

Приложение на радиоактивността в науката, медицината и техниката

Радиоактивните елементи и радиоактивните лъчения се използват широко

в модерната наука. С малки количества радиоактивни елементи учените, инженерите и лекарите изследват движението на определени вещества в най-разнообразни системи. Чрез измерване на поглъщането на радиоактивните лъчения във веществата може да се установят най-различни техни свойства, както и да се контролират и изучават различни технологични процеси. Изключително приложение в практиката намират гама облъчвателните инсталации, ускорителите на електрони и други елементарни частици. Някои от най-разпространените и използвани радиоактивни елементи са:

Тритий (${}^3_1\text{H}$) с β^- тип разпад, изотоп на водорода, използван в биологични изследвания и за увеличаване на мощността на ядрените оръжия, периодът на полуразпадът му е 12,3 г.

Въглерод-14 (${}^{14}_6\text{C}$) с β^- разпад, използва се за радиоактивно датиране, периодът на полуразпадът му е 5730 г.

Кислород-15 (${}^{15}_8\text{O}$) с β^+ разпад е краткоживущ изотоп на кислорода, който се получава в циклотроните. Използва се за медицинска диагностика в позитронната томография. Период на полуразпад-2,03 минути.

Калий-40 (${}^{40}_{19}\text{K}$) с β^- разпад е доминиращ радиоактивен източник в човешкия организъм с период на полуразпад $1,25 \cdot 10^9$ г. Използва се за радиоактивно датиране.

Кобалт-60 (${}^{60}_{27}\text{Co}$) с период на полуразпад 5,27 г., използван като източник в гама облъчвателни инсталации, гама дефектоскопски апарати и др.

Стронций-90 (${}^{90}_{38}\text{Sr}$) с β^- разпад и период на полуразпад 29 г. е продукт на делене в ядрените реактори с химично поведение, като елемента калций. При поглъщане се отлага в костите на живите организми.

Йод-131 (${}^{131}_{53}\text{I}$) с β^- разпад и период на полуразпад 8,04 дни е също продукт на делене в ядрените реактори, основен замърсител при ядрени аварии и ядрени взривове.

Цезий-137 (${}^{137}_{55}\text{Cs}$) с период на полуразпад 30,2 г., използван като източник в гама облъчващи инсталации, гама дефектоскопски апарати и др.

Радон-222($^{222}_{86}\text{Rn}$) с α разпад е радиоактивен газ, образуващ се при разпадането на радий-226. Той се излъчва от бетона и материалите, изграждащи стените и подовете на сградите. Период на полуразпад-3,82 дни.

Радий-226($^{226}_{88}\text{Ra}$)) с α разпад е радиоактивен елемент с висока радиотоксичност. Дъщерен продукт в радиоактивното семейство на $^{238}_{92}\text{U}$ и период на полуразпад 1600 г.

Уран-235($^{235}_{92}\text{U}$) с α разпад и период на полуразпад $7,3 \cdot 10^8$ г. е родоначалник на актиниевото радиоактивно семейство. Делящ се изотоп със съдържание 0.714% в изотопната смес на природния уран. Използва се основно, като реакторно гориво.

Уран-238($^{238}_{92}\text{U}$) с α разпад и период на полуразпад $4,47 \cdot 10^9$ г. е родоначалник на урановото радиоактивно семейство. Съдържание в изотопната природна смес на урана — 99,28%. Използва се, като гориво в ядрените реактори с бързи неутрони.

Плутоний-239($^{239}_{94}\text{Pu}$) с α разпад и период на полуразпад 24 110 г. е делящ се изотоп използван за производство на ядрени оръжия.

Метод на белязаните атоми

Методът на „белязаните атоми“ се свежда до включване на радиоактивно

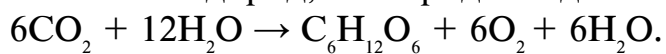
вещество в даден процес или в изследван материал, след което се наблюдава неговото движение и разпределение. Предпоставката за използване на „белязаните атоми“ или още наречени радиоизотопни индикатори е, че те са химически идентични на стабилните нуклиди на същите елементи, т.е. заместването на атома на водорода с атоми на деутерий или тритий не изменя типа или здравината на химичните връзки и не оказва влияние на физичните свойства на даденото съединение. До момента на своето радиоактивно разпадане радиоизотопният индикатор

не се отличава от стабилния атом на същия елемент, освен по своята маса. При радиоактивно разпадане атомът се регистрира, след което той се превръща друг елемент и последващото му поведение не представлява интерес.

С метода на „белязаните атоми“ във вентилацията се изследват процесите на филтрация и скоростта на потоците на газовете, количеството на пренасяното вещество, наличието на пробиви.

В металургията чрез „белязани атоми“ се изследват процесите на кристализация, анализират се съставът и структурата на метални детайли, а в машиностроенето се отчита износването на машинните

елементи, качествата на маслата, корозията на металите и пр. Инженерите изучават механичните системи с помощта на радиоактивни изотопи, включвайки ги в машинните лагери и след това чрез измерване на радиоактивността на машинното масло те успяват да определят степента на износване на триещите се повърхности. Най-широко приложение е получил методът на „белязаните атоми“ за изследване на химични реакции и биологични процеси. Това се дължи на факта, че радиоактивното разпадане на всеки атом „издава“ неговото положение чрез метода на белязаните атоми е изследван процесът на фотосинтеза, който се извършва в растенията. Той се състои в трансформация под въздействие на светлината на въглеродния диоксид от въздуха и водата във въглеводород, кислород и вода



С помощта на радиоактивните атоми са идентифицирани междинните етапи на процеса. Изследваните растения се поставят в атмосфера на въглероден диоксид, „белязан“ с въглерод-14, като се облъчват със светлина през различни периоди от време с различна продължителност, след което с помощта на хроматографски методи се анализират различните молекулярни съставки в растенията. Присъствието на радиоактивния въглерод е указание за участието на въглеродния диоксид в процеса на фотосинтеза. По подобен начин е установен пътят и участието на фосфора и водорода във фотосинтезата, като са изследвани съдържанията на радиоактивния фосфор и трития в растенията. Ако в дадено кристално вещество се внедри радиоактивен газ, изследвайки количеството на газа, което се отделя при неговото нагриване, може да се определи еманиращата му способност, която е свързана със структурните изменения, които претърпява веществото при повишена температура. Тези изследвания са важни за стъкларската, керамичната и циментовата промишленост, за производството на полупроводници, лакове, покрития и др. Изследванията на реакциите на повърхността на метали, сплави и руди имат много голямо значение за флотацията, корозията, метализацията и обработката на веществата. С помощта на радиоактивни индикатори може да се изследва йонния обмен между анионите от метална повърхност и йоните на металите в разтвори.

Радиоактивните индикатори се използват и при изследване на водите и водните ресурси – за измерване количеството на валежите, скоростта и посоката на теченията, филтрацията на водите в езера, язовири, канали и динамиката на водите в тях, връзките между различни водоеми, произходът на водата, движението на подпочвените води.

Като индикатори се използват естествено разпространените в природата въглерод-14, тритий и някои изкуствени радионуклиди.

Речните отоци може да бъдат определяни чрез въвеждане на даден радионуклид във водите и измерване на времето, необходимо за достигането му до датчици, разположени на известно разстояние по течението на реките. За избягване на опасността от замърсяване с битови и промишлени отпадни води също се извършват анализи с помощта на радиоактивни индикатори, като много точно се определят местата на тяхното изхвърляне и дълбочината. Разходите при прилагане на ядрените методи в хидрологията са пониски в сравнение с тези при останалите методи и дават уникална информация, която е недостъпна по друг начин. За изследване на циркулацията на водите в морета и океани се използват изотопите на берилия и хлора. Ядрото $^{10}_4\text{Be}$ има период на полуразпадане $T = 1,6.106$ г. То се образува под въздействие на космичните лъчи и се среща в океанските и морските утайки, което позволява да бъде използвано за изучаване на динамиката на процесите при дъното на моретата и океаните. При взаимодействие на космичните лъчи с ядрата на аргона от въздуха се образува радиоактивния изотоп $^{36}_{17}\text{Cl}$ ($T = 3.105$ г.). Същият се отлага на повърхността на водните басейни. За да достигне до водата на океанското или морското дъно за този изотоп е необходимо време от порядъка на милиони години. По съдържанието му в дънните утайки може да се определи времето за циркулация на морската и океанската вода по вертикала, което е важно за изучаване на процеса на утаяване на радиоактивните отпадъци. Методът на „белязаните атоми“ се прилага за изучаване на ефективността на смесването, което е важна технологична операция за много отрасли на промишлеността. Нееднородното смесване води много често до лошо качество на продукцията, загуба на енергийни и финансови ресурси и време. Чрез добавяне на радионуклид в апаратурата за смесване или чрез белязани атоми в някои от компонентите може да бъде проследено приближаването на системата към равновесно състояние, като се измерва активността на периодично вземани проби от хомогенизиращата се среда. Методът се прилага за установяване на хомогенизацията на бетона, на смеси от нефтопродукти, на еднородността на стъклomаса.

Изучаването на взаимодействието на живите организми с околната среда също е възможно с метода на „белязаните атоми“, тъй като множеството от тях са свързани в общи хранителни вериги. В селското стопанство те се използват за изучаване на асимилирането на микроелементи, необходими за израстването на растенията. По този метод се установява за животните необходимостта от храни със съдържание на определени елементи, като противодействие на някои заболявания.

Приложение на метода на белязаните атоми в минното дело и геологията

Физико-химичните процеси при флотацията се анализират също с метода на белязаните атоми. По правило се използват в-радиоактивни препарати, като въглерод-14, калций-45, фосфор-32, сяра-35, за да се избегне тежката радиационна защита. Ако се използват флотационни реагенти с разтворени в тях малки количества радиоактивни изотопи, може лесно да се проследят процесите, протичащи на повърхността на минералните частици в пулпа. Количеството на погълнатия реагент от даден минерал се определя, като в разтвора се добавя известно количество радиоактивно вещество и се измерва неговата активност. След смесване на реагента със съответния минерал и впоследствие след филтриране на разтвора от минералните частици, отново се определя неговата активност. Сравняването на получените стойности за активността дава възможност да се определи количеството на погълнатия от минералните частици реагент. При прилагането на този метод трябва да съществува увереност, че радиоактивният елемент не реагира химически с минералните частици.

Методът на белязаните атоми се използва и за контрол върху ефективността на процеса на гравитационно обогатяване, като добавяното радиоактивно вещество трябва да има плътност близка до тази на плътността на полезния продукт. Като се измери активността на обогатявания материал на входа на обогатителната установка и се регистрира активността на материала на нейния изход може да се определи ефективността на обогатителния процес. Смесването на въглища в дву-, три- или многокомпонентна шихта се контролира с белязаните атоми на радиоактивните изотопи фосфор-32 или сяра-35. Радиоактивните елементи се разтварят във вода и се смесват с една от фракциите на шихтата.

Чрез анализ на отбрани проби от смесителната машина в процеса на работа същата може да се настройва и да се оцени оптималното време на смесване. Изучаването на филтрацията на газове и течности, на газоотделянето, на динамиката на шахтни води се извършва също чрез белязани атоми. За контрол върху движението на шахтните води се използват най-често изотопите йод-131 и бром-82, които слабо се поглъщат от скалите, а за изследване на движението на метана в порите на въглищните пластове в тях се въвежда изотопът криптон-85 чрез специално прокарани сондажи и по отделянето му от пластовете се съди за движението на метана. Контрол върху плътността на пластовете в дълбочината на въглищни масиви се извършва, като в тях

се прокарват успоредни сондажи, в единия от които се поставя радиоактивен източник кобалт-60, а в другия на същото ниво се въвежда измерителна апаратура. По такъв начин се отчита поглъщането на лъчението от пластове на различни дълбочини. Изменението на интензитета на преминалото през въглищния пласт лъчение е пропорционално на неговата плътност. Методът на белязаните атоми, наречен „гама локация“, се използва за анализ на процеса на разслоение на подвижни среди. Фини зърна от изотопа кобалт-60, затворени в ампули, с активност $1\text{ч}5\ \mu\text{Ci}$, се поставят в разслояващата се среда. Фиксирането на частиците и тяхното движение във времето се следи със система от детектори, разположени в три координатни направления. Методът се прилага и за измерване на скоростта на пулп при затворен цикъл на движение. Гама радиоактивният изотоп бром-82 ($T \approx 36\ \text{h}$) се използва за изследване на ефективността на пневматичния и хидравличния транспорт при пренасяне на въглищен прах на големи височини. Частици с определена големина се „бележат“ с радиоактивен препарат и чрез гайгер-мюлерови броячи се измерва времето за прелитане на частиците между отделни точки в тръбопроводите.

Приложение на радиоактивните източници и ядрените методи в техниката и промишлеността

Радиоактивните източници в съчетание с подходящи детектори на лъчение се използват за контрол и управление на най-различни автоматизирани промишлени процеси, като радиоактивни нивомери и превключватели за газове, течности и насипни вещества. С тяхна помощ се определят дебелини на покрития, плътност на течности, прахообразни вещества или твърди тела.

Приоритетно радиоактивните източници и детектори на лъчения се използват в труднодостъпни места и условия, в които директното прилагане на други методи е затруднено, например при високи температури и налягания, отровни и корозионни среди и пр.

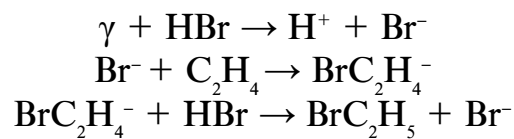
Радиоизотопните измерители представляват измерителна система, състояща се от две части: радиоактивен източник и детектор, поставени по определен начин един спрямо друг. Най-често те се разполагат един срещу друг, при което детекторът регистрира лъчението преминало през даден образец, съответно се измерва и погълнатото от веществото на образца лъчение. Чрез приборите, измерващи отразеното от изследваното вещество лъчение, се определят дебелината на отразяващия материал и неговата електронна плътност, която пряко е свързана с химичния състав на веществото. Обратното разсейване на

електрони от органични съединения зависи от съдържанието на водород и не зависи от съдържанието на въглерод, азот и кислород в тях. С помощта на прибор за изследване на обратното разсейване на електрони, излъчени при бета радиоактивното разпадане на стронций-90 от източник с активност 10 mCi, може да се определи с точност 0,03% за 20 min съдържанието на водород в образец с обем около 10 ml. Методът е неразрушителен и превъзхожда по чувствителност другите известни аналитични методи за измерване. Рентгеновата дефектоскопия и гама-дефектоскопията се използват за неразрушителен контрол на материали и изделия. Принципът на тези методи се основава на различното поглъщане на рентгенови и гама лъчи от материали с различаваща се плътност. Рентгеновата дефектоскопия се използва предимно в стационарни условия понеже изисква електрично захранване и високоволтов трансформатор, но гама-дефектоскопията се прилага и в полеви условия. Проверката на качеството на заварките на дълги тръбопроводи се извършва с дистанционно управляеми колички с радиоактивни източници, оборудвани с филми за регистрация и запис на преминалото през контролираната заварка лъчение. Рентгеновата дефектоскопия и гама-дефектоскопията се прилагат за определяне на качеството на железобетонните конструкции, за установяване наличието на кухини в различни отливки и на дефекти в крилата на самолетите и самолетните турбини, за контрол над взривни вещества и оръжия.

Радиационно-химичен синтез

Чрез облъчване с радиоактивни лъчения се постигат целенасочени изменения в структурата на материалите поради това, че лъчението може да предизвиква химични реакции. За получаване на бетон-полимерни материали с повишена влагоустойчивост и якост бетонните тела се пропиват и насищат с мономер и при последващо облъчване се извършва полимеризация на мономера в структурата на бетона. По тази технология се вулканизират гумени изделия и се извършва радиационно-химичен синтез на различни съединения и др. Облъчвателните установки за тези цели използват източници на гама лъчи, като кобалт-60 и цезий-137. Те се използват и за стерилизация на различни хранителни продукти, семена, медицински инструменти и др. Облъчване с доза около 107 rad повишава степента на полимеризация в обикновения полиетилен с 60% и повишава неговата термоустойчивост. Облъчването с гама лъчи води до съполимеризация на синтетични и природни полимери, например на дървесина, хартия и памук със

стирол. Така чрез пропиване на дървесина с мономер с последващо облъчване с гама лъчи се получават дървено-пластични материали с висока твърдост и якост. При облъчване с гама кванти от радиоактивен източник $^{60}_{27}\text{Co}$ се иницират реакции за получаване на анестетик (етилов бромид). Смес на етилен и бромоводород се облъчва с гама кванти, молекулите на бромоводорода се разлагат и йонизираните атоми на брома атакуват молекулите на етилена, след което се образува продукт, който реагира с бромоводорода и се получава анестетик



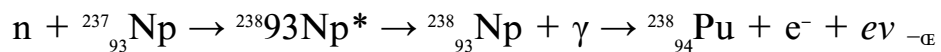
Образуваният йон на брома предизвиква верижна реакция, като атакува нови молекули на етилена с много висок добив на реакцията. Радиационно-химичният синтез се прилага в процеса на производство и херметизиране на полупроводникови прибори, а чрез целенасочено въздействие на лъчението върху диелектричните материали може да се изменят техните оптични и механични свойства.

Този метод притежава някои преимущества пред фотохимичните и каталитичните процеси, тъй като реакциите протичат при нормална температура; скоростта им може да се контролира и не изисква скъпо струващи катализатори; може да се използват външни източници на лъчение, които проникват в реакционния съд; разпределението на енергията е еднородно обема и реакциите се иницират и в твърди тела.

Радиоизотопни източници на енергия

Принципът на действие на радиоизотопните енергийни източници се основава на факта, че при поглъщане на радиоактивните лъчения във веществото те отдават енергията си на неговите атоми и молекули, което в крайна сметка води до повишение на температурата на поглътителя. Пример за това е загряването на топлоотделящите горивни елементи в активната зона на ядрените реактори, след което топлината се преобразува в електрична енергия. На основата на този принцип са разработени множество радиоизотопни енергийни

източници. Радиоизотопните генератори се използват от 60-те години на XX в., като източници на енергия за морски фарове, в метеорологични станции, в навигационната техника, в космонавтиката и в различни труднодостъпни райони на Земята. Те не притежават движещи се части и изискват минимално техническо обслужване. Източниците на енергия, основани на алфа радиоактивното разпадане притежават много ценни характеристики и намират разнообразно приложение. Поради това, че някои от алфа източниците са с много дълъг живот и излъчените алфа-частици имат строго определена енергия (за разлика от бетаизточниците) те подържат дълго време постоянна мощност и не се влияят от външните условия. Алфа-радиоактивният изотоп плутоний-238 е подходящ радиоактивен източник на енергия. Той се получава при радиационно залавяне на неутрон от ядрото на нептуний-237 и последващо разпадане на полученото възбудено ядро нептуний-238 по схемата



Плутоний-238 е използван, като източник на електроенергия в космическия проект „Аполо“ и в космическите полети на спътниците „Викинг“, изпратени към планетата Марс.

Същият изотоп е използван за производство на енергия за спътниците, с които са получени първите снимки на повърхността на планетата Юпитер, както и в космическите кораби „Вояджър“. В сърдечните пейсмейкъри, чрез които се стимулира сърдечната дейност, енергията от алфа разпадането на ядрата на плутоний-238 се трансформира в топлина и посредством термоелектричен преобразовател се превръща в електрична енергия и се изработва слаб електричен импулс. Стандартният ядрен стимулатор съдържа по 160 mg уран-238 в Ta-Ir-Pt капсула и тежи около 170 g. Устройството се свързва със сърдечния мускул и посредством генерираните електрични импулси предизвиква неговите съкращения. Обикновените стимулатори с химически батерии имат годност до две години и се нуждаят от презареждане, докато ядрените стимулатори ги превъзхождат по дълготрайност над пет пъти. Най-често използвания радиоактивен изотоп в радиоизотопните енергийни източници в земни условия е стронций-90, чиято специфична мощност е 0,93 W/g. Тя е по-висока от специфичната мощност на цезий-137 (0,26 W/g) и плутоний-238 (0,58 W/g), но е по-ниска от специфичната мощност на изотопите кюрий-244 (2,8 W/g) и кюрий-242 (121 W/g), които обаче трудно се произвеждат. Радиоизотопният генератор на електроенергия, тип SNAP-7 съдържа изотопен топлинен източник, съставен от 15 цилиндрични елемента, изработени от радиоактивното

съединение SrTiO_2 с обща активност на радиоактивния стронций-90 около 225 kCi. Всеки от елементите е с маса по 470 g и е поставен в метална цилиндрична защита. Целият топлинен източник е ограден със 120 термодвойки от оловен телурид и радиационна защита от обеднен уран с дебелина 8 cm. Устройството е поставено в стоманен цилиндър с охлаждащи пластини. Общата маса на генератора е 2300 kg, височината му е 85 cm, а диаметърът 55 cm. Времето, за което са гарантирани почти постоянна мощност и напрежение на източника е около пет години. Източникът се използва в тежки метеорологични условия и в труднодостъпни райони на Земята. Генераторът SNAP-3 е разработен за целите на метеорологията. Той има мощност 4,2 W, напрежение 3,54 V и маса 765 kg. Генераторът е поставен в стоманена тръба с дължина 2,4 m и диаметър 75 cm. Електричната енергия, произведена от генератора зарежда никел-кадмиев акумулатор. Радиоизотопните източници на енергия се използват за захранване на апаратура, поставена на океанското дъно за регистриране на земетресения и ядрени взривове и за устройства за контрол на движението на подводници и подводни научни станции.

С тяхна помощ се захранват навигационни устройства от различен тип за обозначаване на океански и морски трасета, на подводни скали и други препятствия, за радиосигнални и акустични предаватели, осигуряващи възможност за определяне на координатите на кораби и подводници с висока точност. На основата на радиоизотопните източници на енергия са разработени системи за регенериране на питейна вода от течните отпадъци от човешкия организъм, като топлинният източник е разработен на основата на радионуклида плутоний-238 с топлинна мощност 280 W.

Приложение на йонизиращите лъчения в медицината

С откриването на рентгеновите лъчи от Вилхелм Ръонтген през 1895 г. много бързо се развива класическата рентгенова диагностика. Тя се основава на свойството на рентгеновите лъчи да преминават без поглъщане през меките тъкани и силно да се поглъщат от костите на човешкото тяло. Това дава възможност за точно диагностициране на счупвания и травми. При вкарване в определени органи на нерадиоактивен материал с висок ефективен атомен номер, например бариева каша в стомаха при гастроентерологични изследвания, последните служат като контрастна среда за по-добро визуализиране на изследваните органи. Този метод има известни ограничения, свързани с

това, че меките тъкани не подлежат на визуализация и се получава двумерно изображение на обекта, което не дава пълната картина на съответните изменения. В съвременната медицина приложението на радиацията е огромно – от традиционните апарати за рентгенови снимки до компютърните томографи, използвани за най-качествена диагностика и рентгеновите терапевтични апарати и ускорителите. Прилагането на модерна ядрена апаратура, като гама камери, ускорители за производство на изотопи и създаване на мощни снопове от йонизиращи частици, използването на краткоживущи радионуклиди и подходящи радиофармацевтични съединения за ниско лъчево натоварване на пациентите, в съчетание с компютърна техника са в основата на ядрената (нуклеарната) медицина. Едно от най-сериозните постижения в образната диагностика е томографията, която позволява да се изследват определени разрезни от вътрешната структура на човешкото тяло чрез използване на външно рентгеново лъчение или на въведени в организма радиоактивни изотопи.

Ядрени филтри

Изключително ценно и перспективно направление на развитие на ядрените технологии е създаването на микрофилтри за приложение в различни области на науката и техниката. С помощта на мощни ускорени снопове от тежки йони, използвани в качеството на „микроигли“ се получават много фини и уникални по своите качества ядрени филтри. За тяхното производство може да се използва практически всеки полимерен материал – лавсан, поликарбонат, фотополимери и др., в зависимост от условията на неговото приложение. При преминаване през тънки пластинки от полимерния материал, с дебелини $5 \times 10 \mu\text{m}$, тежките йони (например аргон или ксенон) създават радиационни канали със силно нарушена структура на веществото. С помощта на допълнителна химична обработка се получават почти еднакви цилиндрични канали, произващи цялата дебелина на пластинката, които в зависимост от условията може да имат диаметри от хилядни части от микрона до десетки микрони. Размерите на каналите зависят от енергията и вида на йоните и метода на последващата обработка. Броят на образуваните канали може да се управлява и достига от 10^5 до 10^9 cm^{-2} в зависимост от техния диаметър. Съпротивлението на такива филтри по отношение на преминаваща през тях течност или газ е малко. Например през 1 m^2

филтрираща повърхност с диаметър на каналите $0,2 \mu\text{m}$ (помалък от размерите на някои бактерии) при налягане от 1 atm може да преминат 80 m^3 вода или 15.103 m^3 газ за денонощие. Нефилтрираното твърдо вещество се отделя върху повърхността на филтъра и лесно се почиства, като в определени случаи то се отстранява и вследствие на хидродинамичното действие на потока на филтрираната течност или на газа. Получаването на ядрените филтри не е скъпо и се извършва с висока производителност. Една от най-важните области на приложение на ядрените филтри е електронната промишленост, като те се използват за изготвяне на електронни микросхеми. Водата, киселините и други течности, използвани при производството на полупроводниковите прибори трябва да бъдат с висока степен на чистота по отношение на прах, бактерии и нежелани примеси. Ядрените филтри са много ефективни за концентриране и разделяне на бактериални и вирусни препарати, за почистването им от белтъчини и тъканни примеси, както и за почистване и сепарация на зърната на фотоемулсии за изготвяне на висококачествени фотоматериали.

Използвана литература:

1. Лилков В., Ядрена физика, МГУ, НГПФГ, 2010