

Алтернативни адсорбционни материали в системите за почистване на радиоактивни газообразни компоненти

Виктория Томова
e-mail: vitomova7@abv.bg

Въведение

Една от най – важните задачи при експлоатацията на ядрени централни в световен мащаб е осигуряване на безопасността и защита на населението и околната среда от радиоактивни вещества. Основен източник на газообразни радиоактивни продукти е процесът на делене на урана в реактора. По време на неговата експлоатация се образуват около 300 различни радионуклида, от които повече от 30 могат да попаднат в атмосферата. Сред тях са: йод – 129, въглерод – 14, цезий – 137, тритий, криптон – 85, йод – 131, ксенон – 133, йод – 133, аргон – 41, криптон – 87, ксенон – 137, йод – 131, азот – 16.

При експлоатация на ядрени реактори топлоносителя в първи контур винаги съдържа определено количество разтворени газове. За водо – водни реактори източниците на газове са следните: радиолиза на водата, корозия на конструкционните материали, газови компенсатори на обема, подхранване на топлоносителя, дефектни ТОЕ, химически добавки за поддържане на зададен воден режим, радиолиза и термордиолиза на йонитите в системите за очистка на първи контур.

Под действие на йонизиращи лъчения молекулите на водата и разтворените в нея примеси се разрушават, възбуждат и йонизират. Протича радиолиза на водата и в резултат се образуват Н, ОН, Н₂, Н₂О₂, О₂, НО₂, Н₂О. В зависимост от условията на експлоатация, част от конструкционните материали са подложени на корозия, която е съпроводена с отделяне на водород, част от който влиза в структурата на метала и се образуват хидриди, а останалата част дифундира във водата или попада в околната среда.

В съвременните ядрени реактори се използват различни конструкции на ТОЕ. В качество на обвивки широко приложение намират циркониевите сплави, които служат за предпазване на горивото от химическото въздействие на топлоносителя, а топлоносителя – от попадане на частици гориво в него. След работа на реактора една година на мощност 1 kW в активната зона се образуват около 1.8 ТВq нуклиди на криптона (^{83m}Kr, ⁸⁵Kr, ⁸⁷Kr, ⁸⁸Kr) с маса 5.2 mg; 3.3 ТВq нуклиди на ксенона (^{131m}Xe, ^{133m}Xe, ¹³³Xe, ¹³⁵Xe) с маса 55.7 mg; 6.4 ТВq нуклиди на йода (¹³¹I, ¹³²I, ¹³³I, ¹³⁵I) с маса 2.6 mg; 0.054 ТВq нуклиди на цезия (¹³⁴Cs, ¹³⁶Cs, ¹³⁷Cs) с маса 35 mg; 3.4 ТВq нуклиди на стронция (⁸⁹Sr, ⁹⁰Sr, ⁹¹Sr) с маса 14.6 mg. Част от общото количество газообразни радиоактивни продукти от деленето на урана дифундират между горивото и обвивката. Ако по някаква причина настъпи разхерметизация на обвивката на ТОЕ, то част от тези продукти може да попадне в топлоносителя.

За почистване на топлоносителя в първи контур от различни примеси и продукти на корозия, а и за поддържане на определен воден режим се използват йонообменни филтри. В процеса на тяхната експлоатация се натрупват продукти на делене и корозия. Активността на филтрите може да достигне десетки ТВq и поради това, те могат да се разрушат. Попадналите в първи контур продукти на делене, претърпяват радиационно – химически превръщания, от които се получават водород, амоняк и въглеродна киселина.

В процеса на работа на ядрения реактор в неголямо количество се образуват газовете: ¹⁴C – от активацията на азота и кислорода; ³H – при активация на Li, B, D; ¹⁸F, ²⁰F – при активация на ядрата на водата и натрия; ²³Ne – при активация на ядрата на Na, ⁴¹Ar – при активация на ⁴⁰K в Na и ⁴⁰Ar във вода и въздух. ; ¹⁸F, ²⁰F, ²³Ne имат малък период на полуразпад и ниска химическа концентрация, поради което не представляват практически интерес.

В процеса на експлоатация на ЯЕЦ образуващите се в първи контур газове се извеждат от контура за почистване. По пътя си те взаимодействат с КМ, участват в радиационно – химически реакции и т.н. Основен източник на газообразни радиоактивни вещества за реактори тип ВВЕР е системата за байпасно почистване на топлоносителя. Характера на газообразните продукти зависи от типа реактор.

Радиоактивни инертни газове – При делене на горивото се образуват десетки нуклиди тежки благородни газове (РБГ): Хе и Kr, имащи различни характеристики. Общия им обем на 1 MW.d е равен на 25 cm³. Общата им активност е равна на 0.3 TBq/MWe.y, като основно значение има ¹³³Xe. Един от най – опасните за човека изотопи е ⁸⁵Kr, тъй като лесно попада в организма при вдишване. Количеството на образуване на криптон е няколко порядъка по – високо от образуването на останалите РБГ.

Активационни газове (⁴¹Ar, ¹⁴C, ¹³N, ¹⁶N) - ⁴¹Ar се образува при захват на неутрон от ядрото на ⁴⁰Ar. Мощността на изхвърлянето му в атмосферата зависи от конструктивните и технологични особености на реактора. Относителното му съдържание в изхвърлянията не надвишава 0.3% от общата активност. Радиоактивен въглерод може да се образува в ядрените реактори в резултат на реакцията: ¹⁴N(n,p)¹⁴C (активация на азота, намиращ се във вид на примес в горивото), а както и при реакцията: ¹⁷O(n,α)¹⁴C (активация на кислорода, съдържащ се в окисното гориво) и ¹³C(n,γ)¹⁴C, които в сравнение с първата реакция са по – значими.

Тритий в газообразна форма е неустойчив. В реакторите се образува при тройно делене на ядреното гориво, в резултат на неутронна активация на Li и B, разтворени в топлоносителя на първи контур. Реакциите, по които се получава тритий са: ¹⁰B(n,2α)³H и ⁶Li(n,α)³H.

Радионуклиди на йода – При реакции на делене, а и при разпадане на продукти на делене се образуват няколко изотопа на йода. Това са изотопите с масови числа 129, 131, 132, 133, 134 и 135. Всички от тях, с изключение на ¹²⁹I, достатъчно бързо достигат равновесно състояние в активната зона. Най – голям източник на излъчване е ¹³¹I.

Аерозоли – Част от продуктите на делене и продуктите на разпадане на РБГ образуват аерозоли, които с въздушните потоци могат да попаднат във външната среда. Количеството им зависи от типа реактор, неговата мощност, продължителност на експлоатация и др. В състава на аерозолите влизат: ¹³¹I, ^{80,90,91}Sr, ¹⁰³Ru, ¹³⁷Cs, ^{141,144}Ce, ⁵¹Cr, ^{54,55}Mn, ⁵⁹Fe, ⁶⁰Co, ⁹⁵Zr, ⁸⁸Rb, ⁹⁹Mo и др.

При експлоатацията на ЯЕЦ се образуват и множество стабилни продукти, които в една или друга степен са взривоопасни (напр. водород, озон) или токсични. Необходимо е системите за почистване на газовете да отстраняват ефективно и тях.

За почистване на газовете в ядрените централи с реактори ВВЕР се експлоатира система спецгазоочистка.

Система Спецгазоочистка

Системата за спецгазоочистка в ядрените централи работи в два режима – основен и спомагателен.

За поддържане нормите за качество на топлоносителя и почистването му от различни примеси при основен работен режим, част от него се извежда от контура чрез система за подхранване и продухване на първи контур и се направлява към система за почистване. След очистка и деаериране, топлоносителят се връща в първи контур, а радиоактивният газ и аерозолите постъпват в система за каталитично изгаряне на водород. След кондензиране на парите и понижаване на съдържанието на водород под 0.3%, остатъчния некондензируем газ постъпва в системата за спецгазоочистка.

Спомагателно работния режим служи за очистка на газообразни изхвърляния, образуващи се в резултат на дегазацията на различни видове организирани изтичания на топлоносителя.

И при двата режима към системата постъпват газообразните изхвърляния, които първоначално преминават през самоочистващ се филтър с филтриращ материал стъкловата, където се сепарира влагата, заедно с аерозолите. От там газа преминава през зеолитни филтри, където се осъществява дълбоко изсушаване. За почистване на изхвърляните газове се използва въглен, който притежава адсорбционни свойства. По – конкретно се използва способ за динамична адсорбция на радионуклидите криптон и ксенон (РБГ), работещи в режими на непрекъсната очистка.

Системата работи във всички режими на нормална експлоатация на блока, включително и при преходни режими, а също и в режим на загуба на външно електрозахранване.

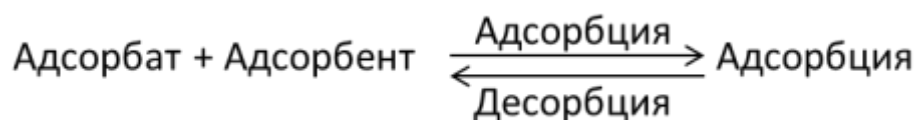
Системата се състои от три независими взаимно заменяеми функционални групи. Всяка група се състои от: два топлообменника, самоочистващ се филтър, два зеолитни филтъра, филтри – адсорбери, две газодувки, тръбопроводи, арматури, контролно – измервателни прибори, бак хидрозатвор. Всяка група има собствена подсистема за регенерация на зеолитните филтри, състояща се от: два електронагревателя и топлообменник.

Системата за спецгазоочистка служи за очистка на радиоактивно замърсени технологични газове, постъпващи от: охладител на организирани протечки, бак за организирани протечки, баци боросъдържащи води, система за доизгаряне на водорода, барботажен бак.

Адсорбция

Процесът на адсорбция се състои в адхезирането на газ, течност или разтвор върху повърхността на твърдо тяло. Веществото, на чиято повърхност се адсорбират молекули, се нарича адсорбент. Вторият компонент, който участва в процеса се нарича адсорбат – газ, течност или компонент от даден разтвор, който се адсорбира върху повърхността на адсорбента. Сорбционните процеси се делят на два типа: адсорбция и абсорбция. При абсорбцията, молекулите на сорбата се разпределят равномерно във вътрешността на сорбента, докато при адсорбцията се развива взаимодействие само върху повърхността на твърдия материал. От своя страна, адсорбцията също се дели на два типа, в зависимост от силите, които оказват влияние върху процеса: физична адсорбция и химична адсорбция (хемисорбция).

При физичната адсорбция, силите на взаимодействие между адсорбента и адсорбата са Ван – дер – Ваалсови. Това са слаби сили, което позволява на процеса да бъде лесно обратим чрез въвеждане на топлина или понижаване на налягането в системата. По този начин се извежда количеството адсорбат, което се е адсорбирало на повърхността на адсорбента и този процес се нарича десорбция.

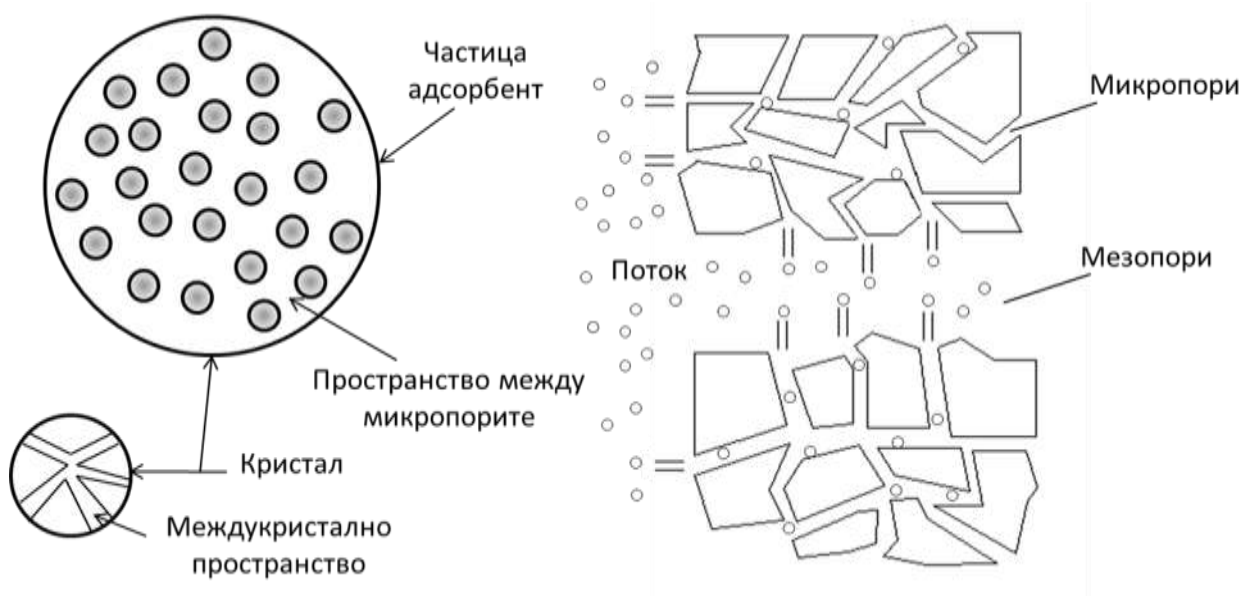


Топлината на физичната адсорбция е в интервала 20 – 40 kJ/mol. Физичната адсорбция е свързана с механизма на втечняване на газовете и няма необходимост от енергия на активация. В процеса на адсорбция се формират многослойни молекулни пластове.

Основните фактори, които влияят върху процеса на адсорбция и на база, на които се определя природата на процеса са:

1. Природа на адсорбента и адсорбата.
2. Повърхност на адсорбента.
3. Активация на адсорбента.
4. Условия на експеримента: температура, налягане, време на престой и т.н.

За постигане на висок адсорбционен капацитет се прилагат вещества с голяма специфична повърхност. В порьозното зърно на адсорбента се разграничават три вида пори: макропори с размери над 50 nm, мезопори с размери между 2 nm и 50 nm и микропори, чиито радиуси са по-малки от 2 nm (Фигура 1). Ефективните радиуси на микропорите са съизмерими с размерите на молекулите на адсорбируемото вещество. Обикновено тези пори се запълват обемно от молекулите на адсорбата, тъй като в целия им обем действа адсорбционното поле. Най – перспективни за адсорбция на молекули от газова фаза се считат материалите със смесена микро – мезопорьозна структура.



Фигура 1. Визуализация на частица адсорбент

Адсорбенти

Основно изискване към даден материал, за да бъде добър адсорбент, е да има добре развита повърхност. Най – често използваните в промишлената практика адсорбенти са активни въглини, мезопорести силикати, натурални зеолити и синтетични зеолити. Адсорбентите с най – малък размер на порите са синтетичните зеолити. Всяка частица от тези адсорбенти представлява агломерация от порести микрокристали, свързани помежду си с макропори.

От инженерна гледна точка, премахването на газообразни йодни съединения чрез адсорбция върху твърд адсорбент има много предимства пред традиционните методи за пречистване на течни радиоактивни отпадъци. Системите за адсорбция са с по – опростен дизайн, което води до по – ниски разходи за поддръжка. Една добре проектирана адсорбционна система би отстранявала йод по – ефективно. Заводите първо поколение за преработка на гориво и

очистване на йод са проектирани за пречистване на течен отпадък, поради което липсват количествени данни за оценка на преработката на гориво чрез адсорбция върху твърди адсорбенти в реални условия. Въпреки това, е получено значително количество данни от различни проучвания, проведени с пилотни инсталации. Първоначално тестваните адсорбционни материали включват активен въглен, различни форми на метали, съдържащи алуминий и силиций и макроретикуларни смоли.

Активен въглен

Активният въглен се прилага широко за отстраняване на йод от газови потоци от благородни газове, напр. импрегниран активен въглен се прилага за отстраняване на газообразен радиоактивен йод в ядрени централи. Активният въглен не е най – подходящият адсорбент на радиоактивен йод, тъй като не адсорбира добре при високи температури и има относително ниска температура на запалване.

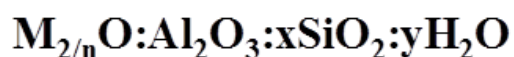
Макроретикуларните смоли

Макроретикуларните смоли обикновено са функционализирани акрилни естери или полистирол с дивинил бензолни мостове. В газова фаза тези смоли привличат молекулите, посредством тяхната относителна хидрофобност или хидрофилност. Ето защо, те привличат предимно неполярни молекули, напр. йодни молекули и органичен йод. В литературата са налични данни, които показват, че акрилните естери имат най – висок капацитет по отношение на йода. Смолите също са доста порести, но ефективността на отстраняване на йод е значително намалена при температури над 50 ° C.

Зеолити

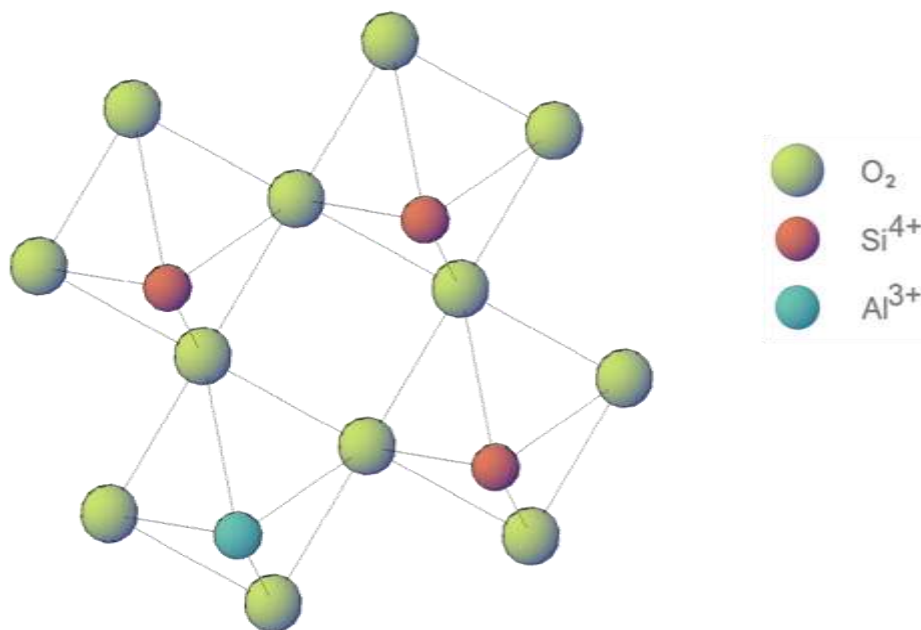
Зеолитите представляват алумосиликатни минерали с тримерна структурна мрежа, изградена от $[\text{SiO}_{4/2}]$ и $[\text{AlO}_{4/2}]$ - тетраедри, свързани помежду си в ъглите от техните споделени кислородни атоми (Фигура 2). Тази пространствена мрежа оформя множество пори и кухини, създаващи огромна „вътрешна повърхност“ и „вътрешен обем“, което от своя страна обуславя спецификата на адсорбционните свойства на зеолитите. Характерна особеност е и лесната обмяна на „подвижните“ металните катиони от структурата на зеолита с други катиони от заобикалящата среда, което обуславя и йонообменните свойства на тези материали.

Емпиричната формула за представяне на зеолит е:



Където М е катиона, компенсират отрицателния заряд, обикновено $x \geq 2$, у е водата, съдържаща се в кухините на зеолита.

Най – интересните свойства на зеолитите, като йонообмен и действието им като молекулни сита, се определят от техните уникални структурни характеристики, като взаимосвързаната триизмерна мрежа от микропори, съотношението Si/Al, както и съдържанието на компенсират катион. Добре дефинираните микропори определят свойствата на зеолитите като молекулни сита. Колкото съотношението Si / Al намалява, толкова повърхността става по-хидрофилна и са необходими повече катиони за компенсиране на отрицателните заряди, въведени от алуминия.



Фигура 2. Идеализирана структура на кристална решетка на зеолит (тетраедър)

Най-общо зеолитите се прилагат в следните основни направления:

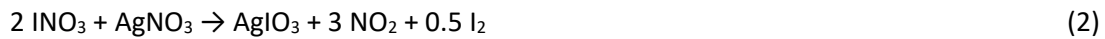
- Сушене, сепарация и пречистване за опазване на околната среда – пречистване на води, въздух и почви (премахване на замърсители като тежки метали, радиоактивни вещества и органични замърсители);
- За сушители на газови потоци;
- За обеззаразяване на почви (след аварията в Чернобил районите около централата са били обработвани и неутрализирани със зеолит (Клиноптилолит);
- В нефтодобивната промишленост – рафиниране на нефтени продукти, адсорбция на газове, пара и др.
- При обработка и съхранение на радиоактивни отпадъци;

Най-широко изучавани са зеолитите, съдържащи метали в различни форми, като това най-често са вещества, съдържащи сребро, поради добре известният афинитет на среброто към йода. Изследвани са импрегнирани със сребро зеолити или материали, съдържащи алуминий. Те проявяват следните основни характеристики (МААЕ 1987):

- Ефективно задържане на молекулярен и органичен йод;
- Голям капацитет;
- Незапалимост;

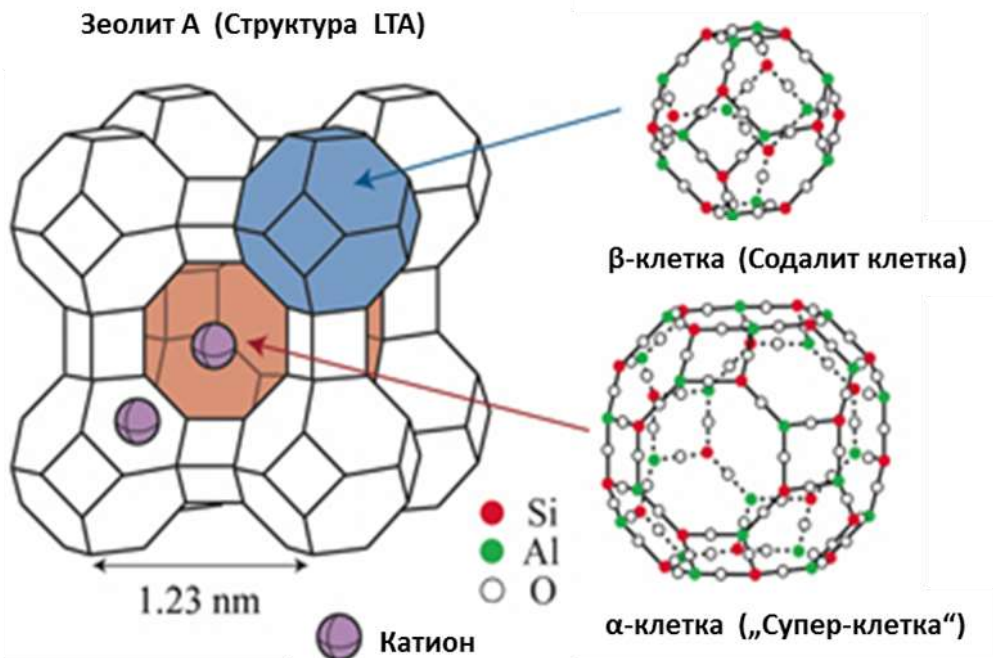
Основният недостатък на тези материали е високата цена на среброто, което налага редица проучвания за определяне ефективността му.

Твърди адсорбенти, съдържащи сребро под формата на сребърен нитрат, са показали успешно задържане на йодни молекули от преработка на горивни потоци. Сребърният нитрат реагира с йода по следните реакции:



Обект на изследване в Европа, САЩ, и Япония е разработването на различни видове сребърни зеолити за отстраняване на йод.

Импрегнирани със сребро зеолити от тип X, Mordenite са задълбочено изследвани като адсорбенти на радиоактивен йод, ксенон, криптон и др., поради радиационната им стабилност, термична устойчивост и негоримост, висок адсорбционен капацитет при повишени температури. Търговски марки импрегнирани със сребро зеолити, приложими в системи за овладяване на след инцидентни радиоактивни изпускания, са AGX на HI-Q Environmental Products Company, Inc., Ionex-type Ag 400/900, C*CHEM, RADēCO™ Model GY-130. Те представляват гранулирани адсорбенти от синтетични зеолити, които са третирани за замяна на натриевите йони от структурата им със сребърни (Silver – Exchanged Molecular Sieves). Сребърните зеолити се характеризират с много по – дълъг експлоатационен период, в съпоставка с импрегнирания активен въглерод и са приложими в деконтаминиращи системи с дълги работни периоди за акумулиране на висока радиоактивност. При прилагане на сребърни зеолити за улавяне на радиоактивен йод – 129, част от радиоактивния йод се адсорбира физично, а друга взаимодейства с молекулното сито до неразтворимия сребърен йодид (AgI), който се внедрява в кристалната решетка на зеолита. Продължителната операционна способност на сребърните зеолити се обуславя от екстремно голямата специфична повърхност на молекулното сито за задържане на продукта от взаимодействието между среброто от матрицата и радиоактивния йод, особено при зеолитите с висока порьозност, характеризиращи се с т.нар. „супер – клетки“ (Фигура 3).



Фигура 3. „Супер – клетки“

Механизмът на адсорбция на йод – 129 от зеолит тип Mordenite е представен на Фигура 4.



Фигура 4. Механизъм на адсорбция на йод – 129 от Mordenite

След йонообмена, сребърните йони (Ag^+) се трансформират чрез редукция с водород до метално сребро (Ag^0), което взаимодейства с йод – 129 до формиране на AgI в две модификации гама – фаза ($\gamma\text{-AgI}$), която е с по – голям размер на кристалите и се задържа върху повърхността на зеолита и алфа – фаза ($\alpha\text{-AgI}$), която е с по – малък размер и остава в порите на зеолита. При този механизъм на улавяне на радиоактивен йод, от съществено значение са както специфичната повърхност, така и размера на порите на материала на матрицата (молекулното сито).

Физичните свойства на сребърен зеолит Ag – 400 са представени в Таблица 1, а адсорбционните капацитети на различни адсорбенти по отношение на I_2 са обобщени в Таблица 2.

Таблица 1. Физични свойства на сребърен зеолит Ag – 400

Номинален размер на порите:	7.4 Å в „супер – клетките”, 2.2 Å β – структурни единици
Топлина на адсорбция:	4186.8 kJ/kg
Равновесен влагозадържащ капацитет:	20 wt%
Степен на Ag-йонообмен:	98 %
Запалимост:	Незапалим
Термична стабилност:	Ефективна адсорбция до 500 °C
Плътност:	1.00 g/cm ³

Таблица 2. Адсорбционни капацитети на различни адсорбенти по отношение на I_2

Адсорбент	Температура на адсорбция, °C	Капацитет на адсорбция, mg I_2 /g	Деконтаминационен фактор	НОх устойчивост
Активен въглен	<120	-	$10 - 10^3$	неустойчив
Макроретикуларна смола	< 50	200 - 1000	$10^3 - 10^4$	висока
AgA - импрегниран със сребро алуминий	~ 150	100 - 235	$10^2 - 10^3$	висока
АС-6120 - импрегниран със сребро силикатен гел	~ 130	~ 135	$10^2 - 10^5$	висока
AgX - сребърен faujasite	~ 150	80 - 200	$10^2 - 10^5$	висока
AgZ - сребърен mordenite	~ 150	~ 170	$10^2 - 10^5$	висока
Ag ^o Z - сребърен mordenite	~ 150	~ 170	$10^2 - 10^5$	висока

На изследване е подложен комерсиален зеолит X със структура FAU (Faujasite).

За целите на настоящото изследване е използвана система за измерване на повърхностните характеристики на твърди материали TriSTAR II 3020, Micromeritics, инсталирана в лабораторията по „Системи и устройства за опазване на околната среда в топлоенергийни обекти" при ТУ-София.

Принципът на измерване на повърхностните характеристики на твърдофазни вещества чрез физична адсорбция в статични условия е демонстриран на Фигура 5.

Последователността на измерването включва следните етапи:

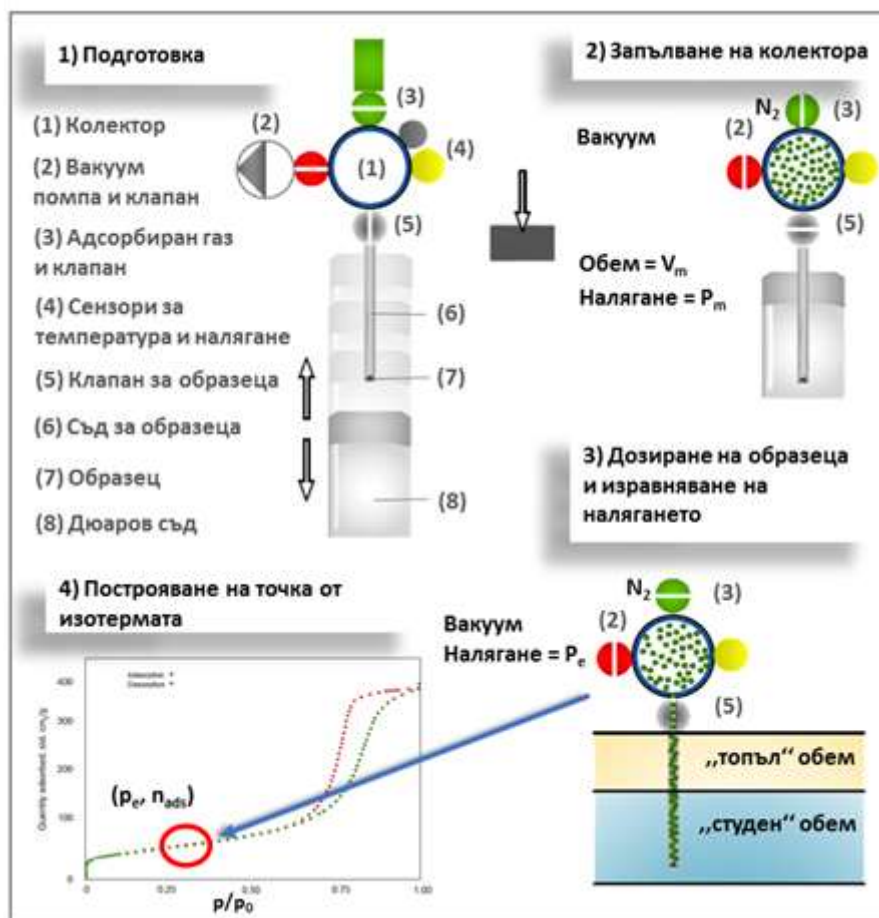
Етап 1: Подготовка на апарата за експеримент- вакуумиране на образеца:

- Клапан (3) на работния газ е затворен.
- Клапани (2) и (7) са отворени за осигуряване на вакуум в колектора и съда за пробата. Съдът за пробата е при атмосферна температура.
- При достигане на необходимия вакуум, клапани (2) и (7) се затварят, Дюаровият съд се издига и охлажда образеца до температура за анализ (77K).

Етап 2: Запълване на колектора с газ за анализ (азот). Осъществява се според уравнението на състоянието: $n_mRT=P_mV_m$

Етап 3: Дозирание на газ за анализ в образеца и построяване на точка от изотермата:

- Налягането се следи, докато достигне равновесна стойност и се записва в системата за мониторинг (p_e – равновесно налягане).
- При измерване на p_e се построява точка от изотермата с координати (p_e, n_{ads}) , където n_{ads} е количеството адсорбиран от образеца газ.
- Клапан (7) се затваря, (3) се отваря и колектора се запълва при леко повишено налягане, след което процесът на дозирание и уравнивяване на налягането се повтаря, като се построяват и останалите точки от изотермата.
- Този цикъл продължава, докато налягането на газа за анализ се доближи до налягането му на насищане при съответната температура (77K).



Фигура 5. Принцип на измерване на повърхностните характеристики на твърдофазни вещества чрез физична адсорбция в статични условия

Построени са експериментални изотерми на адсорбция и десорбция на изследвания образец. Чрез прилагане на модела Brunauer-Emmett-Teller (BET) е изчислена специфичната му повърхност, а чрез прилагане на Barrett-Joyner-Halenda (BJH) – метод е определено разпределението на порите по размер.

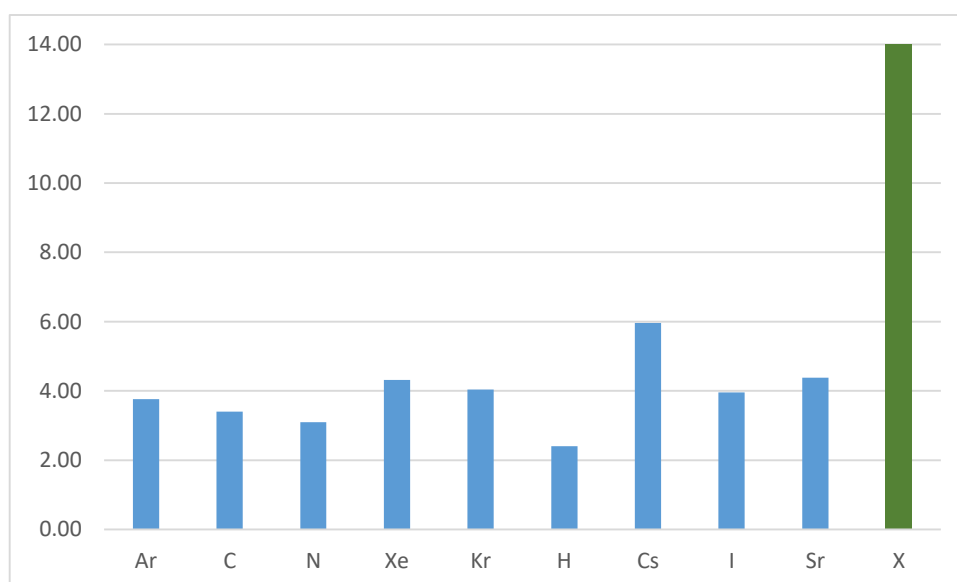
Експерименталните резултати от измерването на специфичната повърхност и порьозността на Образец X са обобщени в Таблица 3.

Таблица 3. Експериментални резултати

Образец	$S_{\text{ВЕТ}}$, m^2/g	S_{micro} , m^2/g	V_{total} , cm^3/g	V_{micro} , cm^3/g	V_{meso} , cm^3/g	d_{micro} , Å	d_{meso} , Å
X	792.123 ± 1.5282	733.248	0.320	0.275	0.048	14.22	33.941

В системата за спецгазоочистка като адсорбент се използва активен въглен ВСК – 5. По данни на производителя температурата, при която се топи е $300\text{ }^\circ\text{C}$. Възпламенява се при температури над $400 - 450\text{ }^\circ\text{C}$. За разлика от него зеолит X не се възпламенява и би могъл да се разтопи при температури над $1000\text{ }^\circ\text{C}$.

На Фигура 6 е направено сравнение между диаметъра на молекулите на някои, газове, които преминават през системата за спецгазоочистка и диаметъра на порите на зеолит X.



Фигура 6. Съпоставка на измерения диаметър на микропорите при образец X и диаметъра на молекулите на радиоактивни газови компоненти

Получените резултати са предпоставка за приложимостта на тези материали като адсорбенти в системата за спецгазоочистка на ЯЕЦ за улавяне на генерираните газообразни радиоактивни замърсители.

Изводи

Въпреки високия адсорбционен капацитет на макропоретичните смоли по отношение на йода, те не са подходящи адсорбенти, тъй като ефективността на адсорбцията намалява при сравнително ниски температури.

От гледна точка на пожаробезопасността зеолитите са по – добри адсорбенти от активния въглен, тъй като имат по – високи температури на топене, не съдържат органични вещества и не са запалими.

В литературата са налични данни за прилагане на сребърни зеолити като адсорбенти на радиоактивен йод, ксенон, криптон и др., поради радиационната им стабилност, термична устойчивост и негоримост, висок адсорбционен капацитет при повишени температури.

Сребърните зеолити се характеризират с много по – дълъг експлоатационен период, в съпоставка с импрегнирания активен въглерод и са приложими в деконтаминиращи системи с дълги работни периоди за акумулиране на висока радиоактивност.

Зеолитите са намерили приложение в първата степен на специализирането в ядрените централи като изсушители.

На следващи изследвания ще бъдат подложени зеолити със структура FAU и сребърни зеолити и приложението им като адсорбенти в системата за специализирана на вода – водните реактори за постигане на максимално ефективен процес.

Използвана литература

Jun Izumi, Waste Gas Treatment Using Zeolites in Nuclear-Related Industries, Handbook of Zeolite Science and Technology

Daryl R. Haefner, Troy J. Tranter, Methods of Gas Phase Capture of Iodine from Fuel Reprocessing Off-Gas: A Literature Survey, INL/EXT-07-12299, 2007

Rouquerol F., Rouquerol J., Sing K., Adsorption by powders and porous solids, Academic press London, ISBN 0-12-598920-2, 1999

Пенчев В., Молекулни сита- зеолити, Наука и изкуство, 1973

И.Н.Бекман, СИСТЕМЫ ОЧИСТКИ ВЫБРОСОВ АЭС, ЯДЕРНАЯ ИНДУСТРИЯ, Москва, 2005

Инструкция по експлоатация на система специализирана на вода 35.РО.ТС20.ИЕ.32/5