

ЗАЙЦЕВ СЕРГІЙ

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>e-mail: sdjavdet@ukr.net

КИШНЕВСЬКИЙ ВІКТОР

Національний університет «Одеська політехніка»

<https://orcid.org/0000-0003-1780-2969>e-mail: kishnevskiy@op.edu.ua

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ АДСОРБЕНТУ ДЛЯ ОЧИЩЕННЯ ВОДНЮ ТУРБОГЕНЕРАТОРА АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

В статті наведено результати удосконалення методу контролю якості адсорбенту для очищення водню турбогенератора АЕС. Метою роботи є підвищення надійності експлуатації адсорбентів у фільтрах очищення потоків водню в оливонаповненому турбогенераторі з водневим охолодженням АЕС шляхом контролю якості адсорбентів типу «вуглецевий волокнистий матеріал (ВВМ)» під час визначення їхнього аеродинамічного опору в потоці водню та величин адсорбції адсорбентів типу ВВМ стандартизованої речовини (пару бензолу) в потоці водню. Об'єкт досліджень: методи контролю якості адсорбенту для очищення водню турбогенератора з водневим охолодженням у структурі атомної електростанції. Предмети досліджень: промислові ВВМ марок УУТ-2, АНМ, АМТ, УРАЛ-Т-5. Отримані наступні результати: удосконалено структурну схему установки для визначення значень аеродинамічного опору адсорбентів за різних лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані адсорбенти типу ВВМ; визначено значення аеродинамічного опору шарів ВВМ за різних кількостей їх шарів і лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані ВВМ; досліджено величини адсорбції парів бензолу адсорбентами типу ВВМ у потоці водню за різних концентрацій парів бензолу; розроблено рекомендації щодо розміщення очисних фільтрів у потоках водню в турбогенераторі з водневим охолодженням. Отримані результати можна використати для удосконалення елементів системи діагностування показників якості адсорбенту для очищення водню турбогенератора з водневим охолодженням у структурі АЕС.

Ключові слова: вуглецевий волокнистий матеріал, водень, адсорбція, турбогенератор, аеродинамічний опір, піроліз.

ZAITSEV SERHII, KISHNEVSKY VICTOR

Odessa Polytechnic National University

IMPROVEMENT OF THE METHOD OF QUALITY CONTROL OF THE ADSORBENT FOR HYDROGEN PURIFICATION OF A NUCLEAR POWER PLANT TURBINE GENERATOR

The article presents the results of improving the method of quality control of an adsorbent for hydrogen purification of a NPP turbine generator. The aim of the work is to improve the reliability of adsorbents in hydrogen purification filters in an oil-filled hydrogen-cooled NPP turbine generator by controlling the quality of carbon fibre adsorbents (CFM) during the determination of their aerodynamic resistance in the hydrogen flow and the adsorption of a standardised substance (benzene vapour) by CFM adsorbents in the hydrogen flow. Object of research: methods of quality control of the adsorbent for hydrogen purification of a hydrogen-cooled turbine generator in the structure of a nuclear power plant. Subjects of research: industrial CFM of UUT-2, ANM, AMT, URAL-T-5 brands. The following results were obtained: the structural diagram of the installation for determining the values of aerodynamic resistance of adsorbents at different linear velocities of hydrogen at the inlet to the studied adsorbents of the CFM type was improved; the values of aerodynamic resistance of CFM layers at different numbers of their layers and linear velocities of hydrogen at the inlet to the studied CFM were determined; the adsorption of benzene vapours by CFM type adsorbents in a hydrogen stream at different concentrations of benzene vapours was investigated; recommendations for the placement of purification filters in hydrogen streams in a hydrogen-cooled turbine generator were developed. The results obtained can be used to improve the elements of the system for diagnosing the quality of adsorbent for hydrogen purification of a hydrogen-cooled turbine generator in the structure of a nuclear power plant.

Key words: carbon fibre material, hydrogen, adsorption, turbine generator, aerodynamic drag, pyrolysis.

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими чи практичними завданнями

У процесі експлуатації оливонаповненого обладнання АЕС утворюються газоподібні викиди, що містять різні домішки, і такі викиди необхідно виводити в навколишню атмосферу після відповідного очищення з використанням різних адсорбентів (активованого вугілля, силікагелів, алюмогелів, цеолітів) у спеціальних фільтрах [1]. Також необхідно очищати потік водню від домішок турбінної оливи перед фреоновою холодильною установкою під час експлуатації турбогенератора з водневим охолодженням АЕС [2]. Контроль якості адсорбентів перед їх завантаженням в адсорбційні фільтри і в процесі їх експлуатації є необхідною умовою надійної роботи систем очищення газових потоків у оливонаповненому обладнанні АЕС [2]. Одними з основних видів контролю якості цих адсорбентів є визначення аеродинамічного опору адсорбентів газоподібному потоку та адсорбційної здатності адсорбентів за домішками стандартизованої речовини – парів бензолу [3]. Постійне поліпшення якостей адсорбентів і виготовлення їхніх різних марок вимагає вдосконалення схем і конструкцій установок для визначення: аеродинамічного опору адсорбентів газоподібному потоку; адсорбційної здатності адсорбентів.

Таким чином, необхідні проведення досліджень для удосконалення методів контролю якості адсорбентів для фільтрів очищення потоків водню в турбогенераторі з водневим охолодженням АЕС, що дасть змогу: підвищити надійність експлуатації адсорбентів, наприклад перспективних вуглецевих волокнистих матеріалів типу (ВВМ), у фільтрах очищення газоподібних потоків водню в цьому обладнанні; вдосконалити установки для контролю якості адсорбентів та дослідження величини адсорбції парів бензолу адсорбентами типу ВВМ в потоці водню; розробити установки для зниження шкідливих газоподібних викидів в атмосферу з маслоснаповненого турбогенератора з водневим охолодженням АЕС.

Аналіз останніх досліджень і публікацій

На блоках АЕС України використовують турбогенератори [4]: ТВВ-220-2У3; ТВВ-2000-2У3; ТВВ-1000-2У3; ТВВ-1000-4У3 з воднево-водним охолодженням. Так, для турбогенератора типу ТВВ-1000-2У3 використовують водень із чистотою не менш як 98 % об'ємних, із вмістом кисню не більш як 1,2 % об'ємних і відносною вологістю (за температури +40 °С) не більш як 20 % [5]. В роботі [6]: а) показано, що самим ненадійним елементом у технологічному ланцюжку «реактор – турбіна – турбогенератор – трансформатор» на сьогодні є турбогенератор; однією з основних причин аварійних зупинок та руйнувань турбогенераторів, синхронних компенсаторів та електричних машин великої потужності, що охолоджуються газами, зокрема ізобарним воднем як у нашій країні, так і за кордоном, є інтенсивне забруднення водню вологою з вмістом домішок кисню та турбінної оливи; б) розглянуто вплив вологості та чистоти водню на надійність та енергоефективність потужних електричних машин. Складено перелік можливих домішок, що мають можливість потрапити до корпусу турбогенератора, показано їхній вплив на чистоту газу та сумарні механічні втрати. Проведено аналіз впливу параметрів чистоти водню на механічні втрати в турбогенераторі з безпосереднім водневим охолодженням. Розглянуто можливість використання металогідридів для забезпечення чистоти, очищення та сорбції водню; в) показано, що газовий об'єм водню в турбогенераторах в Україні може бути від 56 м³ до 160 м³ [6]. У роботі [7] показано: найбільша частка в причинах недовиробітку електроенергії через електротехнічне обладнання припадає на турбогенератори (до 70–80 %); для компенсації зниження надійності впроваджуються системи та засоби контролю й діагностики основних вузлів турбогенератора, основне призначення яких – раннє виявлення прогресуючих відхилень у роботі вузлів і допоміжних систем, що можуть спричинити вимушені відключення турбогенератора від мережі й серйозні втрати, а також своєчасне усунення цих відхилень, наприклад при проведенні планово-попереджувального ремонту; приблизно 15–20 % відмов турбогенераторів із водневим охолодженням спричиняються порушеннями у роботі елементів газової системи й оливних ущільнень з їхньою системою оливозабезпечення, зокрема порушень газощільності. В роботі [8] проведено численні обчислювальні експерименти по визначенню локальних перегрівів в обмотці та осерді статора турбогенератора при наявності термодфектів. Розроблено рекомендації щодо підвищення безпеки, надійності та ефективності експлуатації турбогенераторів типу ТВВ-1000-2 блоків АЕС України. У роботі [9] викладено принципи виявлення місцевих перегрівів в турбогенераторах із газовим охолодженням. Ці принципи засновані на виділенні продуктів піролізу електроізоляції та шляхи виявлення дефектів термічного характеру в турбогенераторах на основі результатів визначення концентрацій продуктів піролізу у вигляді їхніх аерозолів у потоках охолоджувальних газів, зокрема в потоці водню, з використанням методів газової хроматографії, мас-спектрографії, іонізаційних камер. У роботах [10, 11] показано: 1) електроізоляційні матеріали, що використовуються в конструкціях турбогенераторів великої потужності, загалом мають схожі характеристики. До їхнього складу входять органічні полімери природного (бітум), а частіше штучного походження (епоксидні смоли). Крім того, для поліпшення механічних і електроізоляційних властивостей застосовують такі матеріали, як скловолокно і слюда; 2) нагрівання веде до хімічного розкладання органічних речовин у складі електроізоляційних матеріалів. Утворені при цьому частинки надходять у потік водню, що циркулює в системі охолодження турбогенератора. Способи виявлення перегріву у вузлах генератора загалом ґрунтуються на використанні пристроїв, що дають змогу виявляти продукти теплового руйнування електроізоляційних матеріалів; 3) хімічний розклад електроізоляційних матеріалів починається під час нагрівання до температур понад 180 °С (після досягнення температури початку виділення продуктів піролізу). Нагрівання електроізоляційних матеріалів у вузлах турбогенератора веде до підвищення концентрації мікроскопічних частинок продуктів піролізу. Після припинення виділення продуктів піролізу у зв'язку з припиненням нагріву або повним вигоранням електроізоляційних матеріалів концентрація аерозольних частинок починає знижуватися під дією процесів випаровування, коагуляції та осадження [10, 11]. У роботі [12] показано, що для забезпечення пожежо- та вибухобезпеки турбогенераторів під час їхньої експлуатації є необхідність форсованого викиду водню високого тиску в атмосферу з корпусу турбогенератора в аварійних ситуаціях для зниження ризику вибуху повітряно-водневої суміші та унеможливлення загоряння водню. Для розв'язання цієї проблеми розроблено систему, що забезпечує безпечний форсований викид водню в разі раптової аварії на турбогенераторі. Для цього у верхній частині корпусу турбогенератора передбачено встановлення герметичного фланця, до якого приєднується спеціальна система аварійного викиду водню. Система складається з трубопроводів, швидкодіючих клапанів з електроприводами, контрольно-вимірювальних приладів і органів управління. У нормальному стані, коли турбогенератор працює в штатному режимі, клапани з електроприводом закриті, протікання водню не повинно бути. У разі аварійної ситуації подається команда на відкриття клапанів: клапани відкриваються, і йде скидання водню в атмосферу до встановленого нормативним документом тиску водню, потім клапани

закриваються і починається заміна водню в турбогенераторі на інертний газ [12]. У роботі [2] показано газову систему водневого охолодження турбогенератора, що містить, зокрема: теплообмінники охолодження потоку водню типу «охолоджуваний водень – охолоджувальна вода», фреонову холодильну установку для виморожування водяних парів із потоку водню, газові колектори, арматуру, трубопроводи, прилади контролю та сигналізації, ресивери для водню та інертного газу, балони для водню, азоту або вуглекислоти; виконано опис роботи цієї газової схеми в аварійному режимі, зокрема з форсованим скиданням водню з турбогенератора в атмосферу. У роботі [13] запропоновано методику експериментального дослідження ізотерм адсорбції стандартизованої речовини – парів бензолу гідрофобними матеріалами – вуглецевими адсорбентами, заснована на застосуванні відомого ексікаторного методу. Показано спрощений підхід до вимірювання відносного тиску сорбату. Проведено порівняння результатів визначення адсорбційної активності пропонованим способом з даними, отриманими ваговим методом [13]. У роботі [14] показано результати вдосконалення установки для визначення в потоці газоподібного азоту (повітря) значень аеродинамічного опору адсорбентів за $T=293\text{ K}$ і за лінійних швидкостей повітря (азоту) до 310 см/с на вході в адсорбенти за відносної вологості до 95% і вмісту домішок (H_2O , N_2 , O_2 , Ar , CO , CH_4 , CO_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_2H_2 , C_3H_6 , C_3H_8 , C_4H_8 , C_4H_{10} , CH_3J , Kr , Xe) від $5 \cdot 10^{-4}\%$ об'ємних і вище, а також для визначення адсорбційної здатності адсорбентів для цих домішок. Вуглецеві волокнисті матеріали (ВВМ) є одними з перспективних адсорбційних матеріалів для очищення газоподібних потоків від парів органічних речовин, зокрема від парів мінеральних олій [15, 16]. Так, у роботі [16] описано експериментальний стенд і методику визначення аеродинамічного опору шару адсорбенту; визначено залежність величини перепаду тиску на макетах адсорберів різної конструкції, заповнених різними адсорбентами, від величини витрати повітря; вивчено торф'яне вугілля СКТ-3 і СКТ-4, активні антрацити типу «Ақдан» трьох модифікацій українського виробництва, активовані вуглецеві волокнисті матеріали АУВМ «Днепр» і марки NaX українського виробництва; запропоновано методику оперативного визначення аеродинамічного опору шару адсорбенту, що є необхідною під час робіт із відновлення адсорбційних фільтрів АУ-1500 на АЕС.

Формулювання цілей статті

Метою роботи є підвищення надійності експлуатації адсорбентів у фільтрах очищення потоків водню в оливнонаповненому турбогенераторі з водневим охолодженням АЕС шляхом контролю якості адсорбентів типу «вуглецевий волокнистий матеріал (ВВМ)» під час визначення їхнього аеродинамічного опору в потоці водню та величин адсорбції адсорбентів типу ВВМ стандартизованої речовини (пару бензолу) в потоці водню. **Завданнями роботи** є: 1. Удосконалення структурної схеми установки для визначення значень аеродинамічного опору адсорбентів за різних лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані адсорбенти типу ВВМ. 2. Визначення значень аеродинамічного опору шарів ВВМ за різних кількостей їх шарів і лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані ВВМ. 3. Дослідження величин адсорбції парів бензолу адсорбентами типу ВВМ у потоці водню за різних концентрацій парів бензолу. 4. Розробка рекомендацій щодо розміщення очисних фільтрів в потоках водню в турбогенераторі з водневим охолодженням.

Виклад основного матеріалу

Об'єкт досліджень: методи контролю якості адсорбенту для очищення водню турбогенератора з водневим охолодженням у структурі атомної електростанції. Предмети досліджень: промислові ВВМ марок УУТ-2, АНМ, АМТ, УРАЛ-Т-5.

Товщини одного шару досліджених ВВМ мали значення: УУТ-2 – $0,6\text{ мм}$; АНМ – $2,3\text{ мм}$; АМТ – $1,15\text{ мм}$; УРАЛ-Т-5 – $0,6\text{ мм}$. Вимірювання виконано за температури $T_0=293\text{ K}$. Лінійна швидкість (u) потоку водню (значення вмісту парів води у водні не більше $X_1=0,16\text{ г/м}^3$) на вході в перший шар ВВМ мала значення в інтервалі $u=0,83\text{--}310\text{ см/с}$. Під час виконання вимірювань використано мікроманометр ММН-2400 і реометри скляні типів РДС або РКС. При визначенні аеродинамічного опору ΔP шарами ВВМ абсолютна величина похибки результату не перевищує 2 Па за перепаду тиску до 600 Па , і 8 Па за перепаду тиску до 2400 Па . При тисках вище 2400 Па для вимірювань використані зразкові манометри класів точності $0,15$. Як джерела потоків водню використано електрохімічний генератор чистого водню типу «Н2box-AERO» з продуктивністю по водню до $250\text{ дм}^3/\text{год}$, або балон з воднем і газовим редуктором. При дослідженні величин адсорбції парів бензолу в потоці водню: маса ВВМ перебувала в інтервалі $1,5\text{--}2,0\text{ г}$; використано установку для визначення значення аеродинамічного опору та адсорбційних характеристик шарів ВВМ за різних кількостей шарів та лінійних швидкостей водню на вході в фільтрувальний елемент, аналогічну до представленої в роботі [14]. Концентрацію парів бензолу в потоці водню виміряно за допомогою газового хроматографа «Крисал-2000М» з полум'яно-іонізаційним детектором за методикою [17].

1. Удосконалення структурної схеми установки для визначення значень аеродинамічного опору адсорбентів за різних лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані адсорбенти типу ВВМ.

На рисунку 1 представлено вдосконалену структурну схему установки для визначення значення аеродинамічного опору (ΔP) для ВВМ за різних кількостей його шарів (n) і лінійних швидкостей (u) водню на вході у фільтрувальний елемент із досліджуванним ВВМ за [18].

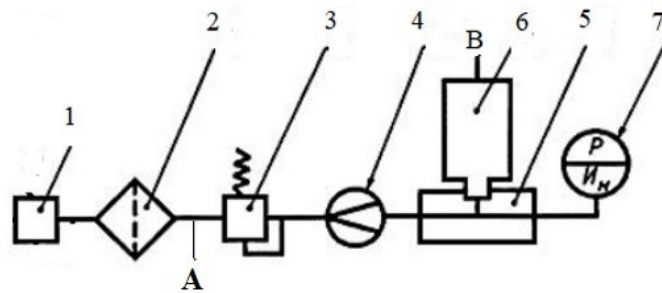


Рис. 1. Структурна схема установки для визначення значення аеродинамічного опору ΔP шарів ВВМ за різних кількостей його шарів і лінійних швидкостей водню на вході в ВВМ: 1 – генератор водню або балон із воднем і з редуктором; 2 – адсорбційний фільтр-осушувач; 3 – регулятор тиску; 4 – витратомір; 5 – затискач; 6 – фільтрувальний елемент із досліджуваним ВВМ; 7 – вимірювач різниці тиску потоку водню; А – потік водню для аналізу на вміст у ньому CO_2 , H_2O , домішок органічного характеру; В – вихід потоку водню з фільтрувального елемента із досліджуваним ВВМ

2. Визначення значень аеродинамічного опору шарів ВВМ за різних кількостей їх шарів і лінійних швидкостей водню на вході в досліджувані ВВМ. У таблиці 1 наведено виміряні значення аеродинамічного опору (ΔP) шарів ВВМ за різних кількостей шарів (n) для ВВМ і лінійних швидкостей газоподібного водню (u) на вході до фільтрувального елемента з досліджуваним ВВМ.

Таблиця 1

Аеродинамічний опір шарів ВВМ за різних кількостей його шарів і лінійних швидкостей газоподібного водню на вході у фільтрувальний елемент із досліджуваним ВВМ

u , см/с	УУТ-2			АНМ			АМТ			УРАЛ-Т-5		
	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=1$	$n=2$	$n=3$	$n=1$	$n=2$	$n=3$
Аеродинамічний спротив, ΔP , Па												
0,80	2,5	4	6	-	-	-	-	4	8	-	3	7,5
2,0	8	14	24	2	3,5	5	4	11	24	4,2	10	23
4,0	26	38	73	4,5	8	11	8	26	58	11	27	58
6,0	44	68	123	6,5	11	17	13	42	95	20	46	100
8,0	62	105	210	9	16	26	18	60	135	30	70	145
10,0	90	160	275	10	21	32	23	78	178	41	95	195
12,0	120	190	360	13	24	39	29	98	223	53	120	248
14,0	150	265	460	15	29	45	35	120	273	75	150	305
16,0	169	290	578	18,5	35	54	41	138	320	79	178	362
18,0	219	342	725	20	38	65	47	159	370	93	210	425
20,0	247	396	820	23	44	70	53	176	423	108	242	487
21,0	273	458	895	24	49	76	56	186	450	115	259	519
30,0	433	801	1665	35	68	115	88	286	700	191	423	832
40,0	673	1123	2386	49	100	160	123	403	1006	287	629	1216
60,0	1119	2317	4795	73	150	258	201	656	1670	507	1098	2080
80,0	1653	3356	7235	89	229	360	284	925	2390	760	1631	3040
100	2420	4399	10270	125	272	470	371	1210	3163	1041	2215	4085
120	3203	5833	14670	151	355	580	463	1505	3970	1345	2850	5195
140	3719	7417	17056	161	381	698	567	1810	4815	1670	3523	6370
160	4519	9426	21030	193	496	810	654	2130	5690	2018	4235	7600
180	5608	10898	26900	237	529	935	753	2450	6595	2382	4980	8885
200	6529	13539	29860	240	644	1050	850	2780	7520	2760	5755	10210
220	7472	15150	38735	266	685	1180	950	3120	8470	3160	6560	11580
240	7954	17765	40600	316	709	1310	1063	3460	9445	3570	7400	13000
260	9014	18350	47950	337	841	1425	1170	3810	10440	3995	8255	14450
280	10760	20833	51175	365	855	1590	1280	4165	11450	4435	9145	15930
310	13175	25255	64465	388	1046	1775	1445	4700	13000	5120	10520	18250

За лінійних швидкостей потоку водню на вході в перший шар ВВМ від 0,8 см/с до 310 см/с механічний розрив досліджених ВВМ був відсутній, що дає змогу проектувати адсорбери із застосуванням досліджених ВВМ за лінійної швидкості потоку водню на вході в перший шар ВВМ до 310 см/с.

На рисунку 2 представлено залежність аеродинамічного опору для трьох шарів ВВМ марки УУТ-2 від лінійних швидкостей газоподібного водню на вході у фільтрувальний елемент із досліджуваним ВВМ.

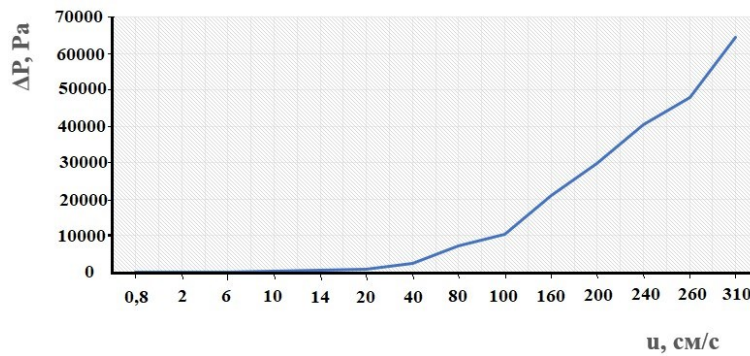


Рис. 2. Залежність аеродинамічного опору ΔP , Pa, для трьох шарів ВВМ марки УУТ-2 від лінійних швидкостей водню, u , см/с, на вході в перший шар УВМ

З таблиці 1 та з урахуванням результатів, показаних на рисунку 2, впливає, що: за постійних значень (n) для шарів ВВМ залежність між аеродинамічними опорами (ΔP) та лінійними швидкостями (u) потоку водню на вході до шару ВВМ є нелінійною; за постійних, але різних лінійних швидкостях (u) потоків водню на вході до шару ВВМ, відсутня лінійна залежність між аеродинамічним опором (ΔP) та числом шарів (n) для ВВМ. Це вимагає при проектуванні адсорбційних фільтрів із застосуванням досліджених УВМ виконувати попередні експериментальні дослідження для вибору відповідного ВВМ; за лінійної швидкості потоку водню на вході до шару ВВМ до 310 см/с механічний розрив досліджених ВВМ був відсутній, що дає змогу проектувати адсорбери із застосуванням досліджених ВВМ за лінійної швидкості потоку водню на вході до шару ВВМ до 310 см/с.

3. Дослідження величин адсорбції парів бензолу адсорбентами типу ВВМ у потоці водню за різних концентрацій парів бензолу. У таблиці 2 наведено результати дослідження величин адсорбції стандартизованої речовини, що адсорбується – парів бензолу – залежно від його концентрації в потоці водню при температурі 20 °C (293 K) на адсорбентах типу ВВМ марок УУТ-2, АНМ, АМТ, УРАЛ-Т-5.

Таблиця 2

Результати дослідження величин адсорбції парів бензолу залежно від його концентрації у водні при температурі 293 K

№	P_1/P_s	C_i , г/м ³	АНМ		УРАЛ-Т-5		УУТ-2		АМТ	
			M_1/M_2	A_i , ммоль/г	M_1/M_2	A_i , ммоль/г	M_1/M_2	A_i , ммоль/г	M_1/M_2	A_i , ммоль/г
1	0,025	8	0,05	0,64	0,100	1,28	0,105	1,34	0,090	1,15
2	0,05	16	0,10	1,28	0,160	2,05	0,170	2,62	0,140	1,79
3	0,10	32	0,16	2,05	0,250	3,2	0,270	3,46	0,230	2,94
4	0,15	48	0,21	2,69	0,320	4,10	0,335	4,29	0,300	3,84
5	0,20	64	0,240	3,07	0,370	4,74	0,385	4,93	0,350	4,48
6	0,25	80	0,275	3,52	0,410	5,25	0,425	5,44	0,385	4,93
7	0,30	96	0,283	3,62	0,440	5,64	0,455	5,83	0,410	5,25
8	0,40	128	0,310	3,97	0,485	6,21	0,505	6,47	0,450	5,76
9	0,50	160	0,325	4,16	0,520	6,66	0,535	6,85	0,475	6,08
10	0,60	192	0,335	4,29	0,540	6,92	0,555	7,11	0,490	6,28
11	0,70	224	0,340	4,35	0,550	7,05	0,570	7,30	0,505	6,47
12	0,80	256	0,350	4,48	0,565	7,24	0,585	7,50	0,520	6,66
13	0,85	272	0,355	4,55	0,575	7,37	0,595	7,62	0,530	6,79
14	0,90	288	0,360	4,61	0,585	7,50	0,605	7,75	0,536	6,87
15	0,95	304	0,365	4,67	0,600	7,69	0,620	7,94	0,550	7,05
16	0,99	317	0,380	4,87	0,630	8,07	0,650	8,33	0,580	7,43

Примітки: P_1 – тиск пару бензолу, мм рт. ст.; P_s – тиск насиченого пару бензолу, мм рт. ст.; M_1 – маса адсорбованого бензолу, г; M_2 – маса адсорбенту, г; C_i – концентрація пару бензолу у водні, г/м³; A_0 – кількість адсорбованого бензолу (величина адсорбції), ммоль/г

З таблиці 2 впливає, що найбільшу здатність адсорбувати пароподібний бензол має ВВМ марки УУТ-2. На рис. 3 показано ізотерму адсорбції парів бензолу на ВВМ типу УУТ-2 із водню при температурі 293 K.

З рисунка 3 впливає, що ізотерма адсорбції парів бензолу ВВМ типу УУТ-2 належить до I типу ізотерм адсорбції парів речовин за класифікацією [3].

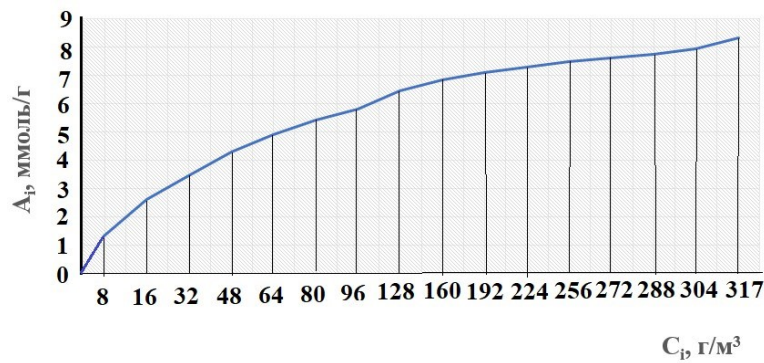


Рис. 3. Ізотерма адсорбції парів бензолу на ВВМ типу УУТ-2 із водню: C_i – концентрація пару бензолу у водні, г/м^3 ; A_i – кількість адсорбованого бензолу, ммоль/г

На рисунку 4 показано ізотеру адсорбції парів бензолу на ВВМ типу УУТ-2 з водню при температурі 293 К з використанням рівняння «Брунауера – Емметата – Теллера (БЕТ)» з урахуванням положень теорії полімолекулярної адсорбції речовини пористими адсорбентами [3] у вигляді:

$$P_i \cdot (P_s)^{-1} \cdot (A_0)^{-1} \cdot [1 - P_i \cdot (P_s)^{-1}]^{-1} = A + B \cdot P_i \cdot (P_s)^{-1}, \quad (1)$$

де: А та Б – розрахункові показники; A_0 – кількість адсорбованого бензолу (величина адсорбції), ммоль/г ; P_i – тиск пару бензолу, мм рт. ст. ; P_s – тиск насиченого пару бензолу, мм рт. ст.

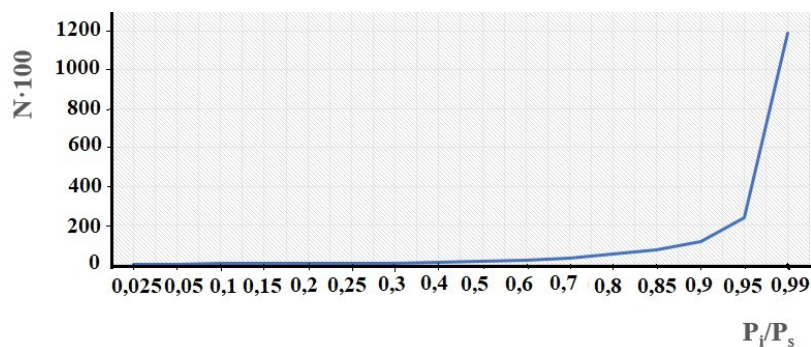


Рис. 4. Ізотерма адсорбції парів бензолу на ВВМ марки УУТ-2 з водню при температурі 293 К з використанням рівняння «Брунауера – Емметата – Теллера (БЕТ)»: $N = P_i \cdot (P_s)^{-1} \cdot (A_0)^{-1} \cdot [1 - P_i \cdot (P_s)^{-1}]^{-1}$ – розрахунковий показник; A_0 – кількість адсорбованого бензолу (величина адсорбції), ммоль/г ; P_i – тиск пару бензолу, мм рт. ст. ; P_s – тиск насиченого пару бензолу, мм рт. ст.

З рисунку 4 випливає, що рівняння (1), яке описує адсорбційну рівновагу, дотримується в інтервалі $P_i/P_s = 0,025 - 0,4$, що узгоджується з даними роботи [3].

На підставі отриманих результатів можна припустити, що під час адсорбції парів мінеральних турбінних олив адсорбентом типу ВВМ марки УУТ-2 з водню ізотери адсорбції в першому наближенні матимуть аналогічний вигляд, як і на рисунку 3 для адсорбції парів бензолу. Це може дозволити застосувати відоме рівняння «Дубініна-Радушкевича» для опису адсорбційної рівноваги під час адсорбції парів мінеральної турбінної оливи адсорбентом типу ВВМ марки УУТ-2 із водню [3]. Це своєю чергою дає змогу виконати орієнтовний розрахунок адсорбційного фільтра-поглинача парів мінеральної турбінної оливи адсорбентом типу ВВМ марки УУТ-2 з потоку водню за відомими методиками розрахунку [3].

4. Рекомендації щодо розміщення очисних фільтрів в потоках водню в турбогенераторі з водневим охолодженням. Адсорбційні фільтри, що включають в себе волокнистий аерозольний фільтр для очищення від аерозолів турбінної оливи, та ВВМ для адсорбційного очищення від парів турбінної оливи потоків водню, рекомендовано розміщувати в лінії: 1) скидання з турбогенератора потоку водню, який містить пари турбінної оливи та токсичні продукти піролізу електричної ізоляції електричної обмотки турбогенератора, в атмосферу або в газгольдер. Це забезпечує екологічну безпеку під час експлуатації турбогенератора з водневим охолодженням; 2) потоків водню перед їхнім надходженням у теплообмінник фреонової холодильної установки і в теплообмінник типу «охолоджувальна вода – охолоджуваний водень». Це запобігає незворотній конденсації речовин – парів турбінної оливи і продуктів піролізу електричної ізоляції електричної обмотки турбогенератора у відповідних теплообмінниках. Така необоротна конденсація речовин погіршує процеси теплообміну в теплообмінниках і потребує механічного очищення теплообмінних поверхонь та їхнього промивання спеціальними розчинниками.

Висновки з даного дослідження і перспективи подальших розвідок у даному напрямі

1. Удосконалена структурна схема установки для визначення значення аеродинамічного опору шарів ВВМ у потоці водню містить у собі: генератор водню або балон із воднем та з редуктором; адсорбційний фільтр-осушувач; регулятор тиску; витратомір; затискач; фільтрувальний елемент із досліджуванним ВВМ; вимірювач різниці тисків потоку водню; лінію виходу потоку водню з

фільтрувального елемента із досліджуваним ВВМ; лінію виходу потоку водню для аналізу на вміст у ньому CO_2 , парів H_2O , домішок органічного характеру.

2. Для ВВМ марок УУТ-2, АНМ, АМТ, УРАЛ-Т-5 за різних кількостей його шарів і лінійних швидкостей (u) потоку водню на вході до шару ВВМ встановлено, що: а) за постійних значень (n) для шарів ВВМ залежність між аеродинамічними опорами (ΔP) та лінійними швидкостями (u) потоку водню на вході до шару ВВМ є нелінійною; б) за постійних, але різних лінійних швидкостей (u) потоків водню на вході до шару ВВМ, відсутня лінійна залежність між аеродинамічним опором (ΔP) та числом шарів (n) для ВВМ.

3. Під час дослідження величин адсорбції пару бензолу з потоку водню при температурі 293 К на адсорбентах марок УУТ-2, АНМ, АМТ, УРАЛ-Т-5, встановлено, що: найбільшу здатність адсорбувати пароподібний бензол має ВВМ марки УУТ-2; рівняння, що описує адсорбційну рівновагу пару бензолу з урахуванням положень теорії полімолекулярної адсорбції речовини пористими адсорбентами, виконується в інтервалі $P_i/P_s = 0,025-0,4$.

4. Очисні фільтри в турбогенераторі з водневим охолодженням, що містять у собі волокнистий аерозольний фільтр і фільтр із ВВМ, рекомендовано розміщувати на лініях надходження потоків водню до теплообмінників фреонові холодильної установки; теплообмінників охолодження потоку водню типу «охолоджуваний водень – охолоджувальна вода»; атмосфери або газгольдеру.

5. Отримані результати можна використати для: удосконалення елементів системи діагностування показників якості адсорбенту для очищення водню турбогенератора з водневим охолодженням у структурі АЕС; підвищення надійності експлуатації адсорбентів у фільтрах очищення викидів потоків водню з оливнонаповненого обладнання і розроблення установки для зниження шкідливих газоподібних викидів в атмосферу з оливнонаповненого турбогенератора з водневим охолодженням АЕС.

Література

1. Ковальчук В.І., Козлов І.Л., Дорож О.А. Основи поводження з радіоактивними відходами на атомних електростанціях. Принципи, технології, обладнання. Одеса : Астропринт, 2020. 372 с.
2. РД 153-34.0-45.512-97. Типовая инструкция по эксплуатации системы водородного охлаждения генераторов. М. : НИИ АО «Электросила», 1997. 77 с.
3. Кельцев Н.В. Основы адсорбционной техники. М. : Химия, 1984. 592 с.
4. ГКД 34.20.507-2003. Технічна експлуатація електричних станцій і мереж. Правила. Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2003. 598 с.
5. Федоренко Г.М., Давидов О.М., Дудченко М.В. Моделювання впливів параметрів чистоти водню на механічні втрати в турбогенераторі з безпосереднім водневим охолодженням типу ТВВ-1000-2УЗ. Праці інституту електродинаміки НАН України. 2011. Вип. 28. С. 76–81.
6. Виговський О.В., Хвалін Д.І., Мистецький В.А. Вплив вологості та чистоти водню на надійність потужних електричних машин. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2017. Вип. 29. С.14–21.
7. Кенсичкий О.Г., Ключников О.О., Федоренко Г.М. Перспективний енергоблок підвищеної надійності, безпеки та енерго-екологічної ефективності. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2011. Вип. 16. С.27–36.
8. Ключников О.О., Федоренко Г.М., Виговський О.В. Прогнозування термодфектів в обмотці та осерді статора потужних турбогенераторів блоків аес та їхня локалізація за допомогою інтелектуальних методів і засобів. Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. 2011. Вип. 17. С.17–26.
9. Алексеев Б.А., Борозинец Б.В. Определение местных перегревов в турбогенераторах по продуктам пиролиза в охлаждающем газе. М. : НТФ «Энергопрогресс», 2000. 56 с.
10. Crobet, LP and Carson, CC (1969) Overheating Detector for Gas Cooled Electrical Machines. US Patent 342 7880.
11. Barton, S.C., Carson, C.C., Gill, R.S., Ligan, W.V. and Webb, J.L. (1981) Implementation of Pyrolysat Analysis of Material Employing Tagging Compounds to Locate an Overheated Area In a Generator. IEEE PES Summer Meeting, July
12. Яковлев Г.В., Стельмах С.Ф., Егоров Б.А. Проблема форсированного сброса водорода из корпуса статора турбогенератора. URL: <https://core.ac.uk/download/pdf>
13. Андриянцева С.А., Бондаренко А.В., Петухова Г.А. Экспресс-метод исследования изотермы адсорбции бензола углеродными гидрофобными материалами. Сорбционные и хроматографические процессы. 2012. Т. 12. Вып. 1. С. 114–118.
14. Zaitsev S., Kishnevsky V., Oborsky G., Tikhomirov A., Tikhenko V. Improvement of Quality Control Methods for Filters' Adsorbents in Purification of Gas Emissions of Nuclear Power Plants / Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes III Selected Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021), September 7–10, 2021, Odessa, Ukraine, Springer, Switzerland, 720 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_46
15. Ставицкая С.С., Гоба В.Е. Однороднопористые наноразмерные углеродные материалы аэрогелевого типа с молекулярно-ситовыми свойствами. Наносистемы, наноматериалы, нанотехнологии. 2009. Т. 7. № 3. С. 683–699.

16. Колобродов В.Г., Карнацевич Л.В., Березняк П.А., Хажмурадов М.А., Винокуров Э.И., Спицына В.И. Аэродинамическое сопротивление слоев некоторых адсорбентов. Вопросы атомной науки и техники. 2006. № 4. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (89). С. 224–227.
17. МУК 2613-82. Методические указания на газохроматографическое определение бензола, толуола, этилбензола и ксилолов в атмосферном воздухе. М. : ГСЭУ, 1982. 10 с.
18. ГОСТ 10188-74. Коробки фильтрующие к противогазам и респираторам. Метод определения сопротивления постоянному потоку воздуха. М. : ИПК Издательство Стандартов, 1975. 7 с.

References

1. V.I. Kovalchuk, Kozlov I.L., Dorozh O.A. Fundamentals of radioactive waste management at nuclear power plants. Principles, technologies, equipment. Odesa: Astroprint, 2020. 372 p.
2. RD 153-34.0-45.512-97. Standard instruction on operation of gas-oil system of hydrogen cooling of generators. – Moscow: Research Institute of JSC "Electrosila", 1997. 77 p.
3. Keltsev N.V. Fundamentals of adsorption technique. Moscow: Khimiya, 1984. 592 p.
4. GCD 34.20.507-2003. Technical operation of power plants and networks. Rules. Kyiv: OEP "GRIFRE": Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, 2003. 598 p.
5. Fedorenko G.M., Davydov O.M., Dudchenko M.V. Modelling the effects of hydrogen purity parameters on mechanical losses in a turbogenerator with direct hydrogen cooling of the TVV-1000-2UZ type. Proceedings of the Institute of Electrodynamics of the National Academy of Sciences of Ukraine. 2011. Issue 28. P. 76–81.
6. Vygovskiy O.V., Hvalin D.I., Mystetskiy V.A. Influence of moisture and hydrogen purity of the reliability of powerful electric machines. Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chernobyl. 2017. Issue 29. P. 14–21.
7. Kensitsky O.G., Klyuchnykov O.O., Fedorenko G.M. Perspective power unit of enhanceable reliability, safety and energy-ecological efficiency. Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chernobyl. 2011. Issue 16. P. 27–36.
8. Kliuchnikov O.O., Fedorenko G.M., Vygovsky O.V. Prediction of thermal defects in the winding and stator core of powerful turbine generators of nuclear power plants and their localisation using intelligent methods and tools. Problems of Safety of Nuclear Power Plants and Chernobyl. 2011. Issue 27. P. 17–26.
9. Alekseev B.A., Borozinets B.V. "Determination of local superheats in turbogenerators by pyrolysis products in the cooling gas". Moscow: NTF "Energoprogress". 2000. 56 p.
10. Crobel, LP and Carson, CC (1969) Overheating Detector for Gas Cooled Electrical Machines. US Patent 342 7880.
11. Barton, S.C., Carson, C.C., Gill, R.S., Ligan, W.V. and Webb, J.L. (1981) Implementation of Pyrolysate Analysis of Material Employing Tagging Compounds to Locate an Overheated Area In a Generator. IEEE PES Summer Meeting, July
12. Yakovlev G.V., Stelmakh C.F., Egorov B.A. "The Problem of Forced Hydrogen Discharge from the Turbogenerator Stator Case". URL: <https://core.ac.uk/download/pdf>
13. Andriyantseva S.A., Bondarenko A.V., Petukhova G.A. Express method for the study of the adsorption isotherm of benzene by carbon hydrophobic materials. Sorption and Chromatographic Processes. 2012. T. 12. Issue 1. P. 114–118.
14. S. Zaitsev, V. Kishnevsky, G. Oborsky, A. Tikhomirov, V. Tikhenko. Improvement of Quality Control Methods for Filters' Adsorbents in Purification of Gas Emissions of Nuclear Power Plants / Lecture Notes in Mechanical Engineering. Advanced Manufacturing Processes III Selected Papers from the 3rd Grabchenko's International Conference on Advanced Manufacturing Processes (InterPartner-2021), September 7–10, 2021, Odessa, Ukraine, Springer, Switzerland, 720 p. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-91327-4_46
15. Stavitskaya S.S., Goba V.E. Homogeneously porous nanoscale carbon materials of aerogel type with molecular sieve properties aerogel type aerogel materials with molecular sieve properties. Nanosystems, Nanomaterials, Nanotechnologies. 2009. T. 7. № 3. P. 683–699.
16. Kolobrodov V.G., Kamatsevich L.V., Berезняк P.A., Khazhmuradov M.A., Vinokurov E.I., Spitsyna V.I. Aerodynamic resistance of some adsorbent layers. Issues of atomic science and technology. 2006. № 4. Series: Physics of radiation damage and radiation materials science (89). P. 224–227.
17. МУК 2613-82. Methodological instructions for gas chromatographic determination of benzene, toluene, ethylbenzene and xylenes in atmospheric air. Moscow: GSEU, 1982. 10с.
18. GOST 10188-74. Filter boxes for gas masks and respirators. Method of determination of resistance to constant air flow. Moscow: ИПК Publishing House of Standards, 1975. 7 p.