

Приборы и оборудование

УДК 628.5:519.6

Марчук Ю.В., канд. техн. наук, **Снігур О.В.**, **Праженнік Ю.Г.**,
Бондаренко Б.І., акад. НАН України, докт. техн. наук, проф.

Інститут газу НАН України, Київ

вул. Дегтярівська, 39, 03113 Київ, Україна, e-mail: umarch@i.com.ua

Створення комп'ютеризованої сорбційно-десорбційної установки та її випробування на прикладі адсорбції водню

Розроблено програмне забезпечення та створено лабораторний комплекс, призначений для дослідження процесів сорбції-десорбції газів твердими сорбентами, зокрема водню вуглецевими нанотрубками. Лабораторний комплекс включає контейнер з сорбентом, допоміжне обладнання, газовий хроматограф, комп'ютеризовану систему вимірювання та обробки експериментальних даних, побудовану за ідеологією відкритих систем. Крім фіксації умов перебігу процесу, система автоматично визначає склад газу у процесах сорбції та десорбції та розраховує теплотворну здатність газової суміші, що дає змогу досліджувати процеси адсорбції окремого компонента газової суміші, наприклад, водню. Тестування системи проведено на 8 зразках вуглецевого матеріалу, що містить нанотрубки, при тиску 1 МПа, температурі 15–20 °С та десорбції при 0,1 МПа, 300 °С. *Библ. 8, рис. 3, табл. 1.*

Ключові слова: сорбція-десорбція, комп'ютеризація вимірювань, газовий хроматограф, теплотворність, водень, нанотрубки.

Адсорбція як технологічний процес має величезне практичне значення, у тому числі для очищення газів або компонентів газових сумішей від небажаних домішок (сполучень сірки, діоксиду вуглецю, водяної пари) у технологічних газах у машинобудуванні, металургії, хімічній промисловості та у паливних газах для розділення повітря з метою одержання кисню, азоту тощо. Найважливіші тверді сорбенти, які мають промислове значення, — це активоване вугілля, силікагель, іоніти, целюліти, деякі природні мінерали. Останні десятиріччя все більшу увагу дослідників привертють нанотрубки, особливо вуглецеві, завдяки

своїм надзвичайно цінним властивостям, серед яких важливою є здатність до адсорбції газів, зокрема водню. Використання його в енергетиці має хороші перспективи, особливо з урахуванням екологічної чистоти водневого палива. Для широкого використання водню, зокрема у паливних елементах для транспорту, потрібні надійні системи його збереження.

Вуглецеві нанотрубки (ВНТ) можуть адсорбувати гази при високому тиску або при електрохімічному насиченні [1]. Але «сирі», тобто одержані за тим чи іншим методом без подальшої обробки, ВНТ мають низьку адсорбційну ємність, непридатну для практичного викори-

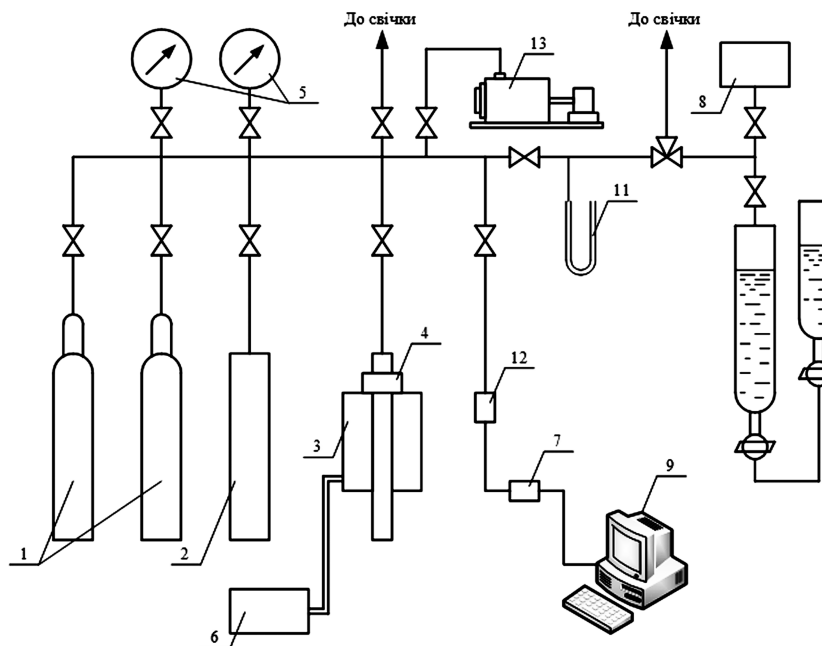


Рис.1. Схема модернізованої лабораторної установки: 1 – балон; 2 – калібрований об'єм; 3 – піч; 4 – контейнер; 5 – манометри; 6 – вузол керування нагрівом; 7 – АЦП; 8 – хроматограф; 9 – комп'ютер; 10 – вузол вимірювання об'єму H_2 ; 11 – індикатор тиску; 12 – датчик тиску; 13 – вакуумний насос.

стання. Проте, у численних дослідженнях показана можливість істотного підвищення адсорбційної ємності шляхом термічної, термобаричної, кислотної, парової або вуглекислотної та іншої активації. Окремі приклади багатоступеневої обробки ВНТ наведені у роботах [2–4].

Необхідність дослідження багатьох потенційно вірогідних адсорбентів поруч з величезною кількістю можливих, але ще не досліджених методів їх активації, обумовила актуальність створення сучасної, високопродуктивної сорбційно-десорбційної дослідної установки. Відома певна кількість сучасних установок [5, 6], в яких комп'ютеризована процедура вимірювань, але відсутня комп'ютерна обробка результатів. Більшість відомих установок не дає змоги досліджувати сорбцію водню із складних газових систем та вивчати вплив газових домішок на процеси сорбції-десорбції. Доцільно було також створити нову архітектуру системи збору даних з можливістю підключення при потребі кількох хроматографів, передбачити можливість дослідження досить великих зразків, створити досконалу програму обробки результатів досліджень, тощо.

При створенні нової дослідної установки були подолані вказані недоліки та імплементована низка удосконалень, суть яких викладена далі.

Схема установки. Принцип роботи

Для дослідження адсорбційних властивостей наноматеріалів було розроблено та виго-

товлено лабораторну установку, основним вузлом якої є контейнер з сорбентом 4, уміщений у нагрівальну піч 3, рівень нагрівання в якій керується вузлом 6. На вході в установку встановлено балони 1 з інертним газом (N_2) та воднем, далі розміщений калібрований об'єм 2.

Температура у контейнері вимірюється термопарою, сигнал з якої обробляється автоматичним цифровим перетворювачем 7 та надходить до комп'ютера 9. Склад та концентрації домішок у водні визначаються на хроматографі 8. З реакційного об'єму газ може надходити до системи мірних бюреток 10; U-подібний індикатор тиску застосовується для контролю тиску у скидній лінії. На подальших етапах дослідження установку було дооснащено датчиком тиску 12 та вакуумним насосом 13. Модернізована установка показана

на рис.1.

Значення тиску в процесі випробувань вимірювалися зразковим манометром кл. 0,6 за ГОСТ 2405–72. Після модернізації установка випробувана на щільність при підвищенні тиску до 5 МПа та температури у середині контейнеру 300 °С протягом 6 год, у результаті чого виявилися втрати тиску, які перевищують межу чутливості вимірювальних приладів. Результати випробувань наведені на рис.2.

Як видно з рис.2 (крива 1), зниження тиску протягом 6 год складало 0,25 МПа, що значною мірою перевищує припустиму величину похибки. Для підвищення точності вимірів було розроблено спеціальний запірний кран. Після заміни кранів установка була випробувана під тиском 5 МПа протягом 6 год; у подальших експериментах зниження тиску знаходилося у межах паспортної похибки манометра.

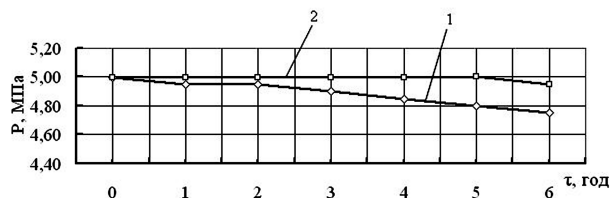


Рис.2. Результати випробувань на щільність кранів установки: 1 – стандартна конструкція (2011 р.); 2 – нова конструкція (2012 р.).

Система вимірювання та обробки експериментальних даних

Для автоматизації процесу отримання результатів експерименту було розроблене програмне забезпечення та створена комп'ютерна система, до якої входять модуль вимірювання температур та спеціальний вимірвальний модуль, придатний для підключення декількох аналогових хроматографів. Аналізи складу газової суміші проводилися на хроматографі ХЛ-6, модернізованому у відповідності до вимог системи. Під час експериментів проводилися аналізи водню на чистоту, у тому числі на наявність метану, який теоретично може утворюватися при нагріванні зразку в процесі десорбції. Подальші дослідження можливості вилучення водню з газових сумішей, що вміщують його (типу конвертованого газу), вимагатимуть повного аналізу складу газу до та після циклу сорбції-десорбції.

Модернізація хроматографа. Модуль складається з таких вузлів: чотирьох вимірвальних каналів, внутрішньої шини, центрального процесора та ланцюгів формування сигналів (рис.3).

Сигнал від хроматографа поступає на вимірвальний вхід модуля. Після вхідного ланцюга сигнал надходить на каналний контролер з вбудованим АЦП, у якому відбувається корекція похибок, нормування та обчислення значення вимірюваного параметра. Вибір вимірюваного параметра здійснюється програмно. Схема світлодіодної індикації призначена для контролю рівня сигналу.

Лінії інтерфейсу з виходу шинного формувача використовуються для підтримки зв'язку із зовнішнім обчислювачем. Центральний процесор модуля обслуговує інтерфейс та забезпечує обмін даними з каналними контролерами.

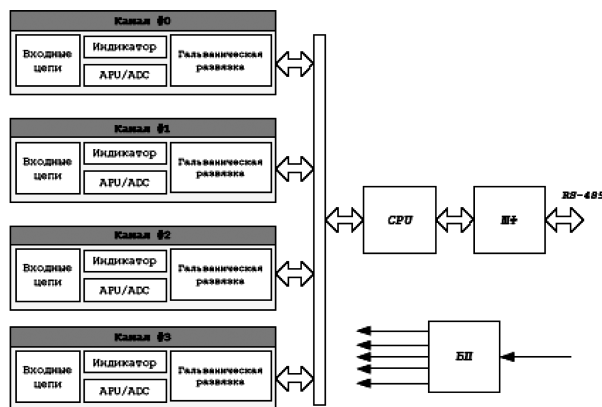


Рис.3. Структурна схема модуля: CPU – центральний процесор; ШФ – шинний формувач; АРУ/АДС – каналний контролер з вбудованим АЦП 24 біт; БП – блок живлення.

Індивідуальна гальванічна розв'язка здійснюється цифровим каналом внутрішньої шини даних, що забезпечує високі метрологічні показники. При одержанні запиту із зовнішньої шини та визнанні його таким, що підлягає обробці каналним контролером, центральний процесор модуля передає запит внутрішньою шиною каналному контролеру. Інтерфейсом виробляється налаштування модуля, управління, а також набуття значень вимірюваних величин.

Оснащення лабораторної установки. У теперішній час будь-який фізичний експеримент керується та контролюється за допомогою персональних комп'ютерів (ПК). Такий симбіоз дозволяє проводити експерименти на новому, високопродуктивному рівні, з високою точністю відтворення процесів. Використання аналогового хроматографа дало змогу в одному масштабі вимірювати усі можливі концентрації газів та перераховувати їх на необхідні для подальшого аналізу величини. Розподілена система збору даних створена з урахуванням її масштабованості на промисловий великотоннажний цикл виробництва з наперед заданими параметрами якості вихідної продукції.

Архітектура системи збору даних.

Систему з необхідною кількістю входів можна зібрати з модулів, які з'єднуються між собою за допомогою промислового інтерфейсу RS-485 та розподілені по об'єкту збору даних так, щоб зменшити довжину кабелю від датчика до модуля. Зібрані дані у цифровій формі передаються промисловою мережею у центральний комп'ютер або контролер. Модулі системи збору даних можуть працювати у стандартних мережах Modbus або у приватнофірмових мережах, оскільки мають відкритий протокол обміну. Кожен модуль у мережі має свою адресу; для опиту модулів комп'ютер посилає їм команду, що містить адресу та код операції, яку необхідно виконати.

Наближення модулів введення до датчиків має декілька переваг. По-перше, скорочується кількість дротів, оскільки цифровий інтерфейс RS-485 має лише два дроти, а передає дані від великої кількості модулів. По-друге, знижується потужність наведених перешкод завдяки скороченню довжини дротів з аналоговими сигналами, спрощується технічне обслуговування та діагностика системи.

Особливості вживаних модулів. Синтезована система складається з ряду підсистем: управління нагрівачем, контролю температурних полів, виміру маси, зняття та розшифровки хроматограм. Модулі для кожної підсистеми розроблялися індивідуально з урахуванням

технічних характеристик фізичних детекторів. Датчики були вибрані максимально наближеними до допустимого діапазону вимірюваних фізичних параметрів технологічного процесу.

Програмне забезпечення. Для досягнення максимальної простоти при роботі з системою збору даних програмне забезпечення та вся система побудована на ідеології відкритих систем. Відкритістю є модульна система, яка допускає заміну будь-якого модуля на аналогічний модуль іншого виробника, а інтеграція з іншими системами, у тому числі з користувачем, виконується без подолання надмірних проблем. Поняття відкритості обговорюється на веб-сайтах OMAC (Open Modular Architecture Controls) и ISA (Instrument Society of America) [7, 8].

У використовуваних модулях відкритими є фізичні інтерфейси, протоколи обміну, методи контролю помилок, системи адресації, формати даних, інтерфейси між програмами, діапазони зміни аналогових сигналів, засоби зв'язку апаратури з програмним забезпеченням, конструкція (кріплення на стандартну DIN-рейку).

Побудова пристроїв зв'язку з об'єктом за ідеологією відкритих систем дозволяє використовувати систему з програмним забезпеченням будь-яких виробників, якщо воно підтримує міжнародний стандарт OPC-інтерфейса (MatLab, LabView, MS Excel та ін.). Вказані програми мають широкі можливості для подальшої обробки отриманих даних, зокрема, для інтерполяції, згладжування, ідентифікації об'єкту, статистичної обробки, адаптивного збору даних та ін.

Впроваджена технологія випробувана при аналізах калібрувальних газових сумішей, виготовлених за стандартами ДСТУ підприємством Укрметртестстандарт, а далі у процесах проведення лабораторних експериментів. Випробування виявили деякі переваги над хроматографом Agilent (США): завдяки прийнятій методиці аналізу (адсорбент — активоване вугілля, газ-носіє — аргон, температура колонки — 90 °С та ін.) час одного аналізу, у тому числі віддувки, складає 25–30 хв у порівнянні з Agilent, за методикою якого можна провести максимум 2–3 аналізи за робочий день.

Методика проведення експеримента

Перед початком експерименту проводилися випробування на щільність. У систему подавався інертний газ (азот) під тиском 10 МПа при нормальній температурі та закритих вентилях В2, В3, В6, В7 та В8, після чого вентиль В1 за-

кривався, а система витримувалася під тиском; спад тиску спостерігався за допомогою одного з манометрів 5 при відкритому вентилі В5. Заереєстрований витік газу протягом 3,5 год відповідав спаду тиску 0,3 МПа. Таким чином, відносна похибка визначення тиску сорбції внаслідок втрати газу в системі складала 3 %.

Для вимірювання внутрішнього об'єму V_0 система заповнювалася газом під тиском p , який фіксувався другим манометром 5 при відкритому вентилі В6. Далі надлишок газу в системі через вентиля В8–В10 та вузол вимірювання об'єму 10 скидався в атмосферу до нормального тиску (p_0); при цьому вимірювався його об'єм $V_{\text{надл}}$.

При постійній температурі (з урахуванням того, що $RT = \text{const}$) маємо $p V_0 = p_0 V$, де $V = V_0 + V_{\text{надл}}$ ($V_{\text{надл}}$ — надлишковий об'єм, що скидався в атмосферу; V_0 — внутрішній об'єм системи; p_0 — нормальний тиск), звідки $V_0 = V_{\text{надл}} \times p_0 / (p - p_0)$.

Відносна похибка визначення V_0 складається з похибок вимірювання $V_{\text{надл}}$ та p . Об'єм вимірювався мірним циліндром 100 мл з ціною поділки 0,1 мл; тиск вимірювався манометром зі шкалою 4 кГс/см² класу 0,4 (ціна поділки 0,016 кГс/см²). Відносна похибка $\varepsilon = (0,1/100 + 0,016/4) \cdot 100 \% = 0,5 \%.$

Внутрішній об'єм системи складав 85 дм³.

Після проведених вимірів система продувалася азотом шляхом кількаразової подачі його під тиском до 20 кГс/см² та скидання тиску до атмосферного, після чого закривали вентиль В1, відкривали В2 та повторювали операцію, подаючи водень та доводячи концентрацію азоту (за розрахунком) до < 0,01 % (об.).

У ході експерименту система заповнювалася воднем під належним тиском та витримувалася протягом 2,5–3 год, після чого надлишковий водень скидався до нормального тиску. Далі починалося нагрівання контейнеру від нормальної температури до 300 °С. Одночасно фіксувалася температура всередині контейнеру та кількість водню, що вийшов з системи. Процес нагрівання провадився ступенево: приблизно за 20 хв до 100 °С, витримка при $T = \text{const}$ протягом 30 хв, і так далі до 300 °С.

Обробка результатів

Для відпрацювання методики експерименту та визначення точності отриманих результатів перші досліди провадилися на зразку з очікувано низькою водневою ємністю. Характеристики зразка показані нижче:

Зразок	–	31-К
Маса, г	–	10,866
Глибина заповнення контейнера, см	–	15,0
Насипна щільність заповнення, г/см ³	–	10,866/42,5 = 0,256
Зіступ після 2 дослідів:		
глибина, см	–	6,0
щільність, г/см ³	–	0,256 × 150 / (150 – 60) = 0,427

На першому етапі проведено 7 дослідів, у яких одержані практично однакові результати: коливання температури – 20–30°, об'єму, що вимірювався, – 0,2–0,3 мл; результати знаходяться у межах припустимої помилки вимірювальних приладів.

Встановлено, що процес десорбції практично закінчується при температурі (120 ± 10) °С; об'єм водню, що виділився при вказаній температурі, складає 32 мл. При подальшому підвищенні температури до 300 °С виділення водню не відбувалося. Відносна похибка вимірювання об'єму десорбованого водню ε – 0,6 %.

Розрахунок поправки на розширення водню у контейнері при температурі, вищій за нормальну. Об'єм контейнера – 42,5 см³. Температура водню у контейнері у момент закінчення процесу десорбції – 120 °С (393 К). Рівняння стану ідеального газу в ізобаричному процесі $V/T = \text{const}$, звідки $V/T = V_0/T_0$, де V_0 , T_0 – параметри газу за нормальних умов, $V_0 = 42,5 \times 298/393 = 32,2$ (см³). Поправка: $42,5 - 32,2 = 10,3$ (см³). Об'єм десорбованого водню: $32,0 - 10,3 = 21,7$ (см³).

Розрахунок водневої ємності. Маса десорбованого водню: $m_{\text{H}_2} = 2 \times 21,7/22\ 400 = 0,00194$ (г). Воднева ємність: $0,00194/10,866 \times 100\ \% = 0,02\ \%$ (мас.).

Обрана методика дозволяє визначати водневу ємність наносорбента з достатньою точністю.

Лабораторні дослідження процесів адсорбції та десорбції водню

У серії лабораторних експериментів з технології виробництва вуглецевих нанотрубок одержано зразки вуглецевого матеріалу, який вміщує нанотрубки. Відібрано 8 зразків для проведення експериментів з дослідження процесів адсорбції та десорбції вуглецевих наноматеріалів.

При проведенні основних досліджень на вході в установку був встановлений, замість азоту, балон з аргоном особливої чистоти – Ar марки ОЧ із вмістом домішок, згідно паспорту, млн⁻¹: O₂ = 2; H₂O = 2, C_mH_n = 1, N₂ = 1, а також з воднем чистим (ДСТУ 2655–94. Водень). Використання аргону дало змогу уникнути шкідливих домішок у процесі сорбції, у першу чергу вільного кисню. Калібрований об'єм 2 разом з манометром 5 (правим) був вилучений зі схеми.

Температура у контейнері вимірювалася термopарою, сигнал з якої оброблявся автоматичним цифровим перетворювачем 7 та надходив до комп'ютера 9. Склад та концентрації домішок у водні визначалися на хроматографі. Сорбція водню зразком наносорбенту відбувалася у контейнері 4 під контролем тиском, що вимірювався зразковим манометром 160 кг/см² (16 МПа), модель 1226, клас точності 0,15. Десорбція здійснювалася шляхом скидання тиску та нагрівання контейнеру. Результати експериментів наведені у таблиці.

Як видно з наведених результатів, найбільш перспективними для подальших досліджень є зразки 64-К та 21-К (порядкові №№ 7–10). Не зважаючи на те, що зміна умов виготовлення зразків не носила системного характеру, дослідження на електронному мікроскопі показали, що саме вказані зразки мали найбільш «пошкоджену» структуру.

Результати досліджень водневої ємності зразків вуглецевих наносорбентів

№№ п/п	Зразок	G _з , г	V _з , см ³	γ, г/см ³	V(H ₂), сорбований, см ³	v(H ₂)*, см ³ H ₂ /г
1	24-К	10,33	36,0	0,29	6,60	0,64
2	53-К	10,68	38,0	0,28	9,5	0,89
3	25-К	9,04	29,5	0,31	8,6	0,95
4	60-К	8,05	18,0	0,45	8,3	1,03
5	57-К1	9,83	30,0	0,33	15,7	1,60
6	32-К	13,24	37,0	0,36	21,2	1,60
7	64-К	2,6	17,0	0,15	5,9	2,27
8	64-К	2,6	17,0	0,15	8,4	3,23
9	21-К	11,90	39,0	0,31	34,6	3,91
10	21-К	11,37	35,0	0,32	38,30	3,37

* Питома ємність сорбенту. Тиск сорбції P = 10 атм.

Додатковий ефект може принести застосування фізичних, хімічних та інших методів активації. Наведені вище тестові випробування засвідчили роботоздатність створеної дослідної установки.

Висновки

Створена сучасна повністю автоматизована установка для дослідження процесів сорбції-десорбції різних газів із складних газових сумішей та з одночасним контролем складу газів на вході-виході вимірювальної системи.

Розроблено програмне забезпечення, на сучасній елементній базі створена комп'ютеризована система вимірювань та обробки результатів експерименту. Відпрацьована методологія експерименту з урахуванням похибок вимірів та похибок обробки результатів

Пристрої зв'язку з об'єктом побудовані за ідеологією відкритих систем, що дозволяє використовувати будь-яку систему з програмним забезпеченням, яке підтримує міжнародний стандарт МЕК61-131.

У лабораторних умовах одержано 8 зразків вуглецевих нанотрубок, які досліджені як наносорбенти водню при тиску 1 та 10 МПа, температурі 15–20 °С, десорбції при 0,1 МПа та 300 °С. Питома ємність сорбенту, одержаного за різними технологіями, знаходилася в межах від 0,64 (min) до 3,37 (max) см³ Н₂/г.

Тестові дослідження сорбції-десорбції водню зразками багатостінних вуглецевих нанотрубок засвідчили працездатність створеної установки.

Список літератури

1. Раков Э.Г. Химия и применение углеродных нанотрубок // Успехи химии. — 2001. — Т. 70, № 10. — С. 934–973.
2. Liu C., Fan Y., Liu M., Cong H.T., Dresselhaus H.M. // Science. — 1999. — Vol. 286. — P. 1127.
3. Zhu H.W., Chen A., Mao Z.Q., Xu C.L., Xiao X., Wei B.Q., Liang J., Wu. D.H. // J. Mater. Sci. Lett. — 2000. — № 19. — P. 1237.
4. Пат. 2477704 РФ, МКИ В 82 Y 40/00 (2011.01). Способ получения высококомпактного водовода / Ю.С.Нечаев. — Оpubл. 20.03.13.
5. Кудияров В.Н., Лидер А.М. Изучение процессов сорбции и десорбции водорода при помощи автоматизированного комплекса Gas Reaction Controller Lp. // Физико-математические науки. Фундаментальные исследования. — 2013. — № 10 — С. 3466.
6. PCTPro-2000. Измерения объемной сорбции-десорбции. [Электронный ресурс]. — Режим доступа: http://www.komef.ru/setaram/sorb_desorb.doc
7. OMAC (Open Modular Architecture Controls. — [Online resource]. — Access mode: <http://www.omac.org/>
8. ISA (Instrument Society of America). — [Online resource]. — Access mode: <http://www.isa.org/>

Надійшла до редакції 15.07.15

УДК 621.436.2

**Марчук Ю.В., канд. техн. наук, Снигур О.В., Праженник Ю.Г.,
Бондаренко Б.І., акад. НАН України, докт. техн. наук., проф.**

Институт газа НАН Украины, Киев

ул. Дегтяревская, 39, 03113 Киев, Украина, e-mail: umarch@i.com.ua

Создание компьютеризованной сорбционно-десорбционной установки и ее испытания на примере адсорбции водорода

Разработано программное обеспечение и создан лабораторный комплекс, предназначенный для исследования процессов сорбции-десорбции газов твердыми сорбентами, в частности, водорода углеродными нанотрубками. Лабораторный комплекс включает контейнер с сорбентом, вспомогательное оборудование, газовый хроматограф, компьютеризованную систему измерения и обработки экспериментальных данных, построенную по идеологии открытых систем. Кроме фиксации условий протекания процесса, система автоматически определяет состав газа в процессах сорбции и десорбции и рассчитывает теплотворную способность газовой смеси, что дает возможность исследовать процессы адсорбции отдельного компонента газовой смеси, например, водорода. Тестирование системы проведено на 8 образцах углеродного материала, содержащего нанотрубки, при давлении 1 МПа, температуре 15–20 °С и десорбции при 0,1 МПа, 300 °С. *Бібл. 8, рис. 3, табл. 1.*

Ключевые слова: сорбция-десорбция, компьютеризация измерений, газовый хроматограф, теплотворность, водород, нанотрубки.

Marchuk Yu.V., Candidate of Technical Sciences, **Snigur A.V.**,
Prazhennik Yu.G., **Bondarenko B.I.**, Academician of NAS of Ukraine, Doctor
of Technical Sciences, Prof.

The Gas Institute of National Academy of Sciences of Ukraine, Kiev
39, Degtyarivska Str., 03113 Kiev, Ukraine, e-mail: umarch@i.com.ua

New Computerized Sorption-Desorption Unit and it's Testing with Hydrogen Adsorption

Software has been developed and laboratory complex has been created for study of different gases sorption-desorption processes with solid sorbents. The complex in particular consist of container with a sorbent, accessories, gas chromatograph, computerized measurement system and experimental data analysis, built on the ideology of open systems. In addition to process parameters fixing and recording, the system can automatically determines the gas composition before and after of the processes of adsorption and desorption, and calculates the calorific value of the gas mixture, which makes it possible to investigate the adsorption of a separate component of the gas mixture. System testing was performed with hydrogen on 8 samples of carbon material containing nanotubes at pressure of 1 MPa, temperature of 15–20 °C and desorption at 0.1 MPa and 300 °C. *Bi-ble 8, Fig. 3, Table 1.*

Key words: sorption-desorption, computerization of measurement, chromatograph, calorific value, hydrogen, nanotubes.

References

1. Rakov. Ye.G. [Chemistry and application of carbon nanotubes]. *Uspehi himii*, 2001, 70 (10), pp. 934–973. (Rus).
2. Liu C., Fan Y., Liu M., Cong H.T., Dresselhaus H.M., *Science.*, 1999, 286, pp. 1127.
3. Zhu H.W., Chen A., Mao Z.Q. Xu C.L., Xiao X., Wei B.Q., Liang J., Wu. D.H., *J. Mater. Sci. Letter*, 2000, (19), pp. 1237.
4. Pat. 2477704 RF, IPC B 82 Y 40/00 (2011.01), [Process for preparing highly compact hydrogen], Yu.S. Nechaev, Publ. 20.03.2013.(Rus).
5. Kudiyarov V.N., Lider A.M. [Studying of hydrogen sorption and desorption process using an automated complex Gas Reaction Controller LP], *Fiziko-matematicheskie nauki. Fundamental'nye issledovaniya*, 2013, (10), pp. 3466. (Rus).
6. PCTPro-2000. [Measurements of the volumetric sorption-desorption]. — [Online resource]. — Access mode: http://www.komef.ru/setaram/sorb_desorb.doc
7. OMAC (Open Modular Architecture Controls. — [Online resource]. — Access mode: <http://www.omac.org/>
8. ISA (Instrument Society of America). — [Online resource]. — Access mode: <http://www.isa.org/>

Received July 15, 2015