономер, инициатор, полимер), выступающую в роли агента передачи (A), с образованием "мертвой" макромолекулы (M_n) и нового активного центра (A^\cdot):



(k_4 - константа скорости передачи цепи). Обычно реакция передачи цепи приводит к продолжению кинетической цепи, поскольку новый радикал A^\cdot способен инициировать радикальную полимеризацию со скоростью, близкой к скорости реакции роста. В противном случае имеет место вырожденная передача цепи (т.е. рост цепи происходит с меньшей скоростью на A^\cdot , чем на макрорадикале) либо ингибирование радикальной полимеризации.

Радикальная полимеризация может быть осуществлена в массе, эмульсии, суспензии, растворе.

Анализ синтезированных сополимеров проводят различными физико-химическими методами, например, ИК и ЯМР спектроскопии.

Инфракрасные спектры поглощения (ИК спектры).

ИК спектры поглощения образуются при селективном поглощении излучения при распространении в веществе ИК излучения, когда его частота совпадает с некоторыми собственными частотами колебаний атомов в молекулах. В результате селективного поглощения в непрерывном спектре ИК излучения, прошедшего через вещество, образуются «провалы» - полосы поглощения. Область электромагнитного спектра от 4000см^{-1} до 50см^{-1} связана с колебаниями атомов в молекуле, поэтому она называется областью колебательных спектров.

Колебательная спектроскопия разделяется на инфракрасную (ИК) и спектроскопию комбинационного рассеяния (КР). Вследствие простоты получения

спектров и технического совершенства приборов наибольшее распространение получил метод ИК спектроскопии.

Каждое вещество имеет определенный набор собственных колебательных и вращательных частот, поэтому ИК спектр поглощения является индивидуальной характеристикой вещества.

В каждом нормальном колебании участвуют все без исключения связи и атомы, входящие в состав молекулы. Однако в ряде случаев в данном нормальном колебании принимает участие преимущественно только какая-либо определенная группа атомов, связь или изменяются определенные углы между связями. Согласно этому выделяют:

а) валентные колебания, обозначаемые ν , когда при колебании происходит, в основном, изменение длины связи; валентные колебания могут быть симметричными (ν_s) и антисимметричными (ν_{as}),

б) деформационные колебания (симметричные и несимметричные) - δ, γ - когда при колебании в основном меняются валентные углы.

Также имеются более сложные типы колебаний, при которых наблюдаются одновременно растяжение связей и деформация углов.

Измерение ИК спектра поглощения сводится к измерению интенсивности ИК излучения, прошедшего через вещество, в зависимости от частоты излучения ν или длины волны λ . Зависимость между поглощающей способностью и толщиной слоя вещества дается законом Бугера – Ламберта - Бера. Поток параллельных лучей монохроматического света при прохождении через однородную поглощающую среду ослабляется по экспоненциальному закону $I = I_0 e^{-kd}$,

I_0 – интенсивность падающего излучения, I - интенсивность прошедшего излучения, d – толщина поглощающего слоя, k – коэффициент поглощения, который зависит от длины волны и является индивидуальной характеристикой вещества.

Обычно пользуются логарифмической формой записи закона Бугера-Ламберта:

$$D = \lg I_0/I = k'd,$$

где $k' = 2.303 k$, т.е. поглощающая способность вещества (или оптическая плотность D) пропорциональна толщине поглощающего слоя d .

Основные параметры ИК спектра поглощения – число полос поглощения, их положение (определяемое ν или λ в максимуме поглощения), ширина и форма полос, величина поглощения в максимуме. Они определяются химическим составом и структурой молекул поглощающего вещества, а также зависят от агрегатного состояния вещества, температуры, давления, природы растворителя (в случае растворов) и др. Полосы поглощения колебательного спектра определенных химических связей и групп атомов имеют близкие частоты независимо от того, в состав каких молекул они входят.

Точная интерпретация спектров сложных молекул требует трудоемкого анализа колебаний и сложных расчетов. Поэтому ИК спектры часто интерпретируются на основе привлечения некоторых эмпирических закономерностей. При такой интерпретации

спектров молекул важнейшим понятием оказывается понятие характеристичности колебаний. При сравнении большого числа спектров различных молекул обнаружено, что колебательные полосы определенных групп атомов имеют приблизительно одинаковые частоты и мало зависят от характера окружающих их групп. Такие полосы поглощения называются характеристическими.

К ним относятся, например, валентные колебания связей C-H, C=O, C=C, O-H, деформационные колебания C-H, N-H, колебания групп NO₂, COO⁻, CONH₂. Основным условием проявления характеристических частот является существенное отличие параметров, обуславливающих колебания групп, от параметров колебаний основного скелета молекулы.

Органические молекулы имеют скелет, состоящий из связей C-C, колебания которых лежат в области 800-1200см⁻¹. В связи с этим для органических соединений большая часть характеристических частот лежит вне этой области.

Например, для карбонильной группы (C=O) характерна очень интенсивная полоса поглощения в области ~1700 см⁻¹, относящаяся к валентному колебанию карбонильной группы. Частота поглощения весьма сильно зависит от электронодонорных и акцепторных свойств заместителей при (C=O) группе. Отсутствие полос поглощения в данной области спектра доказывает, что в молекуле исследуемого вещества карбонильной группы нет. В то же время наличие каких либо полос в указанной области еще не является однозначным доказательством присутствия в молекуле карбонильной группы, так как в этой области могут случайно оказаться частоты других колебаний молекулы. Поэтому структурный анализ и определение конформаций по колебательным частотам функциональных групп должны опираться на несколько характеристических частот, а предполагаемая структура молекулы должна подтверждаться данными других методов.

Способы приготовления образцов для ИК спектрального анализа включают прессование таблеток из бромида калия (KBr), а также приготовление эмульсий в вазелиновом масле. На практике спектры одного и того же вещества, полученные методом таблетки с KBr и суспензионным методом, могут отличаться.

Диализ.

Диализ - удаление из коллоидных систем и растворов высокомолекулярных соединений примесей низкомолекулярных веществ с помощью полупроницаемых мембран, т. е. перегородок, которые пропускают малые молекулы и ионы, но задерживают коллоидные частицы и макромолекулы. Простейшее устройство для диализа — диализатор — мешочек из полупроницаемого материала, который заполняют очищаемой жидкостью и погружают в растворитель (дисперсионную среду). Растворенные частицы проходят сквозь мембрану, в то время как крупные нерастворенные частицы остаются внутри диализатора.

Метод лиофильной (сублимационной) сушки.

Это метод высушивания в вакууме предварительно замороженного образца.

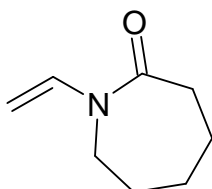
Процесс лиофильной сушки позволяет производить удаление растворителя из образцов в «мягких» условиях, без их термического или структурного разрушения. Замороженный растворитель удаляется из образца, минуя жидкую фазу, т.е. сублимируется.

Краткое описание используемых реагентов и растворителей.

1. N-винилкапролактam (N-vinylcaprolactam).

Название по номенклатуре IUPAC: 1-этинилзепан-2-он (1-ethenylazepan-2-one)

Структурная формула:



Брутто-формула: C₈H₁₃NO

Молекулярный вес: 139.19 г/моль

Температура кипения (т.кип.) (bp): 128°C/21 мм рт.ст.

Температура плавления (т.пл.) (mp): 35-38 °C (с разложением) (dec.)

Плотность (d): 1.029 г/мл при 25°C

Меры предосторожности:

Защита глаз, слизистой оболочки, кожи.

Рекомендуется работать в защитных очках и перчатках, под тягой.

Очистка:

Дополнительная очистка реактивного N-винилкапролактама осуществляется **методом перекристаллизации**, основанным на различной растворимости веществ.

Очистка сводится к растворению загрязненного вещества в подходящем растворителе при повышенной температуре и последующему выделению кристаллов очищаемого вещества из пересыщенного раствора при более низкой температуре.

На практике растворитель подбирают путем серии пробных кристаллизаций. Наиболее известен принцип "подобное растворяется в подобном", т.е. полярные соединения более растворимы в полярных растворителях, чем в неполярных, и наоборот.

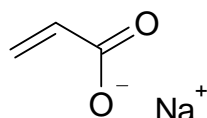
Найдено, что N-винилкапролактam можно перекристаллизовывать из смеси бензол-гексан, соотношение растворителей подбирается экспериментально. При необходимости перекристаллизацию проводят с добавлением активированного угля.

2. Акрилат натрия (sodium acrylate)

Синоним: натровая соль акриловой кислоты

Акрилаты - эфиры акриловой кислоты: CH₂=CH-COOR (где R = CH₃, C₂H₅ и др.), или её соли, например, **акрилат натрия**: CH₂=CH-COONa.

Структурная формула:



Брутто-формула: $\text{C}_3\text{H}_3\text{NaO}_2$

Молекулярный вес: 94.04 (г/моль)

Температура плавления (т.пл.) (mp): $>300^\circ\text{C}$

Меры предосторожности:

Защита глаз, слизистой оболочки, кожи.

Рекомендуется работать в защитных очках и перчатках, под тягой.

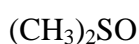
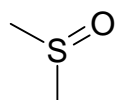
3. Диметилсульфоксид (ДМСО) (Dimethyl sulfoxide (DMSO))

Название по номенклатуре IUPAC: метилсульфинилметан (methylsulfinylmethane)

Синоним: Метилсульфоксид (Methyl sulfoxide)

Диметилсульфоксид - широко применяемый биполярный апротонный растворитель

Структурная формула:



Брутто-формула: $\text{C}_2\text{H}_6\text{OS}$

Молекулярный вес: 78.13 (г/моль)

Плотность (d): 1.10960 г/мл при 25°C .

Температура кипения (т.кип.) (bp): 189°C (с разложением), $83^\circ\text{C}/17$ мм рт. ст.

Температура плавления (т.пл.) (mp): $16-19^\circ\text{C}$.

Меры предосторожности:

ДМСО — вязкая бесцветная жидкость, с довольно резким запахом. При смешивании с водой сильно нагревается.

Диметилсульфоксид легко проникает через неповреждённую кожу, поэтому растворы токсичных веществ в ДМСО могут привести к отравлению при попадании на кожу. Может раздражать кожу, особенно при действии неразбавленного ДМСО.

Рекомендуется работать в защитных очках и перчатках, под тягой.

4. N,N,N',N'-Тетраметилэтилендиамин

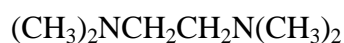
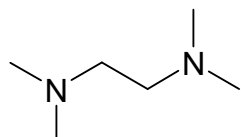
(N,N,N',N'-Tetramethylethylenediamine (TEMED, TMEDA))

Название по номенклатуре IUPAC:

N,N,N',N'-тетраметилэтан-1,2-диамин (N,N,N',N'-tetramethylethane-1,2-diamine)

Синоним: 1,2-bis(dimethylamino)ethane

Структурная формула:



Брутто-формула: $\text{C}_6\text{H}_{16}\text{N}_2$

Молекулярный вес: 116.20 г/мл

Температура кипения (т.кип.) (bp): 120-122°C

Плотность (d): 0.775 г/мл при 20 °C

Меры предосторожности:

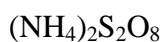
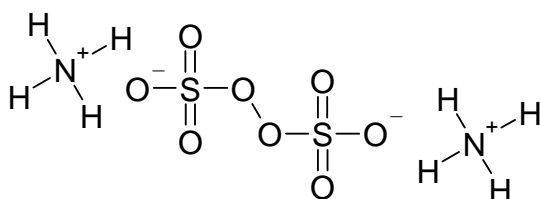
Рекомендуется работать в защитных очках и перчатках, под тягой.

5. Персульфат аммония (Ammonium persulfate (APS))

Название по номенклатуре IUPAC: Diazanium sulfonatooxy sulfate

Синоним: Ammonium peroxydisulfate

Структурная формула:



Брутто-формула: $\text{H}_8\text{N}_2\text{O}_8\text{S}_2$

Молекулярный вес: 228.20 г/мл

Меры предосторожности:

Рекомендуется работать в защитных очках и перчатках.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Синтез сополимера:

0,5 г (0,0053 моль) акрилата натрия растворяют в 6.3 мл дистиллированной воды. К полученному раствору добавляют раствор 0.45 г (0,0032 моль) перекристаллизованного N-винилкапролактама в 0.755 мл диметилсульфоксида (ДМСО) при перемешивании и комнатной температуре. Реакционную массу вакуумируют в течение 15 минут, затем сбрасывают вакуум и пропускают аргон. Нагревают до 65°C на водяной бане при перемешивании, добавляют 0,012 мл N,N,N',N'- тетраметилэтилендиамина (TEMED) и раствор 0.012 г (0.00005 моль) персульфата аммония (APS) в 0.5 мл дистиллированной воды. Выдерживают при перемешивании и 65°C в течение 3 часов. Охлаждают до комнатной температуры.

Диализ:

Подготовка мешка для диализа:

В стакан наливают 2,5 л дистиллированной воды и помещают диализную трубку длиной 20-25 см на 1-2 часа.

Завязывают один из концов трубки. Для проверки целостности полученного мешка в него наливают дистиллированную воду (~ 30 мл). Выливают воду и закрепляют мешок в стакане с дистиллированной водой.

После охлаждения до комнатной температуры реакционную массу переносят в диализный мешок. Диализуют. В начале диализа необходима частая смена воды в стакане (через ~1 час).

Полученный водный раствор сополимера переносят в круглодонную колбу объемом 0.5 л и охлаждают в бане с жидким азотом.

Лиофильная сушка:

Сополимер высушивают на установке лиофильной сушки.

Вода удаляется из предварительно замороженного образца путём сублимации льда, т. е. превращения его в пар, минуя жидкую фазу.

Полученный сополимер в виде твердого вещества белого цвета взвешивают. Оценивают практический выход продукта реакции. Переносят в тару для хранения и плотно закрывают крышкой. Для исключения попадания влаги крышку дополнительно обертывают специальной герметизирующей пленкой Parafilm M.

Отбирают пробы по 5 мг для съемки ИК- и ЯМР-спектров.

Анализ сополимера методом ИК спектроскопии:

ИК спектр снимают в таблетке KBr на ИК Фурье спектрометре Magna IR 750 Nicolet.

Характерными полосами поглощения N-винилкапролактама являются полоса 1659 см⁻¹, относящаяся к валентному колебанию карбонильной группы (C=O) лактамного кольца, и полоса 1624 см⁻¹, относящаяся к валентному колебанию винильного фрагмента (C=C).

В ИК спектре акрилата натрия характерной является полоса поглощения 1560 см^{-1} , относящаяся к валентному колебанию связей в COO^- - группе.

В ИК спектре синтезированного сополимера наблюдают появление новых полос поглощения, отсутствующих в спектрах исходных соединений, а именно: полосу 1721 см^{-1} , относящуюся к валентному колебанию карбонильной группы (C=O) и широкую полосу 3437 см^{-1} , характерную для водородосвязанного валентного колебания гидроксильной группы (OH). Эти полосы можно отнести к полосам поглощения карбоксильной группы (COOH).

Полоса поглощения 1659 см^{-1} , относящаяся к валентному колебанию карбонильной группы (C=O) исходного N-винилкапролактама, в спектре сополимера смещена до 1637 см^{-1} , что свидетельствует об изменении распределения электронной плотности в молекуле сополимера.

В ИК спектре сополимера отсутствуют полосы поглощения 1624 см^{-1} и 1560 см^{-1} , относящиеся соответственно к винильному фрагменту (C=C) N-винилкапролактама и COO^- - группе акрилата натрия.

На основании данных ИК спектра можно сделать вывод об образовании сополимера N-винилкапролактама и акриловой кислоты.

ПРИЛОЖЕНИЕ

КРАТКИЕ ТАБЛИЦЫ ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКИХ ЧАСТОТ

Таблица 1

Частоты характеристических колебаний с участием атома водорода

Группы	ν , см^{-1}	$I_{\text{отн}}$	Отнесение и примечания
R(OH)	3620 ± 50	с	$\nu(\text{OH})$ в неассоциированных молекулах при концентрации $< 0,01$ м/л
	3500 ± 50	с	В димерах
	3300 ± 100	с	В полиассоциатах, широкая расплывчатая полоса
	3500 ± 100	с	ВМС типа <i>o</i> -хлорфенола, резкая полоса, при разбавлении почти не меняется
	2950 ± 250	сл	ВМС типа салицилового альдегида, широкая расплывчатая полоса, при разбавлении не меняется
(R)NH ₂	~3500	сл	Обычно две полосы $\nu_{\text{as}}(\text{NH}_2)$ и $\nu_{\text{s}}(\text{NH}_2)$, соотношение между ними: $\nu_{\text{s}} = 0,876\nu_{\text{as}} + 345$
(R)NH ₂	~3400	ср	
	1600 ± 40	ср	$\delta(\text{NH}_2)$
(R) ₂ NH	3330 ± 20	сл	$\nu(\text{NH})$
(R)NH ₃ ⁺	~3000	с	Две полосы в указанной области ν_{as} и $\nu_{\text{s}}(\text{NH}_3)$ - широкие
(R) ₃ NH ⁺	2500 ± 200	с	$\nu(\text{NH})$ широкая полоса вступает в резонанс Ферми с обертонами
$\equiv\text{CH}$	~3300	ср	$\nu(\text{CH})$
	650 ± 50	ср	$\delta(\text{CCH})$
$=\text{CH}_2$	~3085	ср	$\nu_{\text{as}}(\text{CH}_2)$
	~2975	ср	$\nu_{\text{s}}(\text{CH}_2)$
	~420		$\delta(\text{CH}_2)$
	~910	с	$\pi(\text{CH}_2)$
R-CH ₃	2960 и 2870	с, ср	$\nu_{\text{as}}(\text{CH}_3)$, $\nu_{\text{s}}(\text{CH}_3)$
R-CH ₂ -R	~2925 и 2850	с, с	$\nu_{\text{as}}(\text{CH}_2)$, $\nu_{\text{s}}(\text{CH}_2)$

Таблица 2

Частоты характеристических колебаний с участием двойных связей и ароматических колец

Группа	ν , см^{-1}	$I_{\text{отн}}$	Отнесение и примечания
RHC=CH ₂	~1645	ср	$\nu(\text{C}=\text{C})$. Интенсивность увеличивается, если двойная связь непосредственно соединена с атомами O, Cl и т.д. При сопряжении с C=C, C=O и т.д. расщепляется на две и более полосы
RC=CH ₂	~1655	ср	
цис-RHC=CHR	~1660		
транс-RHC=CHR	~1675	сл	
R ₂ C=CHR	~1670	сл	
R ₂ C=CR ₂	~1670	сл	
C=C аромат. кольца	~1600 ~1580 ~1500 ~1450	ср - сл	Различные колебания ароматического кольца. Интенсивность возрастает при сопряжении с заместителем. Полоса 1580 см^{-1} присутствует только в сопряженных системах, особенно сильна при <i>пара</i> -замещении, например, CH ₃ COC ₆ H ₄ OCH ₃
R'R''C=O	1730 ± 80	с	$\nu(\text{C}=\text{O})$, в этот интервал укладывается большая часть карбонильных соединений.
R'R''C=N-R	1660 ± 30	ср - с	$\nu(\text{C}=\text{N})$ в открытой цепи. Сопряжение приводит к смещению в низкочастотную сторону. Комплексообразование может как снижать, так и повышать $\nu(\text{C}=\text{N})$.
-C=N- (цикл.)	1580 ± 30	сл - ср	$\nu(\text{C}=\text{N})$ в цикле. Сильно взаимодействует с $\nu(\text{C}=\text{C})$, имеется несколько полос с колебаниями C=N.
-N=N-	1600 ± 30	сл - ср	$\nu(\text{N}=\text{N})$ в азосоединениях.
(R)N=O	1550 ± 50	с	$\nu(\text{N}=\text{O})$, частота зависит от характера заместителей: донорные понижают ее, акцепторные повышают, комплексообразование понижает

(RR'R'')N→O	1275 ± 25	с	$\nu(\text{N} \rightarrow \text{O})$ в окислах пиридинов и др. Донорные заместители понижают, акцепторные повышают $\nu(\text{N} \rightarrow \text{O})$. При комплексообразовании понижается
	1280 ± 30	с	$\nu(\text{N} \rightarrow \text{O})$ в окисях алифатических аминов
(R)O–N=O	1640 ± 40	оч. с	$\nu(\text{N}=\text{O})$ в нитритах, обертон 3300 см^{-1}
	830 ± 20	с	$\nu(\text{N}-\text{O})$
	620 ± 70	с	$\delta(\text{ONO})$
(R)–NO ₂	1555 ± 10 1370 ± 10	с	$\nu_{\text{as}}(-\text{NO}_2)$ и $\nu_{\text{s}}(\text{NO}_2)$ в алифатических нитросоединениях
	1540 ± 10 1350 ± 10	с	$\nu_{\text{as}}(-\text{NO}_2)$ и $\nu_{\text{s}}(\text{NO}_2)$ в ароматических нитросоединениях
(R)ONO ₂	1630 ± 20 1335 ± 75	с	ν_{as} и $\nu_{\text{s}}(\text{NO}_2)$ в ковалентных нитратах
(R) ₃ P=O	1335 ± 75	оч. с	$\nu(\text{P}=\text{O})$ в фосфорилгалогенидах
	1255 ± 25	с	$\nu(\text{P}=\text{O})$ в эфирах-фосфатах, фосфонатах, фосфинатах
	1175 ± 25		$\nu(\text{P}=\text{O})$ в в фосфиноксидах R ₃ PO
	1175 ± 25	с	$\nu(\text{P}=\text{O})$ в амидах кислот и окисях фосфинов. Комплексообразование понижает $\nu(\text{P}=\text{O})$ на 20-100 см^{-1}
(R) ₃ P=S	725 ± 25	ср - сл	$\nu(\text{P}=\text{S})$, малохарактеристична
(R) ₂ S=O	1050 ± 10		$\nu(\text{S}=\text{O})$ в сульфоксидах, обычно зависит от характера заместителя. При координации по O понижается, по S - повышается
(R) ₂ SO ₂	1380 ± 70 1120 ± 10	с	$\nu_{\text{as}}(\text{SO}_2)$ и $\nu_{\text{s}}(\text{SO}_2)$ в сульфонах, сульфонидах, сульфохлоридах
	1200 ± 50 1045 ± 35	с	$\nu_{\text{as}}(\text{SO}_2)$ и $\nu_{\text{s}}(\text{SO}_2)$ в сульфокислотах

Используемые сокращения:

ν , см⁻¹ - частота колебания,

ν_s – частота симметричных колебаний,

ν_{as} - частота антисимметричных колебаний,

$I_{отн.}$ - относительная интенсивность сигнала,

с – сильный, ср – средний, сл - слабый, оч.с – очень сильный, оч.сл - очень слабый.