

ions and copper ions effectively passed in an acid medium and practically did not occur in the processing of resin by salt solution. In general, the proposed sorbent in acid and salt form is useful at monitoring of heavy metals in water.

Keywords: heavy metals, ion exchange, adsorption, exchange capacity of the resin, regeneration.

References

1. Morozov, N.P. (1979), "About correlation of forms of migration of microelements in waters of the rivers of bays, seas and oceans", *Geohimija*, vol. 8, pp.1259–1263.
2. Bruks, R.R. (1982), *Zagrijaznenie mikrojelementami [Contamination by trace elements]*, Himija, Moscow, USSR.
3. Rud'ko, H.I. (2015), *Medyko-hidroheokhimichni chynnyky heolohichnoho seredovyscha Ukrainy [Medical hydrogeochemical factors of the geological environment of Ukraine]*, Bukrek, Kyiv–Chernivtsi, Ukraine.
4. Moroz, N.A. Sednev, V.A. and Cherkashyn, Y.A. (2005), "Hydrochemical monitoring of surface waters in the region of the location of the Zaporizhzhya nuclear power plant", *Prom. teplotekhnika*, no.27, vol.2, pp.78–87.
5. Linnik, P.N. and Nabivanec, B.I. (1986), *Formy migracii metallov v presnyh poverhnostnyh vodah [Forms of migration of metals are in fresh superficial waters]*, Gidrometeoizdat, Leningrad, USSR.
6. Trokhymenko, H.H. and Tsyhaniuk, N.V. (2011), "Research accumulation of heavy metals in sediments Bug estuary using atomic absorption spectrophotometry", *Zbirnyk materialiv II Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii "Innovatsii v sudnobyuduvanni ta okeanotekhnitsi"* [Proc. of the II Int. Scientific Conf. "Innovations in shipbuilding and Ocean Technologies"], Mykolaiv, Ukraine, pp. 446–448.
7. Shumilova, O.O. and Trokhymenko, H.H. (2012), "Study of the effect of eutrophication on the secondary pollution of the Bugsy estuary with heavy metals", *Visnyk NUK*, vol. 1, pp. 56–62.
8. Makarenko, I.M., Nosachova, Yu.V. and Ivanenko, O.I. (2014), "Assessing the impact of hardness ions in water purification efficiency of copper ions", *Khimichna inzheneriia, ekolohiia ta resursoberezhennia*, vol. 1 (12), pp. 54–59.

УДК 621.039.73:542

ЛЕВЕНЕЦЬ В. В., д.фіз.-мат.н.; РОЛІК І. Л., к.т.н.; УСІКОВ М. П.; ШИРОКОВ Б. М., д.т.н.;
ХОВАНСЬКИЙ М. О.; ШИЯН О. В.; ЩУР А. О., к.фіз.-мат.н.
Національний науковий центр «Харківський фізико-технічний інститут»

АНАЛІЗ ВИКИДІВ ГАЗОФТОРИДНОГО ФРАКЦІОНУВАННЯ ЯДЕРНИХ ВІДХОДІВ

Досліджено газофторидну технологію переробки відходів підприємств атомно-промислового комплексу, що відпрацьована в ННЦ ХФТИ. Використано ядерно-фізичні методи аналізу. Визначено кількісні та якісні характеристики її потенційних негативних екологічних факторів, а саме викидів безпосередньо на робочому місці.

Ключові слова: газофторидна технологія, ядерні відходи, екологічна безпека, ядерно-фізичні методи аналізу.

© Левенець В. В., Ролік І. Л., Усіков М. П., Широков Б. М., Хованський М. О., Шиян О. В., Щур А. О., 2016.

Постановка проблеми. Темпи розвитку сучасної радіохімічної промисловості відстають від темпів розвитку ядерної енергетики: у світі спостерігається дефіцит переробних потужностей. Ці проблеми є актуальними і для України. У нас відпрацьоване ядерне паливо і високоактивні відходи (ВАО) вивозять для перероблення на заводи в Росію, лише частину ВАО витримують у сухих сховищах Запорізької АЕС. Також невирішеними є проблеми поводження з низько- й середньоактивними відходами (НАО, САВ). Насамперед, це стосується відходів уранового виробництва, накопичених у найбільших в Європі хвостосховищах, що розташовані поблизу від населених пунктів, не завжди мають чітко визначеного власника й потребують значних затрат для їхнього утримання й рекультивації.

У світі не існує єдиної технології переробки відходів підприємств атомно-промислового комплексу. Розробляють методи концентрування відходів і вилучення з них корисних матеріалів (фракціонування відходів за хімічними властивостями й періодами напіврозпаду), що відіграють важливу роль у забезпеченні економічної та екологічної вигоди замкнутого паливного циклу. Запропоновані технології фракціонування відходів. Провідне місце серед них займають водо-екстракційні та інші методи з використанням хімічних реак-

тивів на водній основі [1–3]. Проте, попри застосування цих методів у промисловому масштабі, вони мають низку недоліків: утворення великої кількості ВАВ, відсутність стабільності в разі довгострокового захоронення ВАВ, масштабна радіохімічна діяльність, затратний характер тощо. Тому більш перспективними вбачають неводні технологічні процеси, базовані на відмінній леткості компонентів системи, що переробляється (дистиляційні процеси), фракційна кристалізація з розплавів, екстракція розплавами солей, зонне плавлення тощо [4–6].

Аналіз попередніх досліджень. Найбільш вивченою й перспективною є газофторидна схема перероблення [7–9], що використовує високу реакційну здатність фтору та його сполук. Утворені під час оброблення фториди розділяють завдяки різній леткості, за необхідності додатково очищують і використовують, наприклад, для одержання чистих елементів. Застосування газофазних процесів істотно спрощує системи подачі, управління й регулювання. При цьому не потрібно використовувати великі обсяги лужно-кислотних розчинів – потенційних джерел забруднення навколишнього середовища. Основним чинником негативного екологічного впливу під час впровадження газофторидної технології є викиди в атмосферу легких фтористих сполук. Ці сполуки, як і сам фтор, уражають слизові оболонки й дихальні шляхи, що може призвести до серйозних захворювань, зокрема онкологічних. Невизначеність щодо екологічної безпеки газового фторування ядерних відходів є загальною науковою проблемою [10]. Тому вивчення екологічних наслідків використання газофторидного методу перероблення є важливим завданням. Щоб визначити потенційні негативні впливи на різних етапах досліджуваного процесу, насамперед слід установити перелік речовин, що можуть виділятися в повітря робочої зони та з викидами в навколишнє середовище під час реалізації технологічного процесу з урахуванням застосовуваної сировини, проміжних і кінцевих продуктів реакції.

Метою роботи є визначення переліку забрудників, що можуть виділятися в повітря робочої зони під час реалізації газофторидного чи фторидно-дистиляційного методів фракціонування ядерних відходів із відтворенням досліджуваної технології за лабораторних умов і визначені кількісних та якісних характеристик викидів безпосередньо на робочому місці.

Виклад основного матеріалу. Опрацювання газофторидних методів фракціонування доцільно вести на радіаційно безпечних та аналогічних за фізико-хімічними властивостями об'єктах. Відходи уранового виробництва є відходами з оксидною матрицею, до яких належать відходи переробки корисних копалин, зокрема цирконію – основного конструкційного матеріалу в ядерній енергетиці. Цирконієвій галузі притаманні ті ж проблеми недостатнього виділення корисних продуктів та їхнього високого вмісту у відвалах. Дослідження елементного складу відходів Вільногірського гідрометалургійного комбінату (ВГМК), що переробляє ільменіт-рутил-цирконієві руди, дозволило установити їхній склад і визначити можливість їхнього використання для подальшого дослідження газофторидних методів фракціонування ядерних відходів. Хімічним аналогом урану в цих дослідженнях може бути вольфрам, що міститься у використаних відходах.

Загальна схема дослідження газофторидної технології перероблення відходів полягає в реалізації таких етапів:

- термооброблення шихти в трубчастій печі за температури 300...350 °С для видалення вологи, газів та органічних сполук;
- окислення зневодненої й подрібненої шихти в плазмотроні за температури понад 2000 °С;
- фторування зразків шихти в газополум'яному реакторі з використанням елементарного фтору;
- уловлювання та виділення летких фторидів;
- розділення нелетких фторидів;
- отримання чистих елементів відновленням їхніх фторидів у низькотемпературній нерівноважній плазмі.

Цю технологію можна використовувати для виділення з відходів майже всіх корисних компонентів [9, 10].

Лабораторні дослідження було спрямовано на вивчення процесу фторування зразків шихти, отриманої з відходів ВГМК, що є основним етапом технології.

Фторування здійснювали в установці, виготовленою і зібраною М. Хованським під керівництвом Б. Широківа (рис. 1). Її основними елементами є: завантажувально-дозуючий пристрій, що складається з корпуса 5, дозатора 8 і бункера 6, куди завантажують порошкоподібний зразок 7, що підлягає фторуванню; пристрій введення газоподібного фторувального агента в реакційний об'єм, що складається з лінії подачі 1 із соплом 4; пристрій збирання і вловлювання продуктів реакції, що складається із встановленого в нижній частині реактора піддону 2 для збирання нелетких фторидів 3 і блоку пасток 10 для вловлювання газоподібних фторидів, з'єднаного з реактором вихідним патрубоком із фільтром 9.

Оптимальні параметри фторування (фракційний склад порошку, швидкість його розсіпання, витрату фторувального агента, початкову температуру в зоні реакції) визначав О. Шиян. Як фторувальний агент використовували зневоднений фтористий водень. Тиск пари HF на вході лінії подачі становив ~230 кПа.

Розмір частинок шихти не перевищував 25 мкм, швидкість розсипання порошку дорівнювала 1,7 г/хв, початкова температура в зоні реакції становила 300...350 °С.

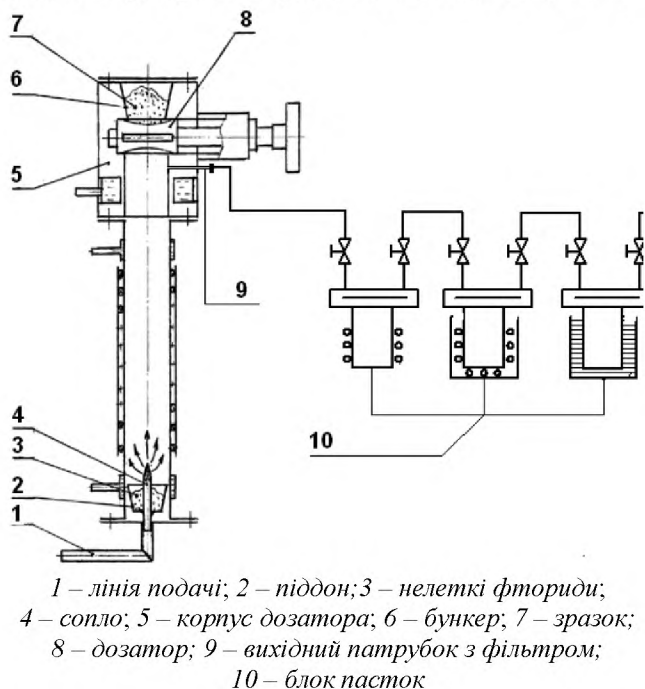


Рис. 1 – Схема установки газофторидної переробки

ку зміни концентрацій різних елементів під час фторування.

Небезпеку забрудників, наявних у повітрі робочої зони, оцінювали за методикою [13].

Таблиця 1 – Характеристика умов відбору проб

Номер проби	Умови відбору	Номер проби	Умови відбору
1	Установка не працює	5	Установку вимкнено, іде охолодження
2	Установку підготовлено до вмикання	6	Установку розбирають, виймають піддон
3	Вихід на робочий режим	7	Установка не працює
4	Іде фторування, увімкнено витяжку	8	Чистий фільтр

Елементний склад досліджуваних хвостів збагачувального виробництва наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Елементний склад відходів ВГМК

Елемент	Масова частка, %	Елемент	Масова частка, %
Ca	14,563	Cr	0,012
Zr	12,621	Ni	0,008
Fe	0,518	Hf	0,007
Ti	0,504	Si	10,611
W	0,495	C	7,583
K	0,271	Cl	4,582
Al	0,200	S	2,651
Mn	0,019	O	45,332

ня – для Zn, Ti. Для Fe і Ni спостерігаються майже однакові піки як під час роботи установки без витяжки, так і після вимкнення обладнання. Для Zr пік концентрації в повітрі робочої зони має місце під час розбирання устаткування й прибирання витяжки.

Зразки перед фторуванням і нелеткий залишок після фторування зважували на терезах ВЛКТ-200. Елементний склад зразків і нелеткого осаду досліджували ядерно-фізичними методами аналізу. Використовували методики, засновані на використанні характеристичного рентгенівського випромінювання, збуджуваного протонами, і миттєвого γ -випромінювання з ядерних реакцій, ініційованих протонами. Цю роботу виконали В. Левенець і М. Усіков.

А. Щур досліджував повітря робочої зони. Були встановлені короточасні концентрації елементів [11]. Проби відбирали з використанням фільтра АФА-ВП-20 та аналізували рентгеноспектральним методом із протонним збудженням. Умови вимірювань для кожного зразка наведено у табл. 1.

Подальше оброблення результатів здійснила І. Ролік І. За допомогою методів аналізу рядів динаміки [12] було проаналізовано коливання концентрацій. Були розраховані базисні коефіцієнти росту, що відображають змінення концентрації в різні моменти роботи установки порівняно з їхнім початковим рівнем (умови № 2 у табл. 1). Це дозволило порівняти динамі-

Установлено, що за всіма елементами досягнуто концентрацій, що задовольняють вимогам до вмісту забрудників у робочій зоні навіть за вимкненої витяжки й під час розбирання установки, а також при роботі з газоподібними й твердими фторидами, утвореними внаслідок фторування (табл. 3).

Спостерігається різке підвищення концентрації всіх елементів під час вмикання установки та її різке зменшення під час вмикання витяжки. Подальше вимкнення очисного обладнання, прибирання плазмотрону та витяжки призводять до збільшення концентрації деяких елементів. Піки викидів під час роботи установки спостерігаються для Cr, Mn, F, W; після вимкнення

Повний аналіз причин утворення піків концентрацій за конкретними елементами в різні моменти роботи установки поки непотрібний, оскільки гранично допустимих концентрацій дотримано. Проте це необхідно в подальших дослідженнях із збільшеною потужністю переробки.

Таблиця 3 – Уміст елементів у повітрі робочої зони в різні моменти роботи установки

Елемент	Уміст елементів, мг/м ³					
	установку підготовлено до вмикання	вихід на робочий режим	іде фторування, увімкнено витяжку	установку вимкнено, іде охолодження	установку розбирають, виймають піддон	установка не працює
F	0,0052	0,025	0,0068	0,0047	0,012	0,007
Ti	0,058	0,141	0,067	0,278	0,087	0,015
Mn	0,0016	0,0128	0,005	0,0034	0,0008	0,007
Cr	0,0095	0,084	0,015	0,0061	0,0073	0,014
Fe	0,123	0,618	0,124	0,618	0,325	0,122
Ni	0,015	0,058	0,016	0,046	0,029	0,012
Zn	0,008	0,050	0,002	0,069	0,019	0,015
Zr	0,21	0,42	0,081	0,302	1,076	0,037
W	0,11	0,48	0,034	0,201	0,070	0,035

Висновки. За лабораторних умов відтворено основний етап газофторидного фракціонування ядерних відходів – фторування зразків шихти, одержаної з відходів ВГМК. Досліджено елементний склад зразків відходів. Визначено перелік забрудників повітря безпосередньо на робочому місці – F, Ti, Mn, Cr, Fe, Ni, Zn, Zr, W. Доведено, що технологічні процеси відбуваються в замкнутих системах і не призводять до викидів в робочу зону недопустимих концентрацій забрудників.

У подальшому планується дослідити фторування відходів різних підприємств уранової промисловості України, визначити остаточний склад викидів у робочу зону й навколишнє середовище.

Список використаної літератури

1. Kubota M. [w. n.] / M. Kubota, Y. Morita // Proc. of Global-97. – Vol. 1. – P. 458.
2. Тананаев И. Г. Современные технологии экстракционного фракционирования радиоактивных отходов высокого уровня активности [Электронный ресурс] / И. Г. Тананаев. – Режим доступа : <http://nuclearwaste.report.ru/material.asp?MID=393>
3. Fibrous aggregation of magnetite nanoparticles induced by a time-varied magnetic field / Jianfei Sun, Yu Zhang, Zhongping Chen, Jie Zhuu // *Angewandte chemie. – Nanoparticle aggregates. – 2007. – P. 4767–4770.*
4. Pat. 1001450, EP. МРК (2009) В 01 J 19/08, Н 01 J 49/30, Н 01 J 49/26. Tandem plasma mass filter / T. Ohkawa. – EP19990308652 ; appl. 18.08.2000 ; publ. 22.05.01.
5. Ковтун Ю. В. Магніто-плазмові сепараційні технології і їх можливе використання для переробки ВЯП і РАВ / Ю. В. Ковтун, Є. І. Скібенко, В. Б. Юферов. // *Ядерні та радіаційні технології. – 2007. – Т. 7. – № 1–2. – С. 72–80*
6. Плазмооптическая сепарация и диагностика результатов разделения отработанного ядерного топлива / Н. В. Астраханцев, В. М. Бардаков, Во Ньы Зан и др. // *ВАНТ ; сер. «Плазменная электроника и новые методы ускорения». – 2010. – № 4. – С. 310–315.*
7. Шаталов В. В. Новые подходы к переработке ядерного топлива газофторидным способом / В. В. Шаталов, М. Б. Серегин // *Многосторонние технические и организационные подходы к ядерному топливному циклу для укрепления режима нераспространения ядерного оружия : тез. докл. междунар. конф. ; Москва, 13-15 июля 2005 г. – С. 17.*
8. Фторидно-дистилляционный рецикл облученного ядерного топлива / В. К. Ежов, А. В. Загнитько, О. Г. Лебедев и др. ; ИАЭ – 6262/13. – М. : РНЦ «Курчатовский институт», 2003.
9. Газофторидная переработка отработавшего оксидного топлива / В. В. Шаталов, М. Б. Серегин, В. Ф. Харин, Л. А. Пономарев // *Атомная энергия. – 2001. – Т. 90. – № 3. – С. 212–222.*
10. Газофторидная переработка и минерализация радиоактивных отходов – новые экологически чистые технологии Национального научного центра «Харьковский физико-технический институт» / В. П. Канцедал, В. Л. Капустин, И. М. Карнаухов [и др.] // *Атомна енергетика та промисловість України. – 1999. – № 2. – С. 17–23.*

11. Контроль содержания вредных веществ в воздухе рабочей зоны : метод. указ. от 26 сент. 1985 г. № 3936-85. – М., 1985.
12. Статистика / под ред. М. Р. Ефимовой. – М. : ИНФРА-М, 2002. – 336 с.
13. СП 4696-88. Гранично допустимі концентрації (ГДК) шкідливих речовин в повітрі робочої зони, 1988.

Надійшла до редакції 20.06.2015

Levenets V. V., Rolik I. L., Usikov M. P., Shyrovkov B. M., Khovanskyi M. O., Shyian O. V., Shchur A. O.

ENVIRONMENTAL SAFETY IN GAS FLUORIDATION OF NUCLEAR WASTE

In Ukraine, uranium industry waste is stockpiled in tailing dumps, which are the largest in Europe and located close to residential areas. It has been suggested that such nuclear waste should be processed using either gas fluoride or fluoride distillation methods developed at the Kharkov Institute of Physics and Technology National Science Center (KIPT). However, the question remains whether this technology is environmentally safe.

The study recreated the gas fluoride technology for processing radioactive waste in a lab environment, with on-site quantitative and qualitative analyses of resulting emissions.

The technology under examination was applied to radioactively safe objects with similar physicochemical properties, namely the waste from the Vilnohirsk Leaching Plant (VLP). The study focused on fluoridation, which is the main stage in the process. Dehydrated hydrogen fluoride was used as a fluoridating agent. HF vapor entry pressure at the supply line was ~230 kPa. Charge particles size was under 25 μm, powder spillage speed was 1.7 g/min, initial temperature of the reaction zone was 300 ÷ 350 °C.

To detect potential negative environmental effects at various stages of the fluoridation process, air samples were taken at the work area. The elemental composition of waste obtained after processing the nonvolatile residue and samples taken from the air intake were studied through nuclear physical analysis. The analyses methods used characteristic proton-induced X-emission and prompt gamma radiation from proton-induced nuclear reactions. Measurements were taken under different equipment environments. Fluctuations in resulting concentration values were analyzed using time series methods.

The following pollutants were determined likely to be emitted into the air during gas fluoridation of samples at the work area: F, Ti, Mn, Cr, Fe, Ni, Zn, Zr, W. All emissions were within threshold concentration values.

The lab study has shown that the gas fluoridation technology of waste processing takes place in a closed-circuit system and does not result in emissions of pollutants above threshold levels at the work area.

In future it would be advisable to study the fluoridation of wastes from various uranium industry facilities in Ukraine, determine the elemental composition of emissions at the work are and the environment at large.

Keywords: gas fluoridation, nuclear waste, environmental safety, nuclear-physical analysis methods.

References

1. Kubota, M. and Morita, Y. (1997), *Proc. of Global-97*, vol. 1.
2. report.ru (2015), “Modern technologies of extraction fractionation of radioactive wastes of low activity level” [Sovremennyye tehnologii jekstrakcionnogo frakcionirovaniya radioaktivnyh othodov vysokogo urovnja aktivnosti], available at: <http://nuclearwaste.report.ru/material.asp?MID=393> (accessed 15 May 2015).
3. Jianfei Sun, Yu Zhang, Zhongping Chen and Jie Zhuu (2007), “Fibrous aggregation of magnetite nanoparticles induced by a time-varied magnetic field”, *Angewandte chemie*, pp. 4767–4770.
4. Pat. 1001450, EP. MPK (2009) B 01 J 19/08, H 01 J 49/30, H 01 J 49/26. Tandem plasma mass filter, T. Ohkawa, EP19990308652, appl. 18.08.2000, publ. 22.05.01.
5. Kovtun, Yu.V., Skibenko, Ye.I. and Yuferov, V.B. (2007), “Magneto-plasma separation technologies and their possible use for processing of spent fuel and radioactive waste”, *Yaderni ta radiatsiini tekhnolohii*, vol. 7, no 1–2, pp. 72–80.
6. Astrahancev, N.V., Bardakov, V.M., Vo N'y Zan et al. (2010), “Plasma-separation and diagnosis results of separation of spent nuclear fuel”, *VANT*, vol. 7, no. 4, pp. 310–315.
7. Shatalov, V.V. and Seregin, M.B. (2005), “New approaches to the nuclear fuel reprocessing”, *Multilateral technical and organizational approaches to the nuclear fuel cycle to strengthen the non-proliferation regime*, Moscow, Russia, July 13–15, p. 17.
8. Ezhov, V.K., Zahnytko, A.V. and Lebedev, O.H. (2003), “Ftorydno-dystylliatsyonnii retsykl obluchennoho yadernoho toplyva” [Fluoride-distillation recycling of irradiated nuclear fuel], RNC “Kurchatovskij institut” Moscow, Russia.

9. Shatalov, V.V., Seregin, M.B., Harin, V.F. and Ponomarev, L.A. (2001), "Gas-fluoride reprocessing of spent oxide fuel", *Atomnaja jenergija*, vol. 90, no 3, pp. 212–222.
10. Kancedal, V.P., Kapustin, V.L. and Karnauhov, I.M. (1999), "Fluoride gas recycling and mineralization of radioactive waste – the new eco-friendly technologies from the National Science Center "Kharkiv Institute of Physics and Technology", *Atomna enerhetyka ta promyslovist Ukrainy*, no 2, pp. 17–23.
11. "Control of content of harmful substances in the air of the working area. Guidelines". *Metodicheskie ukazaniya* (September 26, 1985, no 3936–85).
12. Efimova, M.R. (2002), *Statistika* [Statistics], INFRA-M, Moscow, Russia.
13. SP 4696-88. *Maximum allowable concentration of harmful substances in the air of the working area*, 1988.

УДК 676:628.1.03

ПЛОСКОНОС В. Г., к.т.н., доц.

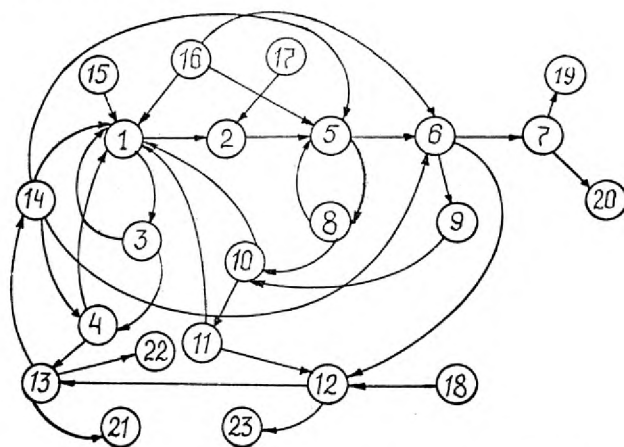
Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»,

МЕТОДОЛОГІЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ ФУНКЦІОНУВАННЯ СКЛАДНИХ СИСТЕМ ВИРОБНИЦТВА ПАПЕРУ Й КАРТОНУ

Розроблено основні аспекти методології дослідження динаміки функціонування складних систем, а саме системного підходу до вирішення проблем, що виникають у системах водокористування виробництва паперу й картону. Процедура імітаційного моделювання за допомогою комп'ютера відтворює динаміку процесів, що відбуваються в досліджуваній системі, з використанням наявних математичних описів і структурних особливостей системи.

Ключові слова: складна система, система водокористування, ефект емерджентності, процедури системного аналізу, імітаційне моделювання, динаміка процесів.

© Плосконос В. Г., 2016.



- 1 – розмелювально-підготовчий відділ; 2 – масний басейн; 3 – басейн оборотної води; 4 – вакуум-фільтр; 5 – реєстрова частина КРМ; 6 – пресова частина КРМ; 7 – сушильна частина КРМ; 8 – басейн реєстрових вод; 9 – басейн пресових вод; 10 – басейн надлишкових вод; 11 – уловлювання волокна; 12 – механо-хімічне очищення; 13 – біологічне очищення; 14 – басейн води повторного використання; 15 – вихідні волокнисті напівфабрикати; 16 – свіжа вода; 17, 18 – допоміжні хімічні речовини; 19 – пара; 20 – склад готової продукції; 21 – стоки; 22, 23 – осади

Рис. 1 – Узагальнена технологічна схема виробництва картону

Постановка проблеми. Аналіз технологічних систем виробництва паперу й картону свідчить: вони є системами з розгалуженими водопотоками між технологічним обладнанням та очисними спорудами. За всіма ознаками їх можна віднести до складних систем (рис. 1). Тому їхній аналіз потребує особливого підходу, особливо під час реконструкції технологічної системи чи проектування нової. Стан технологічної системи такого типу в заданий інтервал часу визначається динамікою потоків і множиною показників, що характеризують стан її окремих елементів, їхніх входів і виходів.

Крім розгалуженості потоків, такі системи характеризуються значними обсягами використовуваної води, як свіжої, так і оборотної. Частина води повторного використання після очищення скидають у природні водойми (див. рис. 1), тому з точки зору охорони