

Профессор
И.Н.Бекман

ТЕХНЕЦИЙ

Учебное пособие

Лекция 1. СВОЙСТВА ТЕХНЕЦИЯ

ТЕХНЕЦИЙ
TECHNETIUM

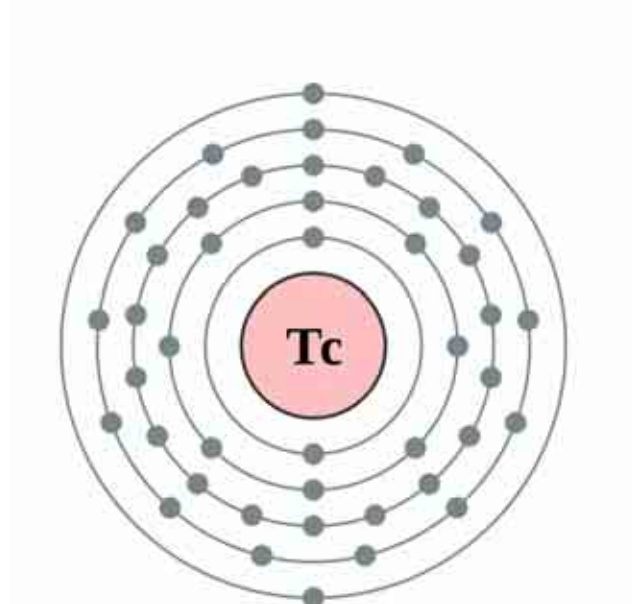
Тс, №43, A = 97.9072

Группа VIIВ, Период 5

[Kr] 4d⁵5s² или [Rn]3d¹⁰4s²4p⁶4d⁶5s¹

43: Technetium

2,8,18,13,2



Радиоактивный серебристо-коричневый металл.

Переходный элемент

Степени окисления от +7 до -1.

Склонность к диспропорционированию.

Наиболее устойчивая степень окисления +7.

Координационные числа 4÷9

Периодическая система элементов

Н																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	*	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	**	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	Ds	Rg	Uub	Uut	Uuq	Uup	Uuh	Uus	Uuo

*	La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu
**	Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

Первая лекция посвящена истории открытия технеция, распространённости и современном синтезе технеция в природе (в земной коре и в некоторых звёздах), ядерно-физические свойства изотопов технеция, физические, механические и химические свойства металлического технеция, а также способы получения металлического технеция.

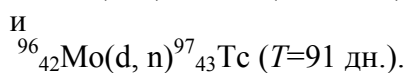
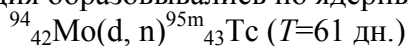
1. ОТКРЫТИЕ ТЕХНЕЦИЯ

Tc	43
ТЕХНЕЦИЙ	2
98.906	13
4d⁵5s²	18
	8
	2

Технеций (от греч. *τεχναστός* - искусственный), Tc, – химический элемент VII-группы периодической системы. Атомный номер 43. Радиоактивен, стабильных изотопов не имеет. Первый искусственно синтезированный элемент. Получен в середине 20-го века путём ядерного синтеза.

Д. И. Менделеев при создании периодической системы (1869) оставил в таблице для технеция - тяжелого аналога марганца («экамарганца») - пустую клетку. Интенсивные поиски в природе элемента с порядковым номером 43 не привели к положительным результатам. Открытия элементов, претендентов на место экамарганца, - ильмения, девия, люция, ниппония и мазурия оказались ложными.

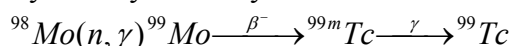
Впервые технеций синтезирован итальянскими учёными физиком Эмилио Сегре и минерологом Карло Перье в 1937 в г.Палермо (Сицилия, Италия). Сравнительно долгоживущие изотопы технеция, ^{92,93}Tc были обнаружены в молибденовой детали циклотрона Е.Лоуренса (Беркли, Калифорнийский университет, США), используемой для вывода пучка ускоренных ионов из циклотрона, которая длительное время (несколько месяцев) облучалась высокоэнергетическими дейтронами. При этом в молибдене изотопы технеция образовывались по ядерным реакциям



Поскольку ожидалось, что новый элемент – аналог рения, то в качестве специфического носителя в опытах по химической идентификации технеция использовались соли рения (перренаты). Масса технеция, образовавшегося при облучении молибдена составила $\sim 10^{-10}$ г, его химические свойства действительно оказались подобны свойствам рения. Доказательством принадлежности образующихся радиоактивных нуклидов элементу 43 являлось количественное соосаждение его окисленной формы с осадком перрената цезия. В 1939 немецкие учёные О.Ган и Ф.Штрассман обнаружили, что в «осколках», образующихся при делении урана-235 в ядерном реакторе под действием нейтронов, содержится довольно значительные количества долгоживущего изотопа ⁹⁹Tc. В 1940 Эмилио Сегре и его сотрудница Ву Цзяньсюн смогли выделить технеций в чистом виде. Руководство Палермского университета предлагало назвать элемент №43 "raportmium"(латинское название г. Палермо). Однако, уже после войны, в 1947, элемент назвали по мотивам греческого слова *τεχνητός*, означающего "искусственный", так как это был первый элемент, полученный искусственно.

Вернувшийся в Беркли Сегре вместе с Гленном Сиборгом выделил из продуктов деления облучённого нейтронами урана короткоживущий изомер ^{99m}Tc, изотоп, который теперь используется в десяти миллионах медицинских диагностических процедур ежегодно.

Позднее изотопы технеция стали получать путём облучения молибдена тепловыми нейтронами:



В качестве мишени используют килограммовые количества либо спектрально чистого МоО₃, или металлического молибдена. Мишень облучают в реакторе в течение года и выдерживают для полного распада материнского ⁹⁹Mo. В результате при облучении 1 кг молибдена потоком $8 \cdot 10^{13}$ нейтр-см⁻²·с⁻¹ удастся накопить до 60 мг технеция. При этом выделение Tc необходимо проводить в камерах с дистанционным управлением «горячей» лаборатории, выход технеция остается небольшим.

В России первые весовые количества технеция (около 60 мг) выделены В.И.Спицыным и А.Ф.Кузиной в 1957 в Институте физической химии РАН (ныне Институт физической химии и электрохимии РАН им. А.Н.Фrumкина, г.Москва) из молибдена, облученного на реакторе ИТФ АН СССР (Рис.1).



Рис. 1. Академик В.И. Спицын и д.х.н. А.Ф. Кузина в лаборатории ИФХ РАН

Позднее те же авторы совместно с сотрудниками ПО «Маяк» (г. Озерск) разработали методы выделения технеция из отходов от промышленной переработки ОЯТ и получили граммовые и килограммовые количества этого элемента. Обнаружено также, что накопление Тс зависит от природы делящегося нуклида, глубины выгорания топлива и достигает ~ 1 кг на 1 т топлива для реакторов на быстрых нейтронах. Выход ^{99}Tc в процессе деления ^{235}U или ^{239}Pu составляет около 6,1 %. Среди продуктов деления урана были обнаружены и другие изотопы Тс, которые получаются вследствие β -распада или нейтронного захвата, с массовыми числами от 99 до 110 включительно. Однако, их выход при работе ядерного реактора незначителен. В результате широкого развития атомной энергетики в мире количество технеция, выделенного в виде солей, диоксида и металла составляет десятки тонн, и еще 200 т остается невыделенными из накопленных РАО, рассеянных на поверхности Земли.

2. РАСПРОСТРАНЁННОСТЬ ТЕХНЕЦИЯ В ПРИРОДЕ



Сразу после открытия, технеций начали активно искать в земных минералах в поисках естественных его источников.

Рис. 2. Урановая руда, в которой были обнаружены следы технеция.

Поскольку период полураспада наиболее долгоживущего изотопа технеция – ^{97}Tc составляет 2,6 млн. лет, что существенно меньше времени жизни Земли, то первичного технеция на нашей планете не осталось. Однако, технеций и раньше, и сейчас непрерывно образуется на Земле в результате ядерных реакций.

В 1956 Бойд и Ларсон предположили, что в земной коре присутствует технеций вторичного происхождения, образующийся при активации молибдена, ниобия и рутения жестким космическим излучением. Кроме того, технеций - продукт спонтанного деления урана (изотопы ^{238}U и ^{235}U) достаточно широко представленного в минералах. В 1961 Курода, переработав пять килограммов урановой руды (урановая смолка из Конго), смог убедительно доказать присутствие в ней технеция в количестве 10^{-9} грамма на килограмм руды. Следы технеция обнаружены и в других урановых минералах. Естественный

ядерный реактор в Окло, Африка, за время своей работы произвел существенное количество ^{99}Tc , который потом распался в ^{99}Ru .

Табл. 1. Содержание технеция в некоторых природных объектах.

Образец	Метод определения	Содержание Tc, г/Кг
---------	-------------------	------------------------

MoS ₂ (Клаймак, Колорадо)	Спектральный	$< 4 \cdot 10^{-10}$
MoS ₂ (Невада)	« »	$< 1,5 \cdot 10^{-9}$
KReO ₄ (читсый)	« »	$< 8 \cdot 10^{-9}$
MoS ₂ (Майами, Аризона)	« »	$< 1,8 \cdot 10^{-7}$
	Радиоактивный	$< 1 \cdot 10^{-9}$
	Спектральный	$< 1,7 \cdot 10^{-9}$
	Радиоактивный	$< 4 \cdot 10^{-10}$
MoS ₂ (Невада)	« »	$8,3 \cdot 10^{-11}$
Осьмий-иридиевый концентрат	Спектральный	$1,3 \cdot 10^{-10}$
Иттро-танталит (Западная Африка)	Масс-спектральный	$< 6 \cdot 10^{-11}$
Железо-никелевый метеорит	Спектральный	$< 4,5 \cdot 10^{-10}$

Технеций встречается в рудах урана (**Табл. 1**), но в весьма незначительных количествах - $2,5 \cdot 10^{-10}$ г ^{99}Tc (10,5 расп/мин) на 1 кг урановой смолки (50%U).

В 1951 американский астроном Шарлотта Мур предположила присутствие технеция в небесных телах. Спустя год английский астрофизик Р.Мерилл при изучении спектров космических объектов обнаружил технеций в некоторых звездах из созвездий Андромеды (звезда R) и Кита. Его открытие в дальнейшем было подтверждено независимыми исследованиями, причем количество технеция на некоторых звездах мало отличается от содержания стабильных элементов: циркония, ниобия, молибдена и рутения – соседей технеция по Периодической таблице. Для объяснения этого факта предположили, что технеций образуется в звездах и в настоящее время в результате ядерных реакций. Это наблюдение опровергло все многочисленные теории дозвездного образования элементов и доказало, что звезды (по крайней мере те, что относятся к типу «красных гигантов», типа S, M и N, заканчивающих своё существование) являются современными «заводами» по производству химических элементов, причём тяжёлых элементов. Точный механизм синтеза технеция не известен, но, видимо звёзды формировались нейтронным захватом в s-процессе.

3. ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ИЗОТОПОВ ТЕХНЕЦИЯ

Известно 30 изотопов технеция с массовыми числами 85 – 118. Все они радиоактивны.

Замечание. Технеций не может иметь стабильных изотопов из-за правила запрета, предложенного в 1920 советским химиком С.А.Щукарёвым и сформулированного в 1934 немецким физиком Г.Маттаухом: у стабильных изотопов с нечетными номерами не может быть стабильных же изобаров. Правило запрета гласит: изобары двух соседних по периодической таблице элементов не могут быть стабильными: один из них обязательно должен быть радиоактивным. (В природе не могут существовать два стабильных изотопа с одинаковыми массовыми числами и ядерными зарядами, отличающимися на единицу. По крайней мере один из них должен быть радиоактивным (из этого правила существует только два исключения: пара ^{113}Cd – ^{113}In и ^{123}Sb – ^{123}Te)). Элемент № 43 расположен между молибденом (атомная масса 95,9) и рутением (атомная масса 101,1), но все массовые числа от 96 до 102 заняты стабильными изотопами: ^{96}Mo , ^{97}Mo , ^{98}Mo , ^{99}Ru , ^{100}Mo , ^{101}Ru и ^{102}Ru . Следовательно, элемент № 43 не может иметь нерадиоактивных изотопов.

Технеций - самый лёгкий из элементов, не имеющий стабильных изотопов (у второго радиоактивного лёгкого элемента – прометия - $Z=63$).

Важные изотопы: ^{95m}Tc ($T=61$ сутки), ^{97m}Tc ($T=90$ суток). Самый долгоживущий изотоп ^{98}Tc ($T=4,2 \cdot 10^6$ лет), далее идёт ^{97}Tc ($T=2,6 \cdot 10^6$ лет), за ним ^{99}Tc , $T=2,12 \cdot 10^5$ лет). Периоды полураспада большинства изотопов технеция менее часа. Исключениями являются ^{93}Tc ($T=2,73$ часа), ^{94}Tc ($T=4,88$ часа), ^{95}Tc ($T=20$ час), ^{96}Tc ($T=4,3$ дн). Преимущественным типом распада изотопов легче $A=98$ является электронный захват, для тяжёлых изотопов преимущественным является β -распад (электронный или позитронный). Здесь исключением является изотоп ^{100}Tc , который может распадаться β -распадом и

электронным захватом. Технеций также имеет много ядерных изомеров, т.е. изотопов с одним или более возбужденными ядрами. Примерами являются ^{97m}Tc (m – означает метастабильное состояние) ($T=91$ дн, $E_\gamma=0,0965$ МэВ), ^{95m}Tc ($T=61$ дн, $0,03$ МэВ), ^{99m}Tc ($T=6,01$ час, $E=0,142$ МэВ).

Табл. 2 . Ядерно-физические характеристики некоторых изотопов технеция.

A	T1/2	Тип распада
92	4,3 мин.	β^+ , электронный захват
93	43,5 мин.	ЭЗ (18%), изомерный переход (82%)
93	2,7 ч.	Электронный захват (85%), β^+ (15%)
94	52,5 мин.	ЭЗ (21%), изомерный переход (24%), β^+ (55%)
94	4,9 ч.	β^+ (7%), электронный захват (93%)
95	60 сут.	ЭЗ, изомерный переход (4%), β^+
95	20 час.	Электронный захват
96	52 мин.	Изомерный переход
96	4,3 сут.	Электронный захват
97	90,5 сут.	Электронный захват
97	$2,6 \times 10^6$ лет	Электронный захват
98	$1,5 \times 10^6$ лет	β^-
99	6,04 ч.	Изомерный переход
99	$2,12 \times 10^6$ лет	β^-
100	15,8 сек.	β^-
101	14,3 мин.	β^-
102	4,5 мин/5 сек	β^- , γ/β^-
103	50 сек.	β^-
104	18 мин.	β^-
105	7,8 мин.	β^-
106	37 сек.	β^-
107	29 сек.	β^-

Основными изотопами считаются, ^{99}Tc , «холодный технеций», $T=2,12 \cdot 10^5$ лет, чисто β^- - излучатель, энергия 0,293 МэВ, сечением активации тепловыми нейтронами 22 барна, один из основных продуктов деления ^{235}U , ^{238}U и ^{239}Pu (только ^{99}Tc получен в весовых количествах), и его ядерный изомер ^{99m}Tc , «горячий технеций», $T=6,02$ ч, γ -излучатель, энергия 140 кэВ. Активность 1 грамма ^{99}Tc равна $6,2 \cdot 10^8$ расп/сек, т.е. 629 МБк/г или 17 мКи/г). Удельная β -активность ^{99}Tc составляет 37800 распадов/(мин мкг). Поперечное сечение захвата тепловых нейтронов 20 барн, ядерный спин $9/2\hbar/2\pi$, ядерный магнитный момент +6,6847 ядерных магнетонов, электрический квадрупольный момент -0,129 барн, атомный вес 98,906254 amu.

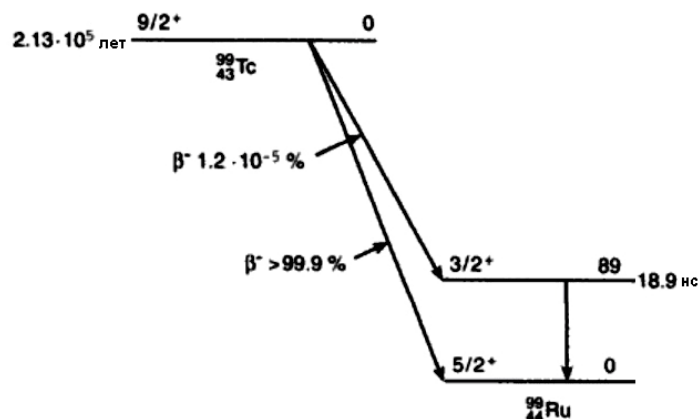


Рис. 3. Схема распада ^{99}Tc (Энергии в кэВ).

β - излучение ^{99}Tc не сопровождается γ -радиацией. 89 кэВ γ -линия приводит к 89 кэВ уровню $3/2+$ ^{99}Ru (**Рис. 3**). С периодом полураспада $2,13 \cdot 10^5$ лет ^{99}Tc распадается на стабильное ядро ^{99}Ru .

Четыре изотопа: ^{95m}Tc , ^{96}Tc , ^{97m}Tc и ^{99m}Tc используются в качестве меченых атомов при изучении химических свойств технеция. Наиболее доступен для этой цели ядерный изомер ^{99m}Tc , образующийся при облучении молибдена нейтронами. Три других изотопа, с периодами полураспада от 4 до 90 дней получают при облучении молибдена протонами или дейтронами. Изотопы ^{97}Tc , ^{98}Tc и ^{99}Tc являются долгоживущими

(период полураспада более 10^5 лет) и могут быть использованы для изучения химии технеция. Последний из изотопов наиболее доступен, т.к. образуется при делении ядер урана и плутония или при длительном облучении молибдена в реакторе.

Изотопы $^{95m,g}\text{Tc}$ ($T=61$ сут), и ^{96}Tc ($T=4.28$ сут) получают путем облучения молибденовых и ниобиевых мишеней α -частицами энергией 30 МэВ. При облучении молибденовых мишеней часть $^{95m,g}\text{Tc}$ образуется непосредственно из молибдена, другим путем является накопление за счет распада ^{95}Ru ($T=1.64$ ч). При этом также получают радионуклиды ^{97}Ru ($T=2,9$ сут) и ^{103}Ru ($T=39$ сут), которые используют в анализе ^{99}Tc масс-спектрометрическим методом (^{99}Ru является единственным стабильным изобаром, поэтому полноту разделения Ru и Tc необходимо контролировать). Метод позволяет получать ^{95g}Tc в чистом виде, если предварительно отделить ^{95}Ru от образовавшейся в результате облучения смеси изотопов технеция. Для отделения технеция от рутения и молибдена используют экстракцию метилизобутилкетонем из сернокислой среды. В данном способе ведётся одновременное получение радиотрассеров технеция и рутения (^{97}Ru и ^{103}Ru). Трассеры рутения используются в анализе ^{99}Tc для контроля полноты отделения от единственного стабильного изобара – ^{99}Ru . Побочными продуктами является ^{96}Tc и ^{95m}Tc , которые также могут быть использованы как радиотрассеры.

Для наиболее изученного ^{99}Tc спин ядра равен $9/2$, магнитный момент $+5,657$ ядерного магнитона, электрический квадрупольный момент $Q = 0,3 \cdot 10^{-24} \text{ см}^2$. Сравнение изомерных переходов в ядрах Tc^{93} , Tc^{95} , Tc^{97} и Tc^{99} позволило сделать вывод о том, что во всех этих ядрах основные состояния отвечают протонным уровням $1 g_{1/2}$, а возбужденные состояния – $2p_{1/2}$. Для изомерного перехода ядра ^{99m}Tc наблюдается зависимость константы радиоактивного распада от химического состояния технеция, связанного со структурой электронной оболочки.

Как следует из представленной на **Рис. 4** схемы распада ядра ^{99m}Tc , в большинстве случаев (98,6%) этот распад происходит двумя ступенями: сначала испускается γ -квант с энергией 2 кэВ, а затем γ -квант с энергией 140 кэВ. Испускаемые при этом γ -кванты с энергией 2 кэВ в сильной степени конвертированы. Вследствие низкой энергии изомерного перехода конверсия происходит лишь на слабо связанных электронах внешних оболочек. Поэтому изменения в структуре электронной оболочки влияют на коэффициент внутренней конверсии γ -лучей и тем самым и на период полураспада изомера. Период полураспада ^{99m}Tc (металл) равен $6,04 \pm 0,003$ часа, что на 1 сек. больше периода полураспада в KTcO_4 и на 8,6 сек. меньше в Tc_2S_7 . Таким образом, химическое состояние элемента, хоть и слабо, но влияют на скорость распада нестабильного ядра: период полураспада металлического технеция в 1,0003 раза больше периода полураспада измеренного у KTcO_4 . Подобные изменения происходят и при увеличении давления. Например, при давлении в 10^5 атм происходит ускорение распада ^{99m}Tc на 0,025%. Продуктом распада ^{99m}Tc является долгоживущий ^{99}Tc .

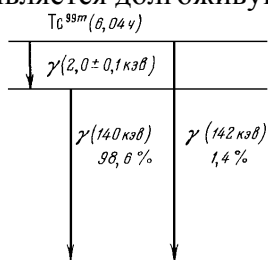


Рис. 4. Схема распада ^{99m}Tc .

Получение долгоживущего изотопа ^{99}Tc в весовых количествах осуществляется выделением его из смеси продуктов деления урана или из облученного нейтронами природного молибдена. Первый из этих источников получения технеция является наиболее эффективным и дешевым, так как при делении ядерного горючего образуются изотопы технеция с высокими выходами. Особенно большим выходом (6%) образуется долгоживущий изотоп ^{99}Tc . Высокие выходы этого изотопа наблюдаются и в случае деления других делящихся материалов.

Табл. 3. Основные изотопы технеция.

Радио- нуклид	T _{1/2}	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/Бк·с		Дочерний радионуклид (выход)
			характеристи- ческое, γ- и аннигиляцион ное излучение	β-излучение, конверсионн ые электроны и электроны Оже	
^{93m} Tc	43.5 мин	ЗЭ; ИП	7,22·10 ⁻¹	7,90·10 ⁻²	⁹³ Mo радиоакт. (0,182) ⁹⁶ Tc радиоакт. (0,818)
⁹³ Tc	2,75 ч	ЗЭ	1,46	6,28·10 ⁻³	⁹³ Mo радиоакт.
^{94m} Tc	52 мин	ЗЭ; β ⁺	1,85	7,53·10 ⁻¹	⁹⁴ Mo стаб.
⁹⁴ Tc	293 мин	ЗЭ; β ⁺	2,67	4,87·10 ⁻²	⁹⁴ Mo стаб.
^{95m} Tc	61 сут	ЗЭ; β ⁺ ИП	6,73·10 ⁻¹	1,55·10 ⁻²	⁹⁵ Tc радиоакт. (0,04)
⁹⁵ Tc	20 ч	ЗЭ	7,94·10 ⁻¹	6,80·10 ⁻³	⁹⁵ Tc стаб.
^{96m} Tc	51,5 мин	ЗЭ; ИП	5,11·10 ⁻²	2,72·10 ⁻²	⁹⁶ Mo стаб. (0,02) ⁹⁶ Tc радиоакт. (0,98)
⁹⁶ Tc	4,28 сут.	ЗЭ	2,49	8,75·10 ⁻³	⁹⁶ Mo стаб.
^{97m} Tc	87 сут.	ИП	9,59·10 ⁻³	8,68·10 ⁻²	⁹⁷ Tc радиоакт.
⁹⁷ Tc	2,6·10 ⁶ лет	ЗЭ	1,14·10 ⁻²	5,57·10 ⁻³	⁹⁷ Mo стаб.
⁹⁸ Tc	4,2·10 ⁵ лет	β ⁻	1,41	1,59·10 ⁻¹	⁹⁸ Ru стаб
^{99m} Tc	6,02 ч	ИП	1,26·10 ⁻²	3,88·10 ⁻⁵	⁹⁹ Tc радиоакт.
⁹⁹ Tc	2,13·10 ⁵ лет	β ⁻	—	1,01·10 ⁻¹	⁹⁹ Ru стаб
¹⁰¹ Tc	14,2 мин	β ⁻	3,33·10 ⁻¹	4,77·10 ⁻¹	¹⁰¹ Ru стаб
¹⁰⁴ Tc	18,2 мин	β ⁻	1,95	1,60	¹⁰⁴ Ru стаб

Табл. 4. Изотопы технеция.

Parent	Parent Z	Decay mode	Half life	Q	J π	Production
^{90a} Tc	43	EC	7.9 s	9.1	1+	-
^{90b} Tc	43	EC	50.0 s	9.6	4,5,6	-
⁹¹ Tc	43	EC	3.20 m	6.22	(9/2)+	C
⁹² Tc	43	EC	4.40 m	7.87	(8)+	C
⁹³ Tc	43	EC	2.75 h	3.201	9/2+	C
^{93m} Tc	43	IT	43.50 m	0.392	1/2-	C
⁹⁴ Tc	43	EC	4.88 h	4.256	7+	C
^{94m} Tc	43	EC	53.00 m	4.331	(2)+	C
⁹⁵ Tc	43	EC	20.00 h	1.691	9/2+	C
^{95m} Tc	43	EC	61.00 d	1.73	1/2-	C
⁹⁶ Tc	43	EC	4.35 d	2.973	7+	CF
^{96m} Tc	43	IT	52.00 m	0.034	4+	C
⁹⁷ Tc	43	EC	2.60E+6 y	0.32	9/2+	CFT
^{97m} Tc	43	IT	91.00 d	0.097	1/2-	CT
⁹⁸ Tc	43	B-	4.20E+6 y	1.796	(6)+	CFT
⁹⁹ Tc	43	B-	2.14E+5 y	0.294	9/2+	IT
^{99m} Tc	43	IT	6.02 h	0.143	1/2-	IT
¹⁰⁰ Tc	43	B-	15.8 s	3.202	1+	FT
¹⁰¹ Tc	43	B-	14.20 m	1.614	(9/2)+	IFT
¹⁰² Tc	43	B-	5.28 s	4.53	1+	I
^{102m} Tc	43	B-	4.35 m	4.53	(4,5)	I
¹⁰³ Tc	43	B-	50.0 s	2.66	5/2+	I
¹⁰⁴ Tc	43	B-	18.20 m	5.6	(3+)	IF
¹⁰⁵ Tc	43	B-	7.80 m	3.64	(5/2+)	I
¹⁰⁶ Tc	43	B-	36.0 s	6.547	(1,2)	I
¹⁰⁷ Tc	43	B-	21.0 s	4.82		I
^{108a} Tc	43		8.34 s			I
^{108b} Tc	43	B-	5.0 s	7.72	(2+)	I
¹⁰⁹ Tc	43	B-	1.0 s	5.99		I
¹¹⁰ Tc	43	B-	0.825 s	8.8		I

Оба 99-тых изотопа: и ^{99m}Tc и ⁹⁹Tc имеют важное значение для современной науки, техники и медицины. Но их значение совершенно различно, и даже противоположно друг другу. Если короткоживущий ^{99m}Tc широко используется в медицине (в методе сцинтиграфии), то долгоживущий ⁹⁹Tc – вреднейший продукт деления ядерного топлива, способный к сильному загрязнению среды обитания и который как можно скорее должен быть уничтожен (то, что он может быть использован как эффективный агент против коррозии или как катализатор, не спасает его от этой участи).

4. МЕТАЛЛИЧЕСКИЙ ТЕХНЕЦИЙ

Технеций находится в VII группе периодической системы и является аналогом марганца и рения. По своим физическим и химическим свойствам технеций приближается скорее к рению, чем к марганцу, что является следствием лантанидного сжатия.

Электронная конфигурация внешних оболочек технеция в основном (не возбуждённом) состоянии $4s^2 4p^6 4d^6 5s$ или $4s^2 p^6 4d^5 5s^2$ сверх структуры криптона. Энергия последовательной ионизации 7,28, 15,26, 29,54 эВ. Кристаллохимический радиус атома Tc 0,136 нм, радиусы ионов Tc⁷⁺ 0,057 нм, Tc⁴⁺ 0,072 нм, Tc²⁺ 0,095 нм. Значение электроотрицательности 1,9. Работа выхода электронов 4,4 эВ. Радиусы валентных оболочек: s - орбитали 157,4 pm, d – орбитали 66,8 pm, длина связи TcTc 270,3 pm, экспериментальный атомный радиус 135 pm, расчётный атомный радиус 183 pm, ковалентный радиус 147 pm, молекулярный одиночной связи ковалентный радиус (координационное число 5) 128 pm, молекулярный двойной связи ковалентный радиус 120 pm, молекулярный тройной связи ковалентный радиус 110 pm, ковалентный радиус (эмпирический) 156 pm (1000 pm = 1 нм). Атомный радиус 0,1358 нм, ионные радиусы Tc⁴⁺ 0,070 нм, Tc⁷⁺ 0,056 нм.

Технеций (Tc)	
Атомный номер	43
Внешний вид	Серебристо-коричневый радиоактивный металл.
Свойства атома	
Атомная масса (молярная масса)	97.9072 а.е.м. (г/моль)
Радиус атома	136 пм
Энергия ионизации (первый электрон)	702.2 (7.28) кДж/моль (эВ)
Электронная конфигурация	[Kr] 4d ⁶ 5s ¹
Химические свойства	
Ковалентный радиус	127 пм
Радиус иона	(+7e)56 пм
Электроотрицательность (по Полингу)	1.9
Электродный потенциал	0
Степени окисления	от -1 до +7; наиболее устойчива +7
Термодинамические свойства	
Плотность	11.5 г/см ³
Удельная теплоёмкость	0.243 Дж/(К·моль)
Теплопроводность	50.6 Вт/(м·К)
Температура плавления	2445 К
Теплота плавления	23.8 кДж/моль
Температура кипения	5150 К
Теплота испарения	585 кДж/моль
Молярный объём	8.5 см ³ /моль
Кристаллическая решётка	
Структура решётки	гексагональная
Период решётки	2.740 Å
Отношение c/a	1.604

Технеций - тяжёлый (плотность 11,5 г/см³), тугоплавкий ($T_{пл}=2140^{\circ}$, химически стойкий металл.

Сравнение некоторых физических свойств технеция с соседями по 7-ой группе приведены в **Табл. 4, 5 и 6.**

Табл. 5. Термодинамически данные технеция

Состояние	$\Delta_f H^{\circ}$	$\Delta_f G^{\circ}$	S°	$C_p H$	$H^{\circ}_{298.15}-H^{\circ}_0$
Единицы	кДж/моль	кДж/моль	Дж/моль	Дж/моль	кДж/моль
Твёрдое	0	0			
Газ	678		181.0	20.8	6.20

Табл. 6 . Свойства элементов седьмой группы.

Свойство	Mn	Tc	Re
Заряд ядра	25	43	75
Атомная масса	54,938	98,906	186,207
Число стабильных изотопов	1	—	2
Электронная конфигурация	[Ar]3d ⁵ 4s ²	[Kr]4d ⁶ 5s ¹	[Xe]4f ¹⁴ 6s ²
Энергия ионизации, кДж/моль			
первая	716,88	702,41	760,3

вторая	1 505,2	1 476,2	1 601,7
третья	3 251,5	2 846,3	2 509
четвертая	4 940,0	4 438	3 666
пятая	6 985,5	5 307	4 221
шестая	9 166,1	7 719	6 175
седьмая	11 510,7	–	7 622
Металлический радиус, нм	0,130	0,136	0,137
Ионный радиус, нм			
М(VII)	0,040	0,056	0,071
М(VI)	0.041	–	0,066
М(V)	–	–	0,066
М(IV)	0.068	0,078	0,077
М(III)	0.072/0.079	–	–
М(II)	0.081/0.097	–	–
Электроотрицательность			
по Полингу	1,55	1,90	1,90
по Оллреду - Рохову	1,60	1,36	1,46
Степень окисления	(-1), 0, (1), 2, 3, 4, (5), 6, 7	(-1), 0, (1), (2), (3), 4, (5), 6, 7	(-1), 0, (1), (2), 3, 4, 5, 6, 7

Табл. 7. Теплоты образования простых соединений технеция и его соседей из элементов

MnO	Mn ₂ O ₃	MnO ₂	Mn ₂ O ₇	Tc ₂ O ₇	Re ₂ O ₇	MnF ₂	MnCl ₂	MnBr ₂	MnI ₂
46	38	1	12	19	21	95	56	45	29

Табл. 8. Свойства элементов 7-ой группы.

Свойство	Mn	Tc	Re
Плотность, г/см ³	7,4	11,5	21,0
Температура плавления, °С	1244	2200	3180
Температура кипения, °С	2120	4600	5640

Табл. 9. Последовательные энергии ионизации (эВ) атомов элементов 7-ой группы

Элемент	I	II	III	IV	V	VI	VII
Mn	7,43	14,64	33,69	53,4	76	100,7	119,24
Tc	7,28	15,26	29,3	43,5	59,2	76,2	94,1
Re	7,87	13,2	26,0	37,7	50,6	64,5	79,0

Табл. 10. Свойства простых веществ седьмой группы.

Свойство	Mn	Tc	Re
Температура плавления, °C	1 244	2 170	3 180
Температура кипения, °C	2 060	4 570	5 630
Энтальпия плавления, кДж/моль	14,4	23,8	33,1
Энтальпия испарения, кДж/моль	219,7	585,2	707,1
Энтальпия атомизации, кДж/моль	280,7	678,0	769,9
Плотность, г/см ³	7,44	11,49	21,04
Электрическое сопротивление, мОм·см	185,0	22,6	19,3
Модуль Юнга, ГПа	191	—	466
Энергия одинарной ковалентной связи, кДж/моль	121	263	293
Стандартный электродный потенциал, В:			
$E^\circ(M^{2+}/M^0)$	-1,185	0,400	—
$E^\circ(M^{3+}/M^0)$	-0,283	—	0,300

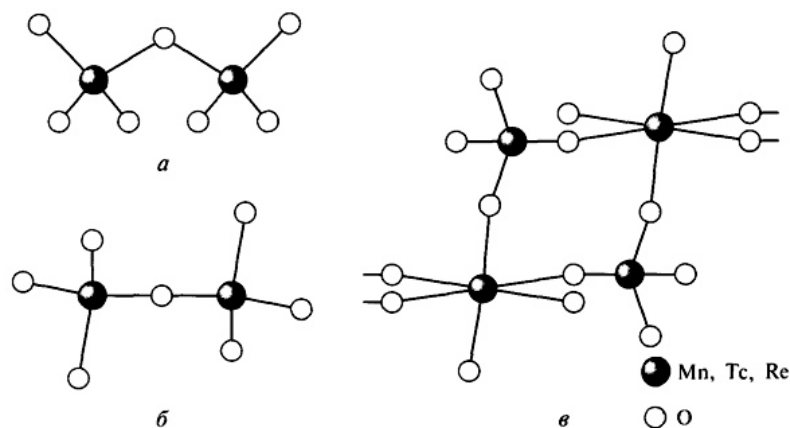


Рис. 5. Строение высших оксидов марганца (а), технеция (б) и рения (в).

Табл. 11. Галогениды металлов седьмой группы

Степень окисления	MnX _n	TcX _n	ReX _n
+2	MnF ₂ , MnCl ₂ , MnBr ₂ , MnI ₂	—	—
+3	MnF ₃ , MnCl ₃	—	Re ₃ Cl ₉ , Re ₃ Br ₉ , Re ₃ I ₉
+4	MnF ₄ , MnCl ₄	TcCl ₄	ReF ₄ , ReCl ₄ , ReBr ₄ , ReI ₄
+5	—	TcF ₅	ReF ₅ , ReCl ₅ , ReBr ₅
+6	—	TcF ₆	ReF ₆ , ReCl ₆
+7	—	—	ReF ₇

Из долгоживущих изотопов этого элемента только ⁹⁹Tc может быть получен в достаточно больших количествах. Он образуется в результате деления ядер ²³⁵U при облучении их тепловыми нейтронами. Технеций выделяют из растворов смеси продуктов деления. В реакторах мощностью 100 МВт ежедневно можно получать ~2,5 г этого изотопа. В результате β⁻-распада ($T = 2,12 \cdot 10^5$ лет) с максимальной энергией β⁻-частиц 0,29 МэВ, ⁹⁹Tc превращается в стабильный изотоп ⁹⁹Ru (β⁻-распад не сопровождается γ-излучением; удельная активность 17 мкКи/мг). Поскольку ⁹⁹Tc имеет очень большой период полураспада, его можно рассматривать как практически стабильный изотоп: в течение 10 лет, например, образуется только 3·10⁻³ масс.% ⁹⁹Ru.

Рассмотренные ниже химические свойства технеция определены в экспериментах с изотопом ⁹⁹Tc.

Табл. 12. Степени окисления, электронные конфигурации, координационные числа и геометрия соединений элементов седьмой группы.

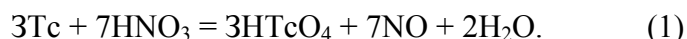
Степень окисления	Электронная конфигурация	Координационное число	Геометрия	Примеры ионов и соединений	
				марганца	технеция, рения
-3	d^{10}	4	Тетраэдр	$\text{Mn}(\text{NO})_3(\text{CO})$	$[\text{M}(\text{CO}_4)]^{3-}$
-2	d^9	4	Квадрат	$[\text{M}(\text{pc})]^{2-}$	—
-1	d^8	5	Тригональная бипирамида	$[\text{Mn}(\text{CO})_5]^-$	$[\text{M}(\text{CO}_5)]^-$
0	d^7	6	Октаэдр	$\text{Mn}_2(\text{CO})_{10}$	$\text{M}_2(\text{CO})_{10}$
1	d^6	6	Октаэдр	$[\text{Mn}(\text{CN})_6]^{5-}$	$[\text{M}(\text{CN})_6]^{5-}$
2	d^5	2	Линейная	$\text{Mn}(\text{C}(\text{Si}(\text{CH}_3)_3)_2)_2$	—
		4	Тетраэдр	$[\text{MnBr}_4]^{2-}$	—
		5	Тригональная бипирамида	$[\text{MnBr}(\text{tren})_3]^+$	$[\text{ReCl}(\text{dppe})_2]^+$
		6	Октаэдр	$[\text{Mn}(\text{H}_2\text{O})_6]^{2+}$	$[\text{Re}(\text{bipy})_3]^{2+}$
		8	Додекаэдр	$[\text{Mn}(\text{NO}_3)_4]^{2-}$	—
		5	Тригональная бипирамида	$\text{Mn}(\text{P}(\text{CH}_3)_3)_2\text{I}_3$	$\text{Ph}_3\text{Re}(\text{PPh}(\text{C}_2\text{H}_5)_2)_2$
		5	Квадратная пирамида	$[\text{MnCl}_5]^{2-}$	$[\text{Re}_2\text{Cl}_8]^{2-}$
		6	Октаэдр	$\text{K}_3[\text{Mn}(\text{CN})_6]$ $[\text{Mn}(\text{C}_2\text{O}_4)_3]^{3-}$	<i>mer</i> - $\text{MCl}_3(\text{PR}_3)_3$
		7	Пентагональная бипирамида	$\text{Mn}(\text{NO}_3)_3(\text{bipy})$	$[\text{M}(\text{CN})_7]^{4-}$
		6	Октаэдр	$[\text{MnF}_6]^{2-}, \text{MnO}_2$	$[\text{MnI}_6]^{2-}$
4	d^3	6	Октаэдр	$[\text{MnF}_6]^{2-}, \text{MnO}_2$	$[\text{MnI}_6]^{2-}$
5	d^2	4	Тетраэдр	$[\text{MnO}_4]^{3-}$	—
			Тригональная бипирида	—	ReF_5
			Квадратная пирамида	—	$[\text{MOCl}_4]^-$
			Октаэдр	—	$[\text{Tc}(\text{NCS})_6]^-$
			Октаэдр	—	ReO_4^{2-}
6	d^1	4	Тетраэдр	$[\text{MnO}_4]^{2-}$	ReO_4^{2-}
		5	Квадратная пирамида	—	ReOCl_4
		6	Октаэдр	—	ReF_4
		8	Додекаэдр	—	$[\text{Re}(\text{CH}_3)_8]^{2+}$
		8	Квадратная антипризма	—	$[\text{ReF}_8]^{2-}$
7	d^0	4	Тетраэдр	MnO_4^-	$[\text{MO}_4]^-$
		5	Тригональная бипирида	—	$\text{ReO}_2(\text{CH}_3)_3$

6	Октаэдр	–	$[\text{ReO}^2\text{Cl}_3]^2$
7	Пентагональная бипирамида	–	ReF_7
9	Трехшапочная тригональная призма	–	$[\text{ReH}_9]^{2-}$

Элементарный технеций впервые был получен в невесомых количествах в 1945 электролизом сернокислых растворов технеция. Технеций получают восстановлением водородом сульфида Tc_2S_7 при 1100°C или пертехната аммония NH_4TcO_4 при $500-600^\circ$. Металлический технеций может быть выделен также электролитически на меди из 0,2%-ного раствора NH_4TcO_4 в 2н. H_2SO_4 с использованием платинового анода при плотности тока $25 - 30 \text{ ма/см}^2$. Восстановление технеция на ртутном катоде приводит к образованию амальгамы технеция.

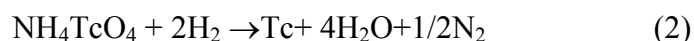
Металлический технеций получают термическим разложением пертехнетатов с органическими катионами в токе инертного газа или термолизом других соединений (например, NH_4TcO_4) в восстановительной среде, а также методом электрохимического выделения из водных растворов, причем наиболее эффективными являются сернокислые электролиты.

Получившийся металл не растворяется ни в HCl , ни в H_2SO_4 , однако легко окисляется азотной кислотой.



В лабораторных условиях металлический технеций может быть получен следующими способами.

Способ 1



Растертый в порошок NH_4TcO_4 нагревают в платиновой лодочке в слабом токе водорода сначала при 300° в течение 20-30 мин, пока не начнется разложение, а затем при $700-900^\circ$ в течение 4-5 ч до образования металлического технеция. Получают серебристо-серый порошок металлического технеция, медленно тускнеющий на влажном воздухе.

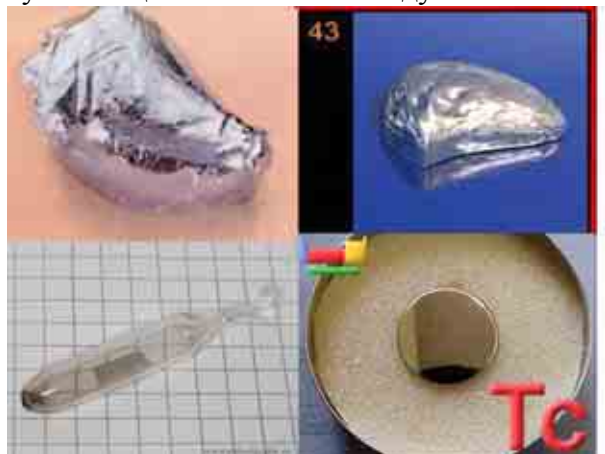
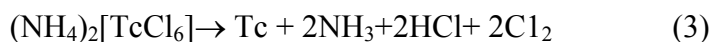


Рис. 6. Металлический технеций — радиоактивный переходный металл серебристо-серого цвета с гексагональной решёткой ($a=0,2737 \text{ нм}$; $c=4,391 \text{ нм}$). На фото слева внизу хорошо видно, что нижняя часть ампулы, где обычно располагается кусочек металла при хранении, немного коричневая. Это потемнение стекла вызвано большой поглощенной дозой радиации, накопившейся за долгий период хранения.

Способ 2

Металлический технеций можно получать путем электролиза 0,02 М раствора NH_4TcO_4 в 1 М растворе серной кислоты с использованием платинового анода и медного катода. В процессе электролиза раствор перемешивают. При плотности тока $25-30 \text{ мА/см}^2$ на катоде выделяется блестящий серебристый осадок металлического технеция. Для более полного выделения технеция необходимо постоянно добавлять небольшие количества H_2O_2 , чтобы окислить образующийся одновременно с технецием коричнево-черный гидрат диоксида технеция до TcO_4^- .

Способ 3



Порошок $(\text{NH}_4)_2[\text{TcCl}_6]$ нагревают в фарфоровой лодочке в токе сухого азота или аргона до температуры темно-красного каления. Происходит разложение без плавления; остается серебристо-серый порошок технеция.

Наиболее перспективными соединениями для получения металлического Тс методом термоллиза стали пертехнетаты тетраалкиламмония $[(C_nH_{2n+1})_4N]TcO_4$ (где $n=1-5$). Процесс их термического разложения при ~ 250 С в токе аргона с 5% водорода с дополнительным отжигом при 500-1500 С позволяет получить чистый металлический технеций требуемой дисперсности и чистоты.

Свойства. Светло-желтые игольчатые кристаллы, в виде порошка имеет серый цвет, компактный металл (слитки, фольга, проволока) серебристо-серого цвета. Молекулярный кристалл, d 11,487. $T_{пл}=2157^\circ$. $T_{кип}=4265^\circ$, критическая температура сверхпроводимости 7,8К ($-265,3^\circ$). Кристаллическая решетка гексагональная плотноупакованная (тип А3, пространственная группа $P6_3/mmc$, номер пространственной группы: 194. Параметры ячейки: a : 273.5 pm, b : 273.5 pm, c : 438.8 pm, α : 90.000° , γ : 120.000° . В тонких слоях (поликристаллическая плёнка, полученная методом ионного напыления при температуре жидкого азота, толщина менее 150 Å) - кубическая гранецентрированная решетка ($a = 3,68\text{Å}$).

Технеций парамагнитен; его магнитная восприимчивость при 25° $2,7 \cdot 10^{-4}$. Энтальпия плавления: 23 кДж/моль, энтальпия испарения: 550 кДж/моль, энтальпия атомизации: 661 кДж/моль. У атомного технеция есть характерные линии эмиссии с длинами волн: 363.3 нм, 403.1 нм, 426.2 нм, 429.7 нм, и 485.3 нм. Хорошо растворяется в кислотах-окислителях: в HNO_3 , концентрированной H_2SO_4 и царской водке. В водных растворах может существовать в степенях окисления от - 1 до + 7; наиболее устойчивы Тс(VII) и Тс(IV).

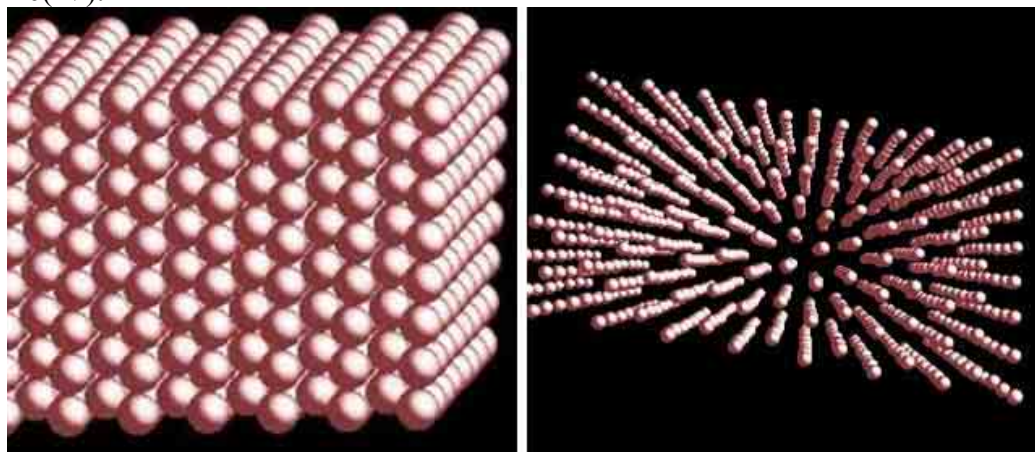


Рис. 7. Кристаллическая структура металлического технеция.

Технеций – тяжёлый, тугоплавкий, химически стойкий металл. Металлический технеций легко подвергается механической обработке. В свободном виде серебристо-коричневый металл, тускнеющий на влажном воздухе. Обладает гексагональной плотноупакованной кристаллической решёткой с параметрами $a = 0,2409$ нм, $c = 0,43983$ нм. Гексагональная кристаллическая решетка технеция небольшое число плоскостей легкого скольжения, вследствие чего в литом состоянии металл хрупок и при прокатке в валках при 20°C растрескивается при незначительных степенях обжатия. Тем не менее, при помощи соответствующих технологических обработок технеций получен в виде прутков, лент, фольги и проволоки.

Координационное число технеция 12 сохраняется при низких температурах и давлениях; элементарная ячейка содержит два атома с радиусом 0,1358 нм (в тонких слоях технеция известна модификация с кубической гранецентрированной кристаллической решёткой). Кристаллическая структура технеция не претерпевает изменений при давлении до 60000 кГ/см². Плотность $11,487$ кг/дм³, атомный радиус 0,136 нм, ионный радиус Tc^{7+} 0,056 нм, потенциал ионизации 7,23 эВ, $T_{пл} = 3200^\circ$, $T_{кип}=4700^\circ$, теплоёмкость $C_p = 24$ Дж/(моль·К), теплота плавления 24 кДж/моль, теплота сублимации 650 кДж/моль. Перевод технеция из твёрдое в парообразное состояние требует затраты теплоты сублимации 155 ккал/г-атом. Удельное электрическое сопротивление $69 \cdot 10^{-6}$ Ом·см (при 100°), теплопроводность 49,8 Вт/(м·К) (при 300K). Коэффициент линейного теплового расширения $(7,2-8,9) \cdot 10^{-6} \text{K}^{-1}$.

При низких температурах технеций обладает сверхпроводимостью, причем критическая температура для него является наивысшей из всех критических температур металлов и составляет, по различным данным, 11,2 или 8,24 К. Сплавы технеция с некоторыми металлами также обладают сверхпроводимостью при сравнительно высоких критических температурах – выше критической температуры самого технеция. Технеций слабо, хотя и значительно сильнее рения, парамагнитен,

магнитная восприимчивость $+2,5 \cdot 10^{-6}$ (при 102K) значительно больше, чем у нелогичного технеция – рения. Величина магнитной восприимчивости Tc остаётся постоянной в диапазоне 80-1300K.

Технеций - тугоплавкий металл с температурой плавления $>2000^{\circ}\text{C}$. Он образует непрерывные твердых растворов с металлами, кристаллизующимся гексагональной сингонии: рутением, осмием и своим аналогом - рением. К двойным сплавам относятся: Sc-Tc, Ti-Tc, Zr-Tc, Hf-Tc, V-Tc. Nb-Tc, Ta-Tc, Cr-Tc, Mo-Tc, W-Tc, Mn-Tc, Fe-Tc, Al-Tc, Zn-Tc, PЗЭ-Tc. В **Табл.** приведены некоторые данные о двойных сплавах технеция. Для приготовления сплавов используют сверхчистый металлический технеций и другие компоненты высокой чистоты.

Получившийся металл не растворяется ни в HCl, ни в H_2SO_4 , однако легко окисляется азотной кислотой по реакции:

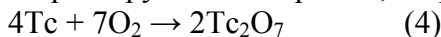


По химическим свойствам технеций больше похож на рений, чем на марганец. Он менее активен, чем Mn, но более активен, чем Re. Значения стандартных электродных потенциалов: пары Tc(VI)/Tc(IV) 0,83 В, пары Tc(VII)/Tc(VI) 0,65В, пары Tc(VII)/Tc(IV) 0,738В. В электрохимическом отношении технеций лежит между марганцем и рением. Степени окисления от 0 до +7. **Наиболее устойчивая валентность технеция +7.**

Для технеция с валентностями ниже семи характерны реакции диспропорционирования, гидролиза и комплексообразования, играющие важную роль в химии этого элемента.

В ряду напряжений технеций стоит правее водорода; он не реагирует с соляной кислотой любых концентраций, но легко растворяется в минеральных кислотах, являющихся окислителями: царской водке и азотной кислоте с образованием TcO_4^- , а также в бромной воде и перекиси водорода.

При нагреве на воздухе, технеций реагирует с кислородом, сгорая при $T=500^{\circ}$ с образованием Tc_2O_7 .



При нормальных условиях с водой не реагирует.

Металлический технеций при температуре 400° взаимодействует с фтором и хлором с образованием гексафторида, гексахлорида и тетрахлорида технеция. При более высокой температуре ($700-1100^{\circ}$) технеций реагирует с углеродом с образованием карбида TcC. Растворяется в тёплой бромной воде. Нерастворим ни в HCl ни в HF. Растворим в HNO_3 и концентрированной H_2SO_4 , т.е. в кислотах с окислительными свойствами, с образованием раствора технециевой кислоты HTcO_4 , в которой технеций имеет формальную валентность +7.

Табл. 13. Двойные сплавы технеция.

Система	Тип кристаллической структуры	Состав сплава, ат. % Tc	Соединения технеция со вторым компонентом	Параметры решетки, Å	
				<i>a</i>	<i>c</i>
Sc — Tc	α -Mn	88,5	—	9,509	8,571
Ti — Tc	MnZn ₂	66,7	—	5,223	
Ti — Tc	α -Mn	87,5	—	9,579	
	α -Mn	85,7	—	—	
	CsCl	66,7	—	—	
	CsCl	50	—	3,110	
Zr — Tc	α -Mn	85,7	—	9,637	8,655
	MgZn ₂	66,7	—	5,219	
Hf — Tc	α -Mn	87,5	—	9,603	
	α -Mn	85,7	—	—	
	MgZn ₂	66,7	—	—	
	CsCl	50,0	—	3,270	
V — Tc	<i>bbc</i>	10	—	—	—
	<i>bbc</i>	25	—	3,026	
	<i>bbc</i>	30	—	—	
	<i>bbc</i>	40	—	3,024	
	CsCl	50	—	3,023	
	<i>bbc</i>	60	—	3,034	
	<i>bbc</i> + <i>hcp</i>	75	—	—	
	<i>hcp</i>	95	—	—	
Nb — Tc	<i>bbc</i>	5	—	—	—
	<i>bbc</i>	10	—	3,276	
	<i>bbo</i>	20	—	3,244	
	<i>bbc</i>	30	—	3,217	
	<i>bbc</i>	40	—	3,192	
	<i>bbc</i>	50	—	3,170	
	<i>bbc</i> + α -Mn	60	—	—	
	α -Mn	75	—	9,947	
	α -Mn	85	—	—	
	<i>hcp</i>	97	—	—	
Ta — Tc	<i>hcp</i>	(100)	—	2,743	4,400
	α -Mn	83,4	—	9,565	
	α -Mn	80,0	—	—	
	CsCl	50,0	—	3,172	
Cr — Tc	σ	75	—	9,290	4,846
	σ	60	—	9,217	4,803
Mo — Tc	σ — β -Tc	75	—	—	4,945
	σ	70	—	9,509	
	Cr ₃ O	60	—	4,934	
	Cr ₃ O	56	—	4,931	
	Cr ₃ O	53	—	4,942	
W — Tc	σ	75	—	9,479	<i>b</i> = 5,166
Mn — Tc	σ	60	—	9,15	4,80
Fe — Tc	σ	60	—	9,130	4,788
	σ	50	—	9,077	4,756
	σ	40	—	9,010	4,713
Al — Tc	Ni ₂ Al ₃	—	Tc ₂ Al ₃	4,16	5,13
	Моноклинная	—	TcAl ₄	5,1	<i>b</i> = 17,0
	MnAl ₆	—	TcAl ₆	5,58	5,1; β = 100°
	WAl ₁₂	—	TcAl ₁₂	7,527	<i>b</i> = 7,63; 9,00
Zn — Tc	—	—	Zn ₂ Tc ₁₁	—	—
P3Э — Tc	MgZn ₂	—	GdTc ₂	5,397	8,883
	MgZn ₂	—	TbTc ₂	5,375	8,843
	MgZn ₂	—	DyTc ₂	5,365	8,830
	MgZn ₂	—	HoTc ₂	5,353	8,813
	MgZn ₂	—	ErTc ₂	5,340	8,792
	MgZn ₂	—	TuTc ₂	5,334	8,775
	MgZn ₂	—	LuTc ₂	5,309	8,847
	MgZn ₂	—	YTc ₂	5,373	8,847

Табл. 14. Физические и термодинамические константы технеция.

Константа	Величина
Атомный вес	98,8 98,911 98,913
Радиус атома, Å	1,358
Параметры кристаллической решетки, Å:	
a	2,735
c	4,391
Температура плавления, °C	2200 2257
Температура кипения, °C	4700
Энтродия S^{298} твердого Тс, кал/моль·град .	7,4
Энтродия S^{298} газообразного Тс, кал/моль·	
град	43,26
Критическая температура, °K	11,2 8,22
Удельный вес, г/см ³	11,487
Коэффициент сжимаемости, Мбар ⁻¹	0,27
Работа выхода электрона, эв	4,4
Потенциал ионизации, в:	
I_1	7,23
I_2	14,87
I_3	31,9
Магнитная восприимчивость при 25°С, СГС	270·10 ⁻⁶
Частота ядерного магнитного резонанса для	
поля 10 ⁻⁴ гаусс, Мгц	9,583
Основные линии оптического спектра (Å) и	4297,06 (500)
их относительные интенсивности (указа-	4262,26 (400)
ны в скобках)	4238,19 (300)
	4031,63 (300)
	3636,10 (400)
	3466,29 (250)
Основные линии рентгеновского спектра, Å	$K_{\alpha_1} = 673,57$ $K_{\alpha_2} = 677,90$ $K_{\beta_{1,3}} = 600,20$ $K_{\beta_{2,4}} = 588,99$
Сечение захвата нейтронов для реакции	
Тс ⁹⁹ (n,γ), барн	20