

**АДАПТИВНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ СТУПЕНЕМ ПОПЕРЕДНЬОГО
КОНЦЕНТРУВАННЯ ДЕЙТЕРІУ У ВИРОБНИЦТВІ ВАЖКОЇ ВОДИ**

*ТОВ "ІМТЕКС", Київ, Україна

Анотація. Розглядається історія створення у 1971–1975 роках в СКБ ММС Інституту кібернетики (м. Київ) системи управління ступенем попереднього концентрування дейтерію у виробництві важкої води на хімічному комбінаті в м. Дніпродзержинську (тепер м. Кам'янське, ПАТ "Дніпроазот"). Подається технологічна схема вказаного ступеня, його складових елементів та блок-схема АСУТП, що була розроблена на підставі досліджень цього складного об'єкта управління. Наводиться математична модель ректифікаційних колон в агрегатах розділення ізотопів водню, що була використана для синтезу алгоритму адаптивної стохастично-оптимальної системи з активним накопиченням інформації про керовані випадкові процеси. Результати проведених промислових випробувань системи довели її ефективність.

Ключові слова: адаптивна система управління, дейтерій, важка вода, ректифікація, АСУТП, математична модель, керований випадковий процес.

Аннотация. Рассматривается история создания в 1971–1975 годах в СКБ ММС Института кибернетики (г. Киев) системы управления степенью предварительного концентрирования дейтерия в производстве тяжелой воды на химическом комбинате в г. Днепродзержинске (ныне г. Каменское, ПАО "ДнепрАЗот"). Приводится технологическая схема указанной степени, ее составных элементов и блок-схема АСУТП, разработанной на основе исследований этого сложного объекта управления. Описывается математическая модель ректификационных колонн в агрегатах разделения изотопов водорода, которая была использована для синтеза алгоритма адаптивной стохастически-оптимальной системы с активным накоплением информации об управляемых случайных процессах. Результаты проведенных промышленных испытаний системы подтвердили ее эффективность.

Ключевые слова: адаптивная система управления, дейтерий, тяжелая вода, ректификация, АСУТП, математическая модель, управляемый случайный процесс.

Abstract. The history of creation in 1971–1975 years at SDB MMS of the Institute of Cybernetics (Kyiv city) the control system for the deuterium pre-concentration stage in heavy water production at Dneprodzerzhinsk chemical plant (now Kamianske city, PJSC "DneprAzot") is considered. It is given a technological block-diagram of the stage with its components and block-diagram of ACSTP which was developed in consequence of investigations of this complex controlled object. A mathematical model of the distillation columns in the separating units of hydrogen isotopes which was used for synthesis of an algorithm of the adaptive stochastic optimal system with active accumulation of information about controlled probabilistic processes is described. The results of the carried out tests of the system confirmed its efficiency.

Keywords: adaptive control system, deuterium, heavy water, distillation, ACSTP, mathematical model, controlled probabilistic process.

1. Вступ

Початок теорії адаптивних систем, коли мова йдеться про управління в умовах невизначеності, багато фахівців у галузі управління пов'язують з роботами О.А. Фельдбаума з оптимального стохастичного управління. Його концепція активного накопичування інформації в системах управління при ймовірнісному трактуванні задач з позицій байєсівського підходу, що отримала назву дуального управління [1], знайшла багатьох послідовників, у тому числі в київському Кібернетичному центрі (КЦ) Національної академії наук України (НАНУ). З цим підходом пов'язують чималі складнощі у реалізації синтезованих алгоритмів керування. Однак при певних припущеннях, що не суперечать реальній постановці

задачі, вдавалося створювати досить ефективні адаптивні системи управління навіть з урахуванням обмежених можливостей перших радянських управляючих обчислювальних машин (УОМ). Одній такій системі присвячена ця стаття.

2. Короткі відомості про дейтерій та важку воду

Відкриття американськими фізиками дейтерію (кінець 1931 р., Гарольд Юрі з учнями, лауреат Нобелівської премії з хімії за 1934 рік) і важкої води (1933 р., Льюїс Гілберт і Рональд Макдональд) стоїть в одному ряду з видатними відкриттями 1932-го року – року чудес або року *anno mirabilis*, як називають його фізики (з відкриттям нейтрона і позитрона, створенням протонно-нейтронної теорії будови ядер, здійсненням першої реакції ядерного синтезу та ін.) [2]. Ці відкриття не тільки докорінно змінили за останні більш ніж 80 років життя людського суспільства на землі, але й відкрили перед людством ще до кінця не реалізовані можливості щодо освоєння практично невичерпних джерел енергії.

Важка вода знайшла багато застосувань. Одним із головних стало її використання в важководних ядерних реакторах як сповільнювача нейтронів і теплоносія. Для заповнення такого реактора йде до 100–200 тонн важкої води. Вважають, що важка вода зіграє велику роль у промисловому термоядерному синтезі в майбутньому.

При сьогоднішніх технологіях здобування важкої води (ізотопний обмін, електроліз і спалювання збагаченого дейтерієм водню) вартість її на світовому ринку становить близько \$100 – 200 за 1 кг. Проте її виробництво щорічно сягає кілька тисяч тонн.

Зауважимо, що до 1946 року єдиним методом, що застосовувався для збагачення природної води, був її електроліз, при якому молекули «легкої» води розкладаються на кисень і водень-протій легше, ніж молекули важкої води на кисень і водень-дейтерій. У результаті такого процесу в електролітичних ваннах накопичується важка вода або, іншими словами, підвищується її концентрація. Процес електролізу досить енергоємний. Тому на сучасних виробництвах на першій стадії концентрування застосовується двотемпературна протитоккова сірководнева технологія ізотопного обміну з вихідною концентрацією важкої води 5–10 %. І вже на другій стадії - каскадний електроліз розчину лугу при температурі близько 0 °С з вихідною концентрацією важкої води 99,75–99,995 %.

Після 1946 року отримала промислове застосування теж досить енерговитратна технологія, пов'язана з ректифікацією рідкого водню [3]. Одне з виробництв, що використовувало цю технологію, було введено в експлуатацію в жовтні 1965 року на ДХК – Дніпродзержинському хімічному комбінаті (нині ПАТ «Дніпроазот», а м. Дніпродзержинськ нині перейменоване на м. Кам'янське). Саме для підвищення енергоефективності цього виробництва і була створена система, що тут розглядається.

3. Загальний опис виробництва важкої води на ДХК

Виробництво носило закритий характер. Відкритою назвою його було «Виробництво доочищення газу (ВДГ)».

Блок-схема ВДГ представлена на рис. 1. Виробництво складалося з двох цехів («А» і «Б») довжиною 300 метрів, шириною метрів у 50 і висотою в багатопверховий будинок. Вхідною сировиною для ВДГ служила на ДХК азото-воднева суміш (АВС), що призначалася для синтезу аміаку.

Цех «Б» ВДГ – технологічний – містив три ступеня розділення ізотопів водню і установку по спалюванню дейтерію і отриманню важкої води. АВС перед надходженням у цех «Б» проходила каталітичне очищення від можливої домішки кисню (O_2) у спеціальній установці.

**Блок-схема виробництва важкої води
(ВДГ - виробництво доочищення газу)**

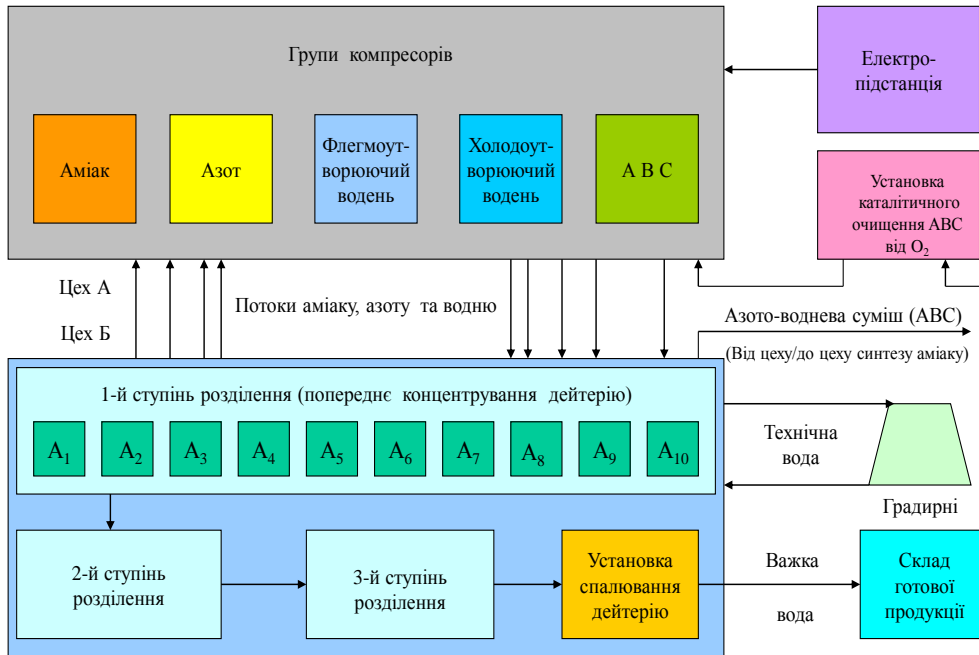


Рис. 1. Блок-схема ВДГ

**Спрощена технологічна блок-схема
ступеня попереднього концентрування дейтерію**

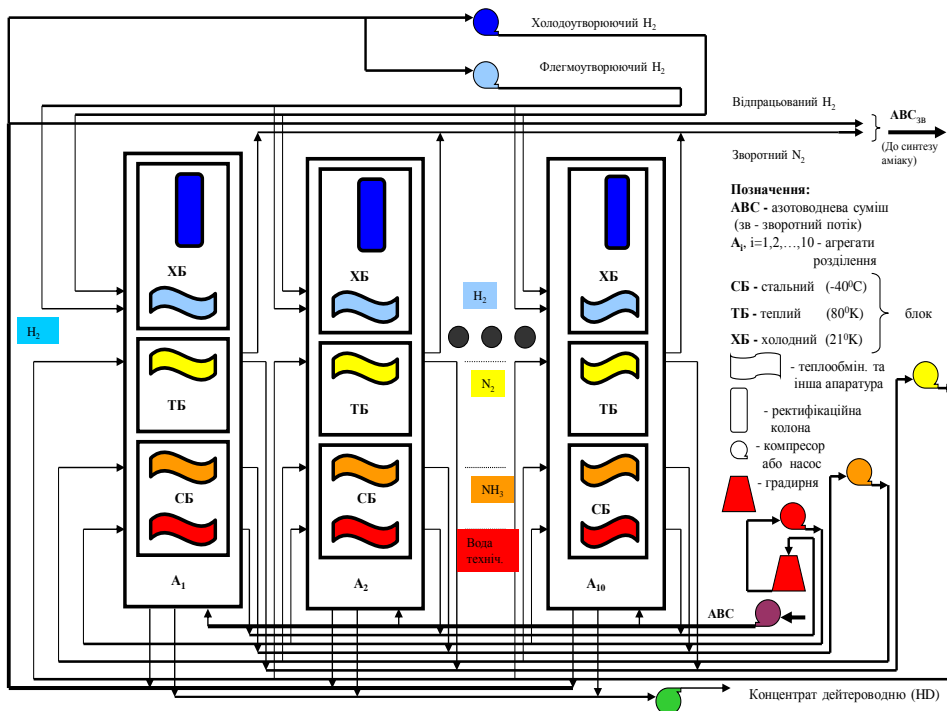


Рис. 2. Блок-схема 1-го ступеня розділення ізоотопів водню
(ступеня попереднього концентрування дейтерію)

Другий і третій ступені розділення являли собою установки, які споживали порівняно незначну кількість енергії. Перший ступінь (рис. 2) складався з 10 агрегатів (A1 ,..., A10), кожен з яких містив близько 50-ти апаратів із різними технологічними процесами (реактори каталітичного очищення поділюваної суміші від домішки кисню, безліч різних типів теплообмінників, адсорбери-десорбери азоту, детандери, турбодетандер на потоці розділюваного водню і, як «серце», – ректифікаційну колону з 80-тю ситчатими тарілками).

Агрегати обслуговувалися чотирма холодильними циклами: «оборотної води» з величезними дерев'яними «вежами» (градирнями), рідкого аміаку (NH_3), як на льодовому стадіоні, рідкого азоту (N_2) і холодоутворюючого водню (H_2).

Всі технологічні апарати в кожному агрегаті розділення були розподілені по трьох блоках: СБ – «сталевому» (де температури потоків мали перепад від високих, близько 2-3 сотень градусів за Цельсієм, до температури кипіння рідкого аміаку (близько -40°C)), ТБ – «теплому» (?!) (з діапазоном температур від -40°C до температури кипіння рідкого азоту (близько -193°C)) та ХБ – «холодному» (з діапазоном температур від -193°C до температури кипіння рідкого водню (близько -252°C)). Відповідно до цих діапазонів температур, технологічне обладнання було виготовлено з різних матеріалів: від звичайної холоднокатаної сталі у «сталевому» блоці до міді в «холодному» блоці.

Підтримання балансу «холоду» в «холодному» блоці (рис. 3) кожного агрегату розділення досягалося регулюванням рівня рідкого водню в кубі (К) ректифікаційної колони (РК).

Спрощена технологічна блок-схема
«холодного» блока

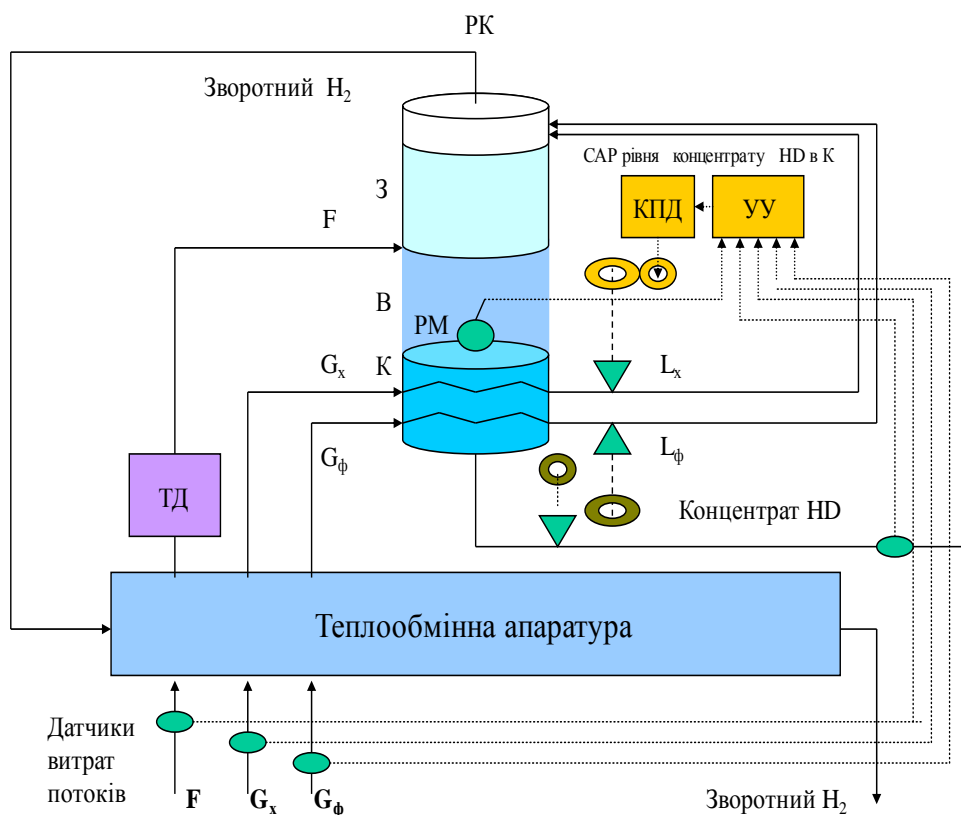


Рис. 3. Блок-схема «холодного» блока

Це здійснювалося зміною подачі в колону потоку холодоутворюючого водню $G_x = \bar{G}_x$, який, після проходження серії теплообмінників у трьох блоках (СБ, ТБ, ХБ) з охолодженням зворотним потоком відпрацьованого потоку водню, проходив через зміювки куба колони як останній ступінь охолодження. Після дроселювання через голчастий клапан з тиску 200 атмосфер до приблизно 1,4 атмосфери він перетворювався в паро- (газо-) рідинний потік з вмістом близько 95% рідкої фази L_x . Потік $G_\phi = \bar{G}_\phi$ флегмоутворюючого водню, надходячи в колону за приблизно такою ж схемою, давав лише 63% рідкої фази L_ϕ так, як дроселювався тільки з тиску близько 3–4 атмосфер; але подача цього потоку у багато разів перевищувала подачу попереднього. На рис. 3 \bar{F} , \bar{G}_x і G_ϕ – значення вимірюваних на вході ХБ потоків F , G_x і G_ϕ , що надходили в РК. Якщо \bar{F}_a , $\bar{G}_{a,x}$ і $\bar{G}_{a,\phi}$ – значення відповідних потоків на вході в агрегат розділення ($A_i, i=1, \dots, 10$), то $\bar{G}_{a,x} = \bar{G}_x$ і $\bar{G}_{a,\phi} = \bar{G}_\phi$, а

$$\bar{F} = \beta_{H,f} * \bar{F}_a, \quad (1)$$

де $\beta_{H,f}$ – частка водню в АВС.

Збіднений дейтерієм газовий потік водню з верху ректифікаційних колон усіх 10-ти агрегатів надходив у загальний колектор, стискувався в компресорах холодо- та флегмоутворюючого водню з обмеженою продуктивністю і потім знову розподілявся між усіма агрегатами. Це призводило до необхідності розгляду всього ступеня попереднього концентрування дейтерію як єдиного технологічного комплексу.

1-й ступінь розділення ізотопів водню дозволяв змінити концентрацію дейтерію від природної $\sim 0,0156\%$ (або $15,6\gamma$, де $\gamma=10^{-5}$) до $4,5\%$ (об'ємних). Ця концентрація визначалася за дейтероводнем HD і становила 9% (об'ємних), оскільки молекул D_2 чистого дейтерію при малих його концентраціях у загальному потоці водню майже не існує: дейтерій у молекулах «розбавляється» протієм Н.

Цех «А» ВДГ (рис. 1) містив близько 20 потужних компресорів із приводами від електродвигунів, що споживали на добу близько 1,2 млн кіловат-годин електроенергії від спеціальної електропідстанції, встановленої по сусідству з цехом «А». Компресори забезпечували стиснення до одиниць, десятків і сотень атмосфер потоків газової АВС, газоподібного аміаку, азоту, флегмо- та холодоутворюючого водню.

4. Коротка характеристика АСУТП ПДГ

Згідно з проектом ВДГ, розробленим у Радянському Союзі ГІАП – Головним інститутом азотної промисловості, м. Москва, вміст (об'ємний) атомів дейтерію в потоці відпрацьованого (збідненого дейтерієм) водню, що покидав ступінь попереднього концентрування дейтерію, повинен був становити $1,4\gamma$ (тобто $1,4 \times 10^{-5}$).

Фактично ж цей вміст за 4 роки роботи ВДГ (до початку 1970 р.) вдалося довести тільки до $2,3\gamma$, що відповідало $93,7\%$ від проектного (100%) ступеня вилучення.

Проблему збільшення ступеня вилучення дейтерію до проектного намагалися вирішити і працівники ВДГ, і центральний ГІАП, і Дніпродзержинська філія ГІАП, і створена на ДХК спеціальна дослідницька лабораторія при ВДГ. Де тільки не шукали «помилку». Існувала навіть така версія: фізики невірно визначили властивості ізотопів водню за летючістю в неідеальній суміші протію та дейтерію.

На виробництві весь час щось удосконалювалося. Щорічно колектив ВДГ брав на себе зобов'язання щодо збільшення випуску продукції (важкої води) на $0,1\%$.

Один із шляхів вирішення зазначеної проблеми бачився керівництву ВДГ (і ДХК) у створенні більш досконалої системи управління виробництвом і, насамперед, у побудові АСУТП – Автоматизованої системи управління технологічними процесами.

Для цього на ВДГ у 1970 році була придбана УОМ УМ-1 об'ємом 4 кілослов (8 кілобайт) оперативної пам'яті і 6 кілослов (12 кілобайт) пам'яті ПЗП (постійного запам'ятовуючого пристрою) і силами працівників служби КВПіА (Контрольно-вимірювальних приладів і автоматики) ВДГ почалося створення підсистеми збору оперативної інформації (показань датчиків витрат потоків, тисків і температур) з погодинним друкуванням даних на спеціальній паперовій стрічці (рис. 4). Програми для УОМ були написані і налагоджені програмістом ВДГ Ю.К. Авіловим, який працював раніше апаратником на одному з агрегатів розділення ізотопів водню на ВДГ.

Далі цю підсистему будемо визначати як підсистему 1 АСУТП.

Створення у складі АСУТП ВДГ системи оптимізації режимів роботи ступеня попереднього концентрування дейтерію, яка, можливо, допомогла б вирішити проблему досягнення 100-відсоткового (до проектного) рівня вилучення дейтерію з сировини (нагадаємо, АВС), що надходила на переробку на ВДГ, було запропоновано керівництвом ВДГ ДХК відділу синтезу управляючих систем (СУС) Інституту кібернетики (ІК), яким завідував доктор технічних наук, професор В.І. Іваненко.

Підставою для такої пропозиції послужили результати, отримані групою співробітників цього відділу в 1964–1969 рр. по автоматизації та оптимізації режимів ректифікаційних установок у відділенні ректифікації цеху етилбензолу ДХК [4–9]. У відділі СУС була виділена неструктурна лабораторія для виконання робіт із ВДГ (керівник групи/лабораторії, провідний інженер, старший науковий співробітник ІК Д.В. Караченець, який захистив у 1967 р. кандидатську дисертацію з цієї теми [4]).

Однак, у зв'язку зі скороченням бюджетного фінансування Академії наук і ІК, а у відділі СУС ще у більшій мірі, роботи з відділу СУС були перенесені у Спеціальне конструкторське бюро математичних машин і систем (СКБ ММС) ІК у створений відділ № 88 «Математичне та алгоритмічне забезпечення АСУТП».

5. Передпроектні дослідження ВДГ

Виконані колективом співробітників відділу № 88 СКБ ММС науково-дослідні роботи по синтезу оптимальної АСУТП ВДГ включали:

- 1) аналіз ВДГ у цілому як об'єкта управління (ОУ);
- 2) аналогічний аналіз ступеня попереднього концентрування дейтерію (1-го ступеня розділення ізотопів водню);
- 3) розроблення математичних моделей технологічних процесів на ВДГ;
- 4) дослідження математичної моделі процесу розділення ізотопів водню в РК агрегатів розділення 1-го ступеня;
- 5) синтез системи оптимізації 1-го ступеня розділення як адаптивної системи управління (СУ);
- 6) розроблення САР рівня рідкого водню в кубі РК.

У роботах по пп. 1 і 5 брав участь співробітник відділу СУС М.В. Андреев, нині доктор фізико-математичних наук, професор кафедри, який працює в Інституті прикладного системного аналізу (ІПСА) Національного технічного університету України (НТУУ) «Київський політехнічний інститут» (КПІ) імені І. Сікорського.

Виконаний аналіз за пп. 1 і 2 показав, що задачу оптимізації режимів роботи технологічного устаткування ВДГ при максимально допустимих навантаженнях на агрегати розділення A_1, \dots, A_{10} (рис. 1) по АВС слід вирішувати за двома напрямками: зниження енерговитрат на переробку АВС і збільшення ступеня вилучення з неї дейтерію. Так, при дотриманні обмежень на тепломісткість потоків, що надходять у «холодні» блоки агрегатів роз-

ділення, за першим критерієм (зниження енерговитрат) можна було розглядати задачі управління холодильними циклами в цих агрегатах, а з ними і питання оптимізації управління компресорним обладнанням цеху «А».

Вирішення всіх завдань стало можливим після глибокого теоретичного дослідження технологічних процесів в умовах глибокого холоду (до -252°C) з математичним моделюванням як процесу ректифікації ізотопів водню, так і складних хіміко-технологічних схем кожного агрегату і всього 1-го ступеня розділення ізотопів водню (пп. 3 і 4).

Дослідження математичної моделі ректифікаційних колон було виконано начальником сектора № 1 відділу № 88 Л.Н. Ткаченком з працівниками під керівництвом начальника відділу [10]. Як аспірант-заочник (науковий керівник по аспірантурі Д.В. Караченець) Л.Н. Ткаченко по даній темі в 1975 р. захистив кандидатську дисертацію [11]. Для розробки методів розрахунку складних схем М.В. Андрєєвим і Д.В. Караченцем попередньо було виконано чимало досліджень [12, 13]. У розробці комплексу програм для таких розрахунків у проведенні самих розрахунків та аналізі отриманих результатів активну участь брав провідний конструктор сектора № 1 Є.П. Поздняков. Розроблення математичних моделей компресорів цеху «А» і їх дослідження виконав другий провідний конструктор сектора № 1 П.Д. Козьмін. Розробкою математичних моделей інших технологічних апаратів агрегатів розділення займалися інженери-конструктори А.М. Гузова, Ю.В. Колесник, С.В. Колодко, З.П. Мельникова, В.М. Мороз, О.В. Хоменко.

Результатом виконаних досліджень по економії енерговитрат на ВДГ з'явився ряд пропозицій керівництву ВДГ щодо вдосконалення регламенту роботи технологічного устаткування цехів «А» і «Б».

Основні ж зусилля колективу розробників у подальшому були спрямовані на створення системи оптимізації режимів роботи ступеня попереднього концентрування дейтерію як адаптивної СУ (рис. 4).

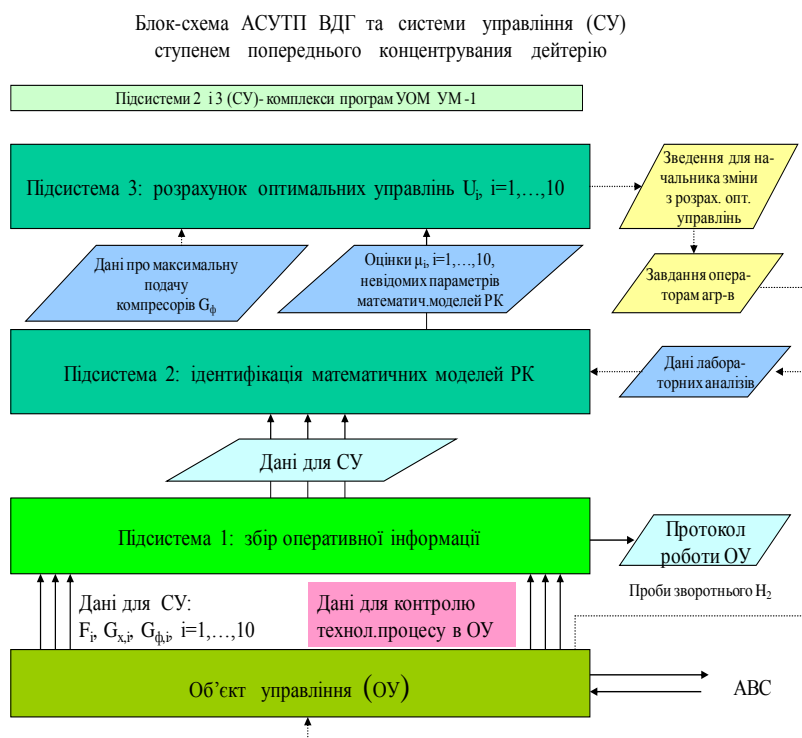


Рис. 4. Блок-схема АСУТП ВДГ з адаптивною СУ 1-го ступеня розділення

Така СУ була реалізована у вигляді двох підсистем АСУТП ВДГ:
– підсистеми 2 ідентифікації математичних моделей РК (в агрегатах розділення);

– підсистеми 3 розрахунку з використанням ідентифікованих математичних моделей РК оптимальних управлінь U_i як витрат флегмоутворюючого водню, що подавався в PK_i , $i = 1, \dots, 10$, з сумарним обмеженням ресурсом.

На розробку і налагодження окремих програм для УМ-1 чимало зусиль витратив провідний конструктор сектора № 1 Г.Е. Масальський. Фрагменти програм відпрацьовувалися попередньо в оперативній пам'яті УМ-1 і в подальшому їх «зашивали» в ПЗП, що забезпечувало високу надійність роботи всієї системи.

Оскільки в системі оптимізації режимів 1-го ступеня розділення передбачалося регулярне (мінімум один раз у зміну) коригування витрат флегми, що подавалася в агрегати розділення, то необхідно було заздалегідь подбати про створення системи автоматичного регулювання (САР) рівня рідкого водню в кубі ректифікаційної колони, яка звільнила б операторів (апаратників) агрегатів від ручного регулювання.

Регулювання рівня голчастим клапаном здійснювалося оператором через довгий (близько 3-х метрів) шток. В САР приводом (рис. 3) для штока був КПД – «кроковий» пневматичний двигун, розроблений Черчикською (м. Черчик, Узбекистан) філією ДКБА (Дослідно-конструкторського бюро автоматики Міністерства хімічної промисловості СРСР, яке в радянські часи очолював майбутній мер м. Москви Ю.М. Лужков). Вибір КПД як привід штока в даній САР визначався тим, що ВДГ було виробництвом з високим рівнем пожежо- і вибухонебезпечності. Пневматичний сигнал керування для «крокового» двигуна вироблявся в керуючому пристрої (УУ – управляючому пристрої, рис. 3) САР за спеціальним алгоритмом на основі показань ряду датчиків значень параметрів «холодного» блока: рівня рідкого водню в кубі РК, формованого рівнеміром РМ; показань датчиків вхідних (для ХБ) витрат \bar{F} , \bar{G}_x і \bar{G}_ϕ і вихідної витрати – «концентрату HD» на рис. 3. Тут \bar{F} – витрата водню, виділеного в ТБ з потоку АВС, який після проходження теплообмінної апаратури в ХБ остаточно охолоджувався до точки роси в турбодетандері (ТД) і подавався на тарілку «живлення» РК (живлення потоком водню, що розділяється), яка ділила ректифікаційну колону на вичерпну В та зміцнюючу З секції (рис. 3).

Дана САР була захищена авторським свідоцтвом [14].

Розробка і впровадження СУ проводилися за чітким графіком: кожний квартал – черговий етап роботи і по ньому – науково-технічний звіт. І тільки за захищеним звітом – оплата виконаних робіт по етапу. Всього було випущено близько 20 таких звітів. Наукових же публікацій у відкритій пресі співробітниками відділу № 88 було надруковано мало через закритий характер робіт, що виконувалися.

6. До питання щодо використання математичної моделі в АСУТП ВДГ

Проведені на ВДГ дослідження привели автора статті, який керував (і науково, і організаційно) роботами по створенню оптимальної АСУТП для ВДГ, до висновку, що непорозуміння, пов'язані з недостатнім рівнем вилучення дейтерію і, як наслідок, недоотриманням виробництвом товарного продукту (важкої води), були викликані, в першу чергу, похибками датчиків витрати газів (рис. 3) в умовах глибокого холоду (при температурі -193°C) і недосконалістю управління агрегатами 1-го ступеня розділення. Дійсно, діафрагми датчиків витрати потоків в агрегатах розділення, проходячи «повірку» в умовах нормальних температур, при «зануренні» в низькі температури починали, мабуть, деформуватися, приводячи до похибок, як потім зробили висновок автор зі своїми колегами, у -15% , -10% ÷ $+10\%$, $+15\%$. У той же час процес ректифікації, як знають фахівці в цій галузі, дуже чутливий до флегмового числа (співвідношення потоку флегми, що повертається з верху колони на її зрошення, з потоком поділюваної суміші, що надходить ззовні в колону). Залежність концентрації дейтерію у відпрацьованому газі, як слід було очікувати [4], повинна носити майже експоненціальний характер у робочій області. Збільшення флегмового числа змен-

шувало, але не набагато, вміст дейтерію у відпрацьованому газі. Зменшення ж флегмового числа на ту ж величину призводило до значно більшого збільшення вмісту дейтерію в ньому (рис. 5).

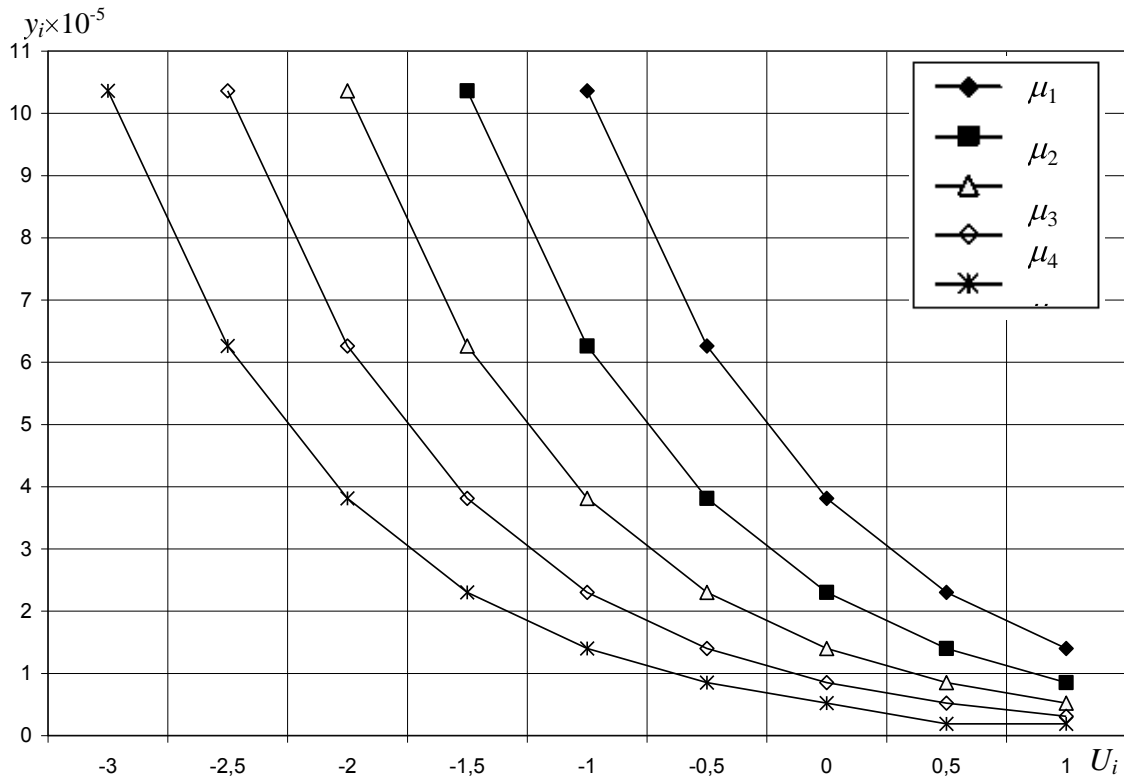


Рис. 5. Графіки залежності концентрації y_i в γ от безрозмірних значень управляючих U_i дій для різних значень збурень $\bar{\mu}_i$: $\mu_1 = -2$, $\mu_2 = -1$, $\mu_3 = 0$, $\mu_4 = 1$, $\mu_5 = 2$

Крім того, як було виявлено при обробці великого статистичного матеріалу, накопиченого за режимами роботи однієї з ректифікаційних колон, глибина розділення ізотопів у колоні при всіх стабільних значеннях витрат потоків, що надходили в колону, була піддана «дрейфу». У перекладі на флегмове число зміни останнього виглядали як випадковий процес, для якого підходила модель так званого в теорії випадкових процесів марківського процесу. Пояснення автор бачив у зміні ККД – коефіцієнта корисної дії тарілок, оскільки рівень рідкого водню на тарілках становив усього 2,5 см. При вібрації ректифікаційних колон від компресорів, що працювали в цеху «А», вібрувала рідина на тарілках і за нелінійного характеру гідродинамічних і масообмінних процесів, які проходили на кожній тарілці, змінювався, на думку автора, і ККД тарілок.

На «дрейф» флегмового числа РК кожного агрегату розділення накладалися загальний для всіх агрегатів «дрейф» частки $\beta_{n,f}$ (1) водню в АВС, а також зміни в тепломісткості газових потоків \bar{F} , \bar{G}_x і \bar{G}_ϕ (рис. 3), що надходили в РК і залежали від режимів роботи устаткування в усіх блоках (СБ,ТБ і ХБ) конкретного агрегату.

Технологія управління, що була прийнята раніше на ВДГ, зводилася до простого алгоритму: «кожній сестрі по сережці», тобто, порівну, як правило, між усіма агрегатами розділення розподілявся потік азото-водневої суміші, що надходив на ВДГ, і порівну – потік флегми, ресурс якої був обмежений продуктивністю двох компресорів флегмоутворюючого водню. Зрозуміло, що всі розподіли проводилися за фактичними показами витратомірів газу, який розділявся, і флегмоутворюючого водню. Однак в силу похибок вимірю-

вань, фактичні флегмові числа для різних колон відрізнялися один від одного випадковим чином, що в цілому по всьому ступеню попереднього концентрування дейтерію призводило до зменшення глибини його вилучення.

Вирішити описану проблему стало можливим за рахунок створення адекватної задачі і реальним можливостям її використання математичної моделі ректифікаційних колон агрегатів розділення ізотопів водню. Така модель будувалася у два етапи.

Спочатку, на основі фізичних законів, проводився детальний математичний опис процесів, що відбувались в РК та в пов'язаному з нею технологічному устаткуванні (створювалася, скажімо, «повна» модель), розроблялися програми для розрахунку таких процесів (такої моделі) на цифрових ЕОМ і, насамперед, на ЕОМ (рус.) БЭСМ-6, яка була встановлена і експлуатувалася в ІК (мова програмування ФОРТРАН), проводилися експериментальні дослідження режимів роботи колон агрегатів розділення на ВДГ (головним чином, на РК агрегату A_3 , рис. 1, і вибірково на РК інших агрегатів), оброблялися експериментальні дані і уточнювалися параметри «повної» моделі РК і збурюючих впливів.

На другому етапі шляхом розрахунків режимів РК при її «повній» моделі отримували вхідні дані для визначення параметрів «спрощеної» моделі, що обиралася. Розглядалися різні варіанти такої моделі.

Початкова «спрощена» дискретна математична модель для визначення концентрації $y_{i,s}$ у газовому потоці збідненого дейтерієм водню зверху i -ї РК, $i = 1, \dots, 10$, що працює в стаціонарному, основному режимі роботи 1-го ступеня розділення, на s -му такті мала вигляд [15]:

$$y_{i,s} = \alpha_y \exp[-b_y(1 - \mu_{i,s})(l_{i,s}^3 / f_{i,s} + l_{i,s}^3)], \quad (2)$$

де $\alpha_y > 0$, $b_y > 0$ – постійні коефіцієнти;

$l_{i,s}^3$ – рідкий потік зрошення, який надходив на верхню тарілку i -ї РК на s -му такті;

$f_{i,s}$ – газовий потік, охолоджений в i -му турбодетандері до точки роси, що подавався на тарілку живлення i -ї РК на s -му такті (тут f – значення потоку F , рис. 3);

$\mu_{i,s}$ – неконтрольоване випадкове збурення, що впливало на процес розділення ізотопів водню в i -ї РК на s -му такті (для різних i, j величини $\mu_{i,s}$ і $\mu_{j,s}$ приймалися незалежними).

Для опису процесу зміни $\mu_{i,s}$ використовувалася модель стаціонарного дискретно-безперервного марківського процесу з перехідною щільністю ймовірності, яка визначалася виразом

$$p(\mu_{i,s} / \mu_{i,s-1}) = \frac{1}{\sigma_\mu \sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{(\mu_{i,s} - \alpha_\mu \mu_{i,s-1})^2}{2\sigma_\mu^2}\right\}, \quad (3)$$

де $0 < \alpha_\mu < 1$.

У (3) для параметрів α_μ і σ_μ індекс « i » опущений, оскільки їх значення після вибірових перевірок були прийняті для всіх агрегатів однаковими.

Майже контрольовані змінні $l_{i,s}^3$ і $f_{i,s}$ в (2) являли собою режимні параметри і при розв'язанні задач ідентифікації математичних моделей ректифікаційних колон RK_i , $i = 1, \dots, 10$, були пов'язані з витратами потоків, що вимірювались датчиками підсистеми 1 збору оперативної інформації АСУТП (рис. 4) виразами

$$f_{i,s} = F_{i,s}, \quad (4)$$

$$l_{i,s}^3 = L_{\phi,i,s} + L_{x,i,s} = 0,63G_{\phi,i,s} + 0,95G_{x,i,s}, \quad (5)$$

де $L_{\phi,i,s}$ та $L_{x,i,s}$ – рідинні витрати потоків флегмо- і холодоутворюючого водню, відповідні до потоків L_{ϕ} і L_x на рис. 3.

При вирішенні в підсистемі 3 АСУТП задачі оптимального розподілу ресурсу флегмоутворюючого водню між агрегатами 1-го ступеня розділення ізотопів водню потік $G_{x,i,s}$ холодоутворюючого водню для i -ї РК на s -му такті знаходився з виразу

$$G_{x,i,s} = \beta_{i,s-1} + \beta_{i,s-1}^f F_{i,s} + \beta_{i,s-1}^{\phi} G_{\phi,i,s}. \quad (6)$$

Коефіцієнти $\beta_{i,s-1}$, $\beta_{i,s-1}^f$, $\beta_{i,s-1}^{\phi}$ в (6) уточнювалися програмами підсистеми 2 АСУТП (підсистеми ідентифікації математичних моделей РК) за даними вимірювань підсистеми збору оперативної інформації з використанням рекурентного методу найменших квадратів [16].

Лабораторні аналізи $\tilde{y}_{i,s}$ концентрацій $y_{i,s}$, що займали кілька годин, проте приводили до значних похибок:

$$\tilde{y}_{i,s} = y_{i,s} + h_{i,s}, \quad (7)$$

де похибки вимірювань $h_{i,s}$ були підпорядковані нормальному закону з нульовим математичним очікуванням (м. о.) і середньо-квадратичним відхиленням (с.к.в.) $\sigma_h = 0,2\gamma$. Для різних i та j похибки $h_{i,s}$ і $h_{j,s}$ – незалежні випадкові величини.

7. Опис загального алгоритму функціонування адаптивної СУ і її підсистеми ідентифікації математичних моделей РК

Кожний момент часу (такт) s в (2) – (7) відповідав одній зміні роботи на ВДГ, що тривала 8 годин. До початку кожної зміни s оператор УОК – управляючого обчислювального комплексу (ОУОК) отримував з лабораторії результати аналізів газових потоків з верху РК агрегатів, проби для яких відбиралися на початку попередньої зміни ($s-1$) і аналіз їх, як вказано вище, тривав кілька годин (близько 6 годин). ОУОК проводив їх обробку за допомогою програм підсистеми 2 АСУТП (рис. 4).

Як правило, аналізи в кожену зміну проводилися не на всіх агрегатах, але протягом доби (трьох змін) кожний агрегат зазнавав такого аналізу не менше одного разу. Що ж стосувалося вмісту дейтерію в загальному потоці «відпрацьованого» водню, то він визначався кожну зміну, хоча його значення не використовувалися в розрахунках, а слугували тільки для контролю ходу технологічних процесів у цілому по всьому ступеню попереднього концентрування дейтерію.

На початку зміни начальник зміни (НЗ), виходячи з власної оцінки стану агрегатів і планового завдання для виробництва, вказував ОУОК навантаження $\bar{F}_{a,i,s}$, $i=1, \dots, k$, де k – кількість працюючих агрегатів ($k \leq 10$), по потоку АВС на кожний агрегат в s -у зміну. (Як правило, працювали всі 10 агрегатів). Потоки $\bar{F}_{a,i,s}$ визначали навантаження $f_{i,s}$ ((2), (4)) для РК _{i} по потоку водню, що поділявся. В УОК коректувався, при необхідності, і ресурс $G_{\phi,s}$ (G_{ϕ} , рис. 4) флегмоутворюючого водню. За допомогою програм підсистеми 3 АСУТП ОУОК здійснював розрахунок оптимального розподілу ресурсу $G_{\phi,s}$ між агрегатами:

$$G_{\phi,s}^{onm} = G_{\phi,1,s}^{onm} + G_{\phi,2,s}^{onm} + \dots + G_{\phi,k,s}^{onm} = G_{\phi,s} \quad (8.1)$$

з урахуванням обмеженої продуктивності компресорів флегмоутворюючого водню:

$$\sum_{i=1}^k G_{\phi,i,s}^{om} \leq G_{\phi,s}. \quad (8.2)$$

НЗ видавав оператору кожного i -го агрегату (OA_i) завдання по потоках $\bar{F}_{i,s}$ і $G_{\phi,i,s}^{om} = \bar{G}_{\phi,i,s}$. Після виконання завдань OA_i регулював, якщо необхідно, витрату холодоутворюючого водню $G_{x,i,s}$ до досягнення стабільного рівня рідкого водню в кубі РК i -го агрегату.

Про досягнення стабільного режиму в A_i за рахунок ручного або за рахунок автоматичного регулювання при встановленій на i -му агрегаті САР, OA_i повідомляв ОУОК. Останній за допомогою програм підсистеми 2 АСУТП проводив коригування коефіцієнтів $\beta_{i,s}$, $\beta_{i,s}^f$ і $\beta_{i,s}^\phi$, які входять у вираз (6), для використання їх на наступному такті ($s+1$). При розрахунку ж оптимальних значень $G_{\phi,i,s}^{om}, i=1, \dots, k$, витрат флегмоутворюючого водню для РК $_i$ кожного, що знаходився в роботі, агрегату значення холодоутворюючого водню визначалися згідно з (6) при значеннях $\beta_{i,s-1}$, $\beta_{i,s-1}^f$ і $\beta_{i,s-1}^\phi$ зазначених коефіцієнтів, які були отримані до s -го такту.

Адаптивна СУ (що складалася з програмних підсистем 2 і 3 в АСУТП, рис. 4) створювалася як оптимальна стохастична система, яка повинна була забезпечувати мінімум функціоналу середніх очікуваних втрат дейтерію в кожному майбутню зміну s у вигляді

$$\rho_s = \lim_{n=1,2,\dots} \frac{1}{n} \sum_{t=s}^{n+s-1} R_t, \quad (9)$$

де питомий ризик

$$R_t = M\{y_t\}. \quad (10)$$

Тут M – символ математичного очікування випадкових величин $y_t, t = s, (s+1), \dots$

У свою чергу, концентрація дейтерію y_s у відпрацьованому газі, що служила показником ефективності режиму ступеня попереднього концентрування дейтерію на s -му такті, визначалася як

$$y_s = \frac{\sum_{i=1}^k V_{i,s} y_{i,s}}{\sum_{i=1}^k V_{i,s}}, \quad (11)$$

де $V_{i,s}$ – загальний потік збідненого дейтерієм водню, що залишав i -у РК на s -му такті, визначався досить точно за виразом

$$V_{i,s} = F_{i,s} + (G_{\phi,i,s} - L_{\phi,i,s}) + (G_{x,i,s} - L_{x,i,s}). \quad (12)$$

Величини $y_{i,s}, i = 1, 2, \dots, k, (k \leq 10)$ в (11), що визначали концентрацію дейтерію в потоці $V_{i,s}$ і що піддавались дії згідно з (2), випадкових збурень $\mu_{i,s}$, були випадковими величинами.

При відсутності спостережень за збуреннями $\mu_{i,s}, i = 1, 2, \dots, k, (k \leq 10)$, які являли собою марківські (умовні) процеси (3), вони повинні були сприйматися стороннім спостерігачем (у даному випадку адаптивною СУ, що розглядається) як випадкові (незалежні) величини, законами розподілу ймовірностей (щільності ймовірностей) яких були кінцеві (безумовні) закони розподілу, що породжуються процесами (3). Такі закони були нормальні-

ми (гаусівськими) законами, в яких математичне очікування дорівнює 0, а середньоквадратичне відхилення

$$m_{\mu\infty}=0; \sigma_{\mu\infty}=\frac{\sigma_{\mu}}{\sqrt{1-\alpha_{\mu}^2}}. \quad (13)$$

Таким чином, перед запуском у роботу підсистеми 2 у складі АСУТП (підсистеми ідентифікації моделей РК в СУ) апріорна інформація про неконтрольовані збурення $\mu_{i,s}, i=1,2,\dots,k, (k \leq 10); s=1$ технологічних процесів в РК могла бути представлена повністю нормальними законами розподілу цих величин $N(\mu_{i,s}; m_{i,s}, D_{i,s})$ з двома достатніми статистиками $m_{i,s} = m_{i,1}$ і $D_{i,s} = D_{i,1}$, де «m» і «D» – символи м.о. і дисперсії (квадрата с.к.в.):

$$m_{i,1} = 0, i = 1, 2, \dots, k, (k \leq 10), \quad (14)$$

$$D_{i,1} = (\sigma_{\mu\infty})^2. \quad (15)$$

Після введення в підсистему 2 даних про результати $\tilde{y}_{i,1}$ аналізів, пов'язаних співвідношеннями (7) з величинами $y_{i,1}$ вмісту дейтерію у пробах, які були відібрані з газових потоків з верху РК_i, $i = 1, 2, \dots, k$, на початку такту $s = 1$ (1-ї зміни) могли бути перевизначені апостеріорні закони розподілів імовірностей збурень $\mu_{i,1}$. Згідно з (2), вони повинні мати досить складний вид. Зберігання знань про них вимагало б значних ресурсів оперативної пам'яті УОМ УМ-1 в АСУТП ВДГ, яка була надто обмежена (усього 8 кілобайт).

Тому при статистичній обробці даних $\tilde{y}_{i,s}$ (7) залежності (2), що описують «спрощені» математичні моделі РК, «спрощувалися» ще далі, і замість «досить точних» залежностей (2) використовувалися їх наближення [4–7]:

$$y_{i,s} = A \exp[B\mu_{i,s} + C\bar{U}_{i,s}], \quad (16)$$

де $B = b_y(l_{on}^3 / f_{on} + l_{on}^3)$;

$$C = -b_y | f_{on} ;$$

$$A = a_y \exp[-b_y(l_{jn}^3 / f_{on} + l_{on}^3)] = a_y \exp(-B).$$

Опорне «флегмове число» $(l_{on}^3 / f_{on} + l_{on}^3)$ визначалося через опорні значення потоків f_{on} (4) і l_{on}^3 (5) при максимальних навантаженнях агрегатів за потоками f . Управління $\bar{U}_{i,s}$, як поправки до «флегмових чисел», залежали від їх реальних значень по агрегатах. Значення управлінь $\bar{U}_{i,s}$, що розраховувались, однозначно були пов'язані з величинами потоків $\bar{G}_{\phi,i,s}$:

$$\bar{G}_{\phi,i,s} = G_{\phi,cr,on} + \bar{U}_{i,s}, \quad (17)$$

де $G_{\phi,cr,on}$ – деяке опорне значення для витрат флегмоутворюючого водню в РК, що визначалося як середнє значення ресурсу G_{ϕ} на один агрегат при всіх працюючих агрегатах ($k = 10$).

Залежність (16) далі наближалася лінеаризованою характеристикою в зоні практично найбільш можливих значень випадкової величини $\mu_{i,s}$, тобто в зоні її апріорного математичного очікування $m_{i,s}$ [6], що для $s = 1$ визначалося за всіма «i» як 0 (14). При цьому

умовний розподіл $p(\tilde{y}_{i,s} / \mu_{i,s}, \bar{U}_{i,s})$ міг бути представлений у вигляді нормального закону розподілу $N(\tilde{y}_{i,s}; \tilde{m}^{y_{i,s}}, \tilde{D}^{y_{i,s}})$ з м.о. і дисперсією, рівними

$$\tilde{m}^{y_{i,s}} = \frac{1}{\chi_{i,s}} \left(\frac{1}{B} m_{i,s} + \bar{U}_{i,s} \right), \quad (18)$$

$$\tilde{D}^{y_{i,s}} = \sigma_h^2. \quad (19)$$

Величина $\chi_{i,s}$ в (18) визначалася виразом

$$\chi_{i,s} = \frac{1}{AB \exp(Bm_{i,s} + C\bar{U}_{i,s})}. \quad (20)$$

При такій «локальній» лінеаризації моделей (2) РК апостеріорні закони розподілу збурень $\mu_{i,s}$, що знаходились з використанням формули Байеса, мали вигляд нормальних (гаусівських) законів зі статистиками $\tilde{m}_{i,s}$ та $\tilde{D}_{i,s}$, які визначалися виразами:

$$\tilde{m}_{i,s} = \frac{m_{i,s} - (\sigma_h^\chi)_{i,s}^2 + y_{i,s}^\chi D_{i,s}}{D_{i,s} + (\sigma_h^\chi)_{i,s}^2}, \quad (21)$$

$$\tilde{D}_{i,s} = \frac{D_{i,s} (\sigma_h^\chi)_{i,s}^2}{D_{i,s} + (\sigma_h^\chi)_{i,s}^2}, \quad (22)$$

де

$$y_{i,s}^\chi = \chi_{i,s} \tilde{y}_{i,s} + m_{i,s} - 1/B, \quad (23)$$

$$(\sigma_h^\chi)_{i,s}^2 = \chi_{i,s}^2 + \sigma_h^2. \quad (24)$$

Далі апріорні до моменту $(s+1)$ закони розподілу збурень $\mu_{i,s}$, які визначалися з урахуванням (3), теж носили характер нормальних законів зі статистиками:

$$m_{i,s+1} = \alpha_\mu \tilde{m}_{i,s}, \quad (25)$$

$$D_{i,s+1} = \alpha_\mu^2 \tilde{D}_{i,s} + \sigma_\mu^2. \quad (26)$$

Якщо на такті $s=1$ з РК агрегатів $j_1, j_2, \dots, j_p, (p \leq k)$ проби газу з верху колон для аналізів не відбиралися, то у виразі (25) і (26) як величини $\tilde{m}_{i,1}$ і $\tilde{D}_{i,1}$ бралися статистики $m_{i,1}$ і $D_{i,1}$ апріорних до такту $s=1$ розподілів відповідних збурень.

Далі процес обробки аналізів величин $y_{i,s}, i=1, 2, \dots, k, (k \leq 10), s=2, 3, \dots$, що визначали концентрацію дейтерію в газових потоках з верху РК, тривав аналогічно.

За виразами (18–26) неважко простежити, як управління, що приймалися в СУ на кроці s , позначалися на точності визначення збурень на майбутніх кроках. У цьому проявлявся дуальний характер управлінь $\bar{U}_{i,s}$, що вибиралися на кожному такті роботи адаптивної СУ.

8. Короткий опис підсистеми розрахунку оптимальних управлінь

Для зручності графічного представлення залежності (16) концентрації дейтерію y_i в газовому потоці, що залишав верх i -ї РК, від збурень μ_i та управлінь \bar{U}_i введемо масштабуючі множники η_μ і $\eta_{\bar{u}}$, які зв'яжуть нові змінні $\bar{\mu}_i$ і U_i зі старими μ_i і \bar{U}_i виразами:

$$\bar{\mu}_i = \eta_\mu \mu_i; U_i = \eta_{\bar{u}} \bar{U}_i, \quad (27)$$

а вираз (16) дозволять привести до виду

$$y_i = \bar{A} \exp(0,5\bar{\mu}_i + U_i), \quad (28)$$

де $\bar{A} = 1,4 \cdot 10^{-5} = 1,4\gamma$ і $y_i = 1,4\gamma$ при $\bar{\mu}_i = 0, U_i = 0$, що відповідало значенню, яке було закладено у проект ВДГ, розроблений ГІАП.

Нижче для прикладу вираз (28) представлено вибірково дискретними значеннями у вигляді табл.1 і графіків (рис. 5).

Таблиця 1. Таблиця залежності значень концентрацій y_i в $\gamma (= 10^{-5})$ від безрозмірних значень збурюючих $\bar{\mu}_i$ і керуючих U_i дій

$\bar{\mu}_i \setminus U_i$	-3,0	-2,5	-2,0	-1,5	-1,0	-0,5	0	0,5	1,0
-2	-	-	-	-	10,36	6,26	3,81	2,30	1,40
-1	-	-	-	10,36	6,26	3,81	2,30	1,40	0,85
0	-	-	10,36	6,26	3,81	2,30	1,40	0,85	0,52
1	-	10,36	6,26	3,81	2,30	1,40	0,85	0,52	0,31
2	10,36	6,26	3,81	2,30	1,40	0,85	0,52	0,31	0,19

Якщо уявити, що кожне з п'яти наведених значень збурень $\bar{\mu}_i$ (-2, -1,0,1,2) діє на дві з десяти працюючих РК і що весь ресурс флегмоутворюючого водню фактично рівномірно розподілений між РК, чому відповідають значення управлінь $U_i = 0, i = 1,2,\dots,10$ (стовпець $U_i = 0$ таблиці або вісь ординат на рис. 5), то середнє значення величини y_i у критерії (10) склало б 1,78 γ , а не 1,40 γ (1,4 γ) при відсутності дії збурень ($\bar{\mu}_i = 0; i = 1,2,\dots,10$).

Додаткове підвищення концентрації дейтерію в потоці відпрацьованого водню, який залишав ВДГ, це, в даному випадку, швидше за все результат дії вібрації на колони та інших факторів («дрейфів»), про яких йшлося в розділі 6.

Якщо б зазначені «дрейфи» були відсутні, а «збурення» на процес у 1-му ступеню розділення ізотопів водню виникали тільки з-за похибок датчиків при вимірах витрат потоків (приведених до потоку флегмоутворюючого водню), то приблизну оцінку в погіршенні критерію (10) можна провести по рядку таблиці і графіку на рис. 5 для $\bar{\mu}_i = 0, i = 1,2,\dots,5$. Якщо прийняти, що для половини РК помилки у вимірах U_i приводили до значень $U_i = +1$, а для половини РК – до значень $U_i = -1$ (а це було близько до реальних значень), то показник ефективності (10) процесу на ступені попереднього концентрування дейтерію склав би 2,17 γ , що було близько до того, що фактично спостерігалось на ВДГ до моменту випробувань створеної адаптивної СУ.

З наведених таблиць і графіків видно, як вибір керуючих впливів у СУ повинен бути пов'язаний з отриманням максимально точних оцінок про діючі збурення на процес, що

забезпечувалося підсистемою 2 АСУТП на основі даних підсистеми 1 і даних лабораторних вимірювань величин $y_{i,s}$ (7) на кожному такті роботи СУ.

Програмної реалізації підсистеми 3 АСУТП передували всебічні дослідження задачі синтезу алгоритму управління СУ. Обмежений обсяг статті не дозволяє описати отримані тут результати. Щоб дати читачеві уявлення про проблеми, які виникають у такого роду задачах і про підходи до їх вирішення, автор відсилає читача до публікацій [6, 7].

Коротко робота зазначеної підсистеми може бути охарактеризована таким чином.

Відомо [1], що в байєсівських задачах управління, яке повинно надавати мінімум питомому ризику (10), знаходиться з мінімізації умовного питомого ризику r_t . В даній задачі він має вигляд

$$r_t = M\{y_t / m_{i,t}, D_{i,t}, i = 1, 2, \dots, k (k \leq 10)\} = \sum_{i=1}^k \int_{\bar{\mu}_{i,t}} y_{i,t}(\bar{\mu}_{i,t}, U_{i,t}) x P(\bar{\mu}_{i,t} / m_{i,t}, D_{i,t}) d\bar{\mu}_{i,t}, \quad (29)$$

де $P(\bar{\mu}_{i,t} / m_{i,t}, D_{i,t})$ – апіорний на момент t розподіл щільності ймовірності збурення $\bar{\mu}_{i,t}$.

Для величини $y_{i,t}$, що надається виразом (16), r_t має вигляд

$$r_t = A * \sum_{i=1}^k \exp(Bm_{i,t} + B^2 D_{i,t} / 2 + CU_{i,t}), \quad (30)$$

де $C \leq 0$.

Неважко помітити, що r_t являє собою суму кривих, аналогічних тим, що наведені на рис. 5, тільки «вага» збурення $\mu_{i,t}$ тут подана двома членами. При точному знанні $\mu_{i,t}$ його значення представляється в (30) м. о. $m_{i,t}(D_{i,t} = 0)$ При недостовірному знанні збурення $\mu_{i,t}$ ($D_{i,t} > 0$) на його компенсацію доводиться витратити додаткове управління $U_{i,t}$, яке повинно братися з загального ресурсу флегмоутворюючого водню на 1-му ступені розділення ізотопів. А це могло бути зроблено тільки за рахунок перерозподілу цього ресурсу між агрегатами даного ступеня.

Мінімум ризику r_t (30) досягався програмами підсистеми 3 АСУТП ВДГ шляхом ряду ітерацій, на кожній з яких ресурс перерозподілявся між агрегатами з найбільшим і найменшим значеннями членів, що входять в суму (30). Такий алгоритм розрахунку управлінь був обраний з урахуванням сепарабельності цільової функції r_t і опуклості складових її функцій $\exp(\dots)$ під знаком суми.

Більш тонкі питання коригування управлінь, одержуваних за умови мінімізації умовного питомого ризику r_t на кожному такті роботи с СУ з метою досягнення мінімального значення критерію ρ_s (9), що враховує дуальний характер управлінь $U_{i,s}$, тут не розглядаються.

Розробки адаптивної СУ були завершені у травні 1975 року. До початку серпня того року всі програми підсистем 1–3 АСУТП були «зашиті» в ПЗП, а до кінця цього місяця була розроблена і узгоджена з ДХК (і, в першу чергу, з ВДГ) Програма випробувань СУ.

На момент випробувань СУ вміст дейтерію у відпрацьованому газі було знижено на ВДГ до 2,2 γ , а ступінь його вилучення збільшено до 94,9 % від проектної. Нагадаємо, що до початку розробки СУ ці показники становили 2,3 γ і 93,7%, тобто за п'ять років випуск продукції (важкої води) було збільшено на 1,2% при річних зобов'язаннях колективу ВДГ, які передбачали збільшення на 0,1%.

Згідно з Програмою, випробування СУ проводилися з 01.09.1975 по 31.10.1975 р. При цьому:

випробування повинні були проводитися при постійних навантаженнях по газу, що розділявся, щоб при цьому концентрація дейтерію у відпрацьованому газі могла служити показником ефективності всього виробництва по випуску важкої води;

до початку випробувань були нанесені на міліметрові стрічки значення цього показника позмінно за весь попередній випробуванням рік;

протягом перших десяти днів випробувань управління на агрегати не повинні видаватись, а повинна проводитися тільки статистична обробка даних по всіх змінах.

Результати випробувань СУ наведені на рис. 6.

На графіку за серпень–жовтень 1975 року нанесені добові (усереднені по змінах) концентрації дейтерію у відпрацьованому потоці водню, що залишав ПДГ.

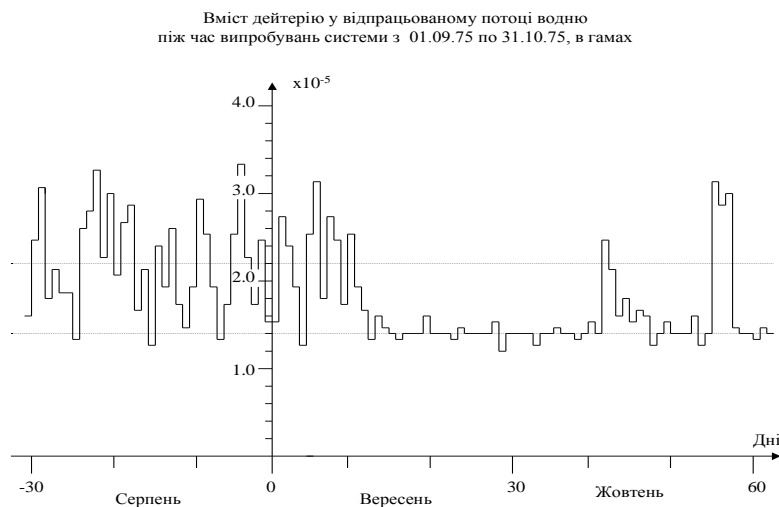


Рис. 6. Результати випробувань адаптивної СУ ступеня попереднього концентрування дейтерію на ВДГ

Як видно з графіка, добові концентрації в серпні лежали в діапазоні 1,2 γ – 3,2 γ з середнім значенням 2,2 γ . Такий же характер цей графік носив і в першу декаду вересня.

Починаючи з 1-ї зміни 11 вересня на всіх 10-ти агрегатах витрата флегмоутворюючого водню встановлювалася згідно з розрахунками підсистеми 3 АСУТП. Протягом 3-х діб (9-ти змін) зазначена вище концентрація знизилася до проектної, тобто до 1,4 γ . І з цим показником процес протікав до 12 жовтня. А потім у наступні 5 діб його характер змінився. Чому?

А тому, що 10 жовтня на ДХК (і, звичайно, на ВДГ) відбулися великі урочистості, присвячені 10-річчю введення в експлуатацію ВДГ. З Москви, з ГІАПа прибула велика делегація науковців і проектувальників на чолі з відомим радянським вченим-хіміком І.І. Гельперіним [17]. 11 жовтня на ВДГ відбулася Технічна (а, скоріше, Науково-технічна) нарада, де всі учасники проекту ВДГ доповіли про свої останні напрацювання, пов'язані з ВДГ. Виступ автора статті по отриманих на той день результатах випробувань адаптивної СУ у складі АСУТП ВДГ справив неабияке враження на всіх учасників. Адже вперше за 10 років виробництво майже місяць пропрацювало з проектним ступенем вилучення дейтерію з показником 1,4 γ ! А це – збільшення виходу продукції ВДГ на 5%. Для досягнення такого показника колективу ВДГ знадобилося б, умовно, 25 років! Якщо щось близьке до цієї цифри було б записано у Протокол випробувань і потім увійшло б у план виробництва

важкої води на ВДГ, то це загрожувало керівництву ВДГ великими неприємностями (висока ймовірність залишатися в майбутньому без премії за невиконання плану).

Заступник начальника цеху «Б» (прізвище опускається), який від ВДГ був призначений куратором зазначених випробувань, але не проявив в останній місяць інтересу до випробувань, змушений був дати вказівку апаратникам підвищити навантаження на агрегати. Реакцію СУ на виниклу ситуацію видно з графіка. Після перехідного процесу протягом 2-х діб технологічний процес по всьому ступеню попереднього концентрування вийшов на значення цільового показника в $1,6 \gamma$. При цьому фактичний вихід цільового продукту ВДГ зростав, а за прийнятою у Програмі методикою, орієнтованою на стабільне навантаження агрегатів, його розрахункове значення падало.

Навантаження виявилися неприпустимими за технологічним регламентом, і куратор через 5 днів від них змушений був відмовитися. Знову на графіку невеликий перехідний процес і знову – $1,4 \gamma$.

Коли до завершення випробувань залишався десь тиждень, концентрація дейтерію в потоці відпрацьованого водню підскочила під $3,0 \gamma$! Ніхто спочатку не міг зрозуміти причину цього. Але за участю Ю.К.Авілова, начальника УОМ і розробника підсистеми 1 (рис. 4), "винуватці" були знайдені: ними виявилися апаратники трьох самих далеких (від начальства) агрегатів – 8-го, 9-го і 10-го. В робочі журнали вони записували виконання завдань, що вироблялися в УОМ підсистемою 3, а до штурвалів, пов'язаних з голчастими клапанами, що регулюють витрати флегмоутворюючого водню в агрегатах розділення ізотопів водню, ніхто з них протягом 3-х діб не підходив. (Апаратники всіх трьох змін по всіх трьох агрегатах за жовтень були депремійовані. Первинне рішення «депремійувати на 100%» на прохання автора було знижено до 10%). Цей «збій» у Програмі випробувань зайвий раз показав, наскільки весь ступінь попереднього концентрування дейтерію чутливий до «перекосів» в управлінні технологічним процесом у всьому ступеню і наскільки ефективно здатна була усунути такі «перекози» розроблена адаптивна СУ.

Після проведення випробувань були підведені підсумки і підписаний Протокол.

За підсумками фактичний випуск важкої води на ВДГ за два місяці виріс на 2,67%. Чому, запитає читач, не на 5,1%? По-перше, управління технологічним процесом на 1-му ступені концентрування дейтерію почалося тільки з 11 вересня. По-друге, були «збої» у виконанні Програми в жовтні. По-третє, були перехідні процеси в адаптації СУ до управління процесом при запуску системи і при «збоях». (Особливо показовий процес, що виник з 11 вересня. Можливо, що такі процеси викликалися неточностями в обчисленні апостеріорних розподілів щільності ймовірності збурень при лінеаризації характеристик РК – ректифікаційних колон). Незначні ресурси УОМ у складі АСУТП ВДГ змушували розробників адаптивної СУ йти на відмову від реалізації більш складних задач і методів їх вирішення. Зокрема, розрахунок оптимальних управлінь був орієнтований на усталені режими у всіх агрегатах 1-го ступеня розділення ізотопів. Однак це не завжди виконувалося. Ймовірно, були й інші невраховані фактори, які дещо занизили отриманий результат.

І все ж цей результат виявився настільки вражаючим, що викликав чималий смуток у керівників ВДГ, які взяли участь у нараді щодо підведення підсумків випробувань. Бачачи це, автор статті, як керівник робіт від Виконавця адаптивної СУ, запропонував у Протокол випробувань внести цифру «0,67%». З цим усі одностайно погодилися.

9. Висновок

Підхід до створення описаної тут адаптивної СУ, що ґрунтувався на гіпотезі про стохастичну природу всіх невизначених процесів і величин, виявився досить ефективним, як про це свідчать отримані результати випробувань спроектованої СУ. На думку автора, його доцільно використовувати при вирішенні задач оптимального управління виробництвами не-

перервної промислової технології в хімії, металургії, при переробці сільськогосподарської сировини та в інших галузях. Наприклад, він міг би бути використаний в АСУТП компресорних станцій на магістральних газопроводах.

Слід зауважити, що на сьогодні значне поширення в теорії та практиці побудови сучасних систем управління в умовах невизначеності набув підхід, що не вимагає отримання інформації про стохастичні характеристики невизначених процесів і величин, а ґрунтується тільки на їх обмеженості з апіорі заданими множинними оцінками [18]. При цьому задача синтезу СУ зводиться до вирішення відповідної мінімаксної задачі, що надає можливість отримувати гарантовані оцінки векторів параметрів для об'єктів керування та значень критерію оптимальності СУ. Не викликає сумніву доцільність такого підходу до вирішення задач управління об'єктами в аерокосмічній галузі, в СУ військового призначення та в багатьох випадках дискретних технологій виробництва. Що ж стосується задач управління виробництвами неперервної промислової технології, то перший підхід не втратив свого значення.

Окремо слід сказати про виробництво важкої води. Автор статті вважає за доцільне створення в Україні за сучасною технологією такого потужного виробництва. Його продукція – важка вода – спочатку б стала товаром, що знайшов би попит на світових ринках, а надалі б надала підґрунтя для створення в Україні важководних атомних реакторів, які б дали змогу суттєво підвищити енергетичну незалежність України.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Фельдбаум А.А. Основы теории оптимальных автоматических систем / Фельдбаум А.А. – М.: Наука, 1966. – 553 с.
2. Андреев Б.М. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике / Андреев Б.М., Зельвенский Я.Д., Катальников С.Г. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 456 с.
3. Выделение дейтерия из водорода методом глубокого охлаждения / М.П. Малков, А.Г. Зельдович, А.Б. Фрадков [и др.]. – М.: Госатомиздат, 1961. – 152 с.
4. Караченец Д.В. Синтез системы автоматической оптимизации режимов ректификационной установки обезбензоливания: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук / Д.В. Караченец. – К., 1967. – 25 с.
5. Иваненко В.И. Задачи статистического синтеза систем автоматической оптимизации массообменных установок / В.И. Иваненко, Д.В. Караченец // Fourth Congress of the International Federation of Automatic Control, Section 53. – Warszawa, 1969.
6. Караченец Д.В. Исследование задачи статистического синтеза близкой к оптимальной системе управления одним классом марковских объектов / Д.В. Караченец, Г.Э. Массальский // Адаптивные системы автоматического управления. – К.: РИО ИК АН УССР, 1969. – С. 42 – 62.
7. Караченец Д.В. Массообменный процесс как управляемый случайный процесс / Д.В. Караченец, Г.Э. Массальский, Н.В. Андреев // Управляемые случайные процессы и системы. – К.: РИО ИК АН УССР, 1972. – С. 158 – 175.
8. Караченец Д.В. Автоматические и автоматизированные системы управления технологическими процессами и комплексами / Д.В. Караченец // Институт проблем математических машин и систем. 50 лет научной деятельности: коллективная монография. – Киев: ООО “НПП Интерсервис”, 2014. – С. 102 – 116.
9. Караченец Д.В. Разработки и внедрения автоматических и автоматизированных систем управления технологическими процессами и комплексами в химической промышленности / Д.В. Караченец // Аналіз, моделювання, управління: зб. наук. праць відділу прикладного нелінійного аналізу Інституту прикладного системного аналізу НТУУ “КПІ”. – К.: ННК “ІПСА” НТУУ “КПІ”, 2015. – Вип. 2. – С. 64 – 71.
10. Караченец Д.В. Применение основных принципов построения математического описания процесса ректификации в технике низких температур / Д.В. Караченец, Ю.В. Колесник, Л.Н. Ткаченко. – К.: РИО ИК АН УССР. – 28 с. – (Препринт 82-5).

11. Ткаченко Л.Н. Исследование процесса низкотемпературной ректификации жидкого водорода как объекта автоматического управления: автореф. дис. на соискание науч. степени канд. техн. наук: спец. 05.25 / Л.Н. Ткаченко. – К.: АН УССР. Ин-т кибернетики, 1975. – 25 с.
12. Андреев Н.В. Метод расчета сложных технологических систем / Н.В. Андреев, Д.В. Караченец // Адаптивные системы автоматического управления: Республиканский межведомственный науч.-техн. сб. – К.: Техніка, 1975. – С. 59 – 66.
13. Андреев Н.В. О выборе свободных переменных при расчете технологических систем / Н.В. Андреев, Д.В. Караченец // Республиканский межведомственный научно-технический сборник “Адаптивные системы автоматического управления”. – К.: Техніка, 1975. – С. 66 – 71.
14. А.с. Устройство управления установки процесса низкотемпературной ректификации / Д.В. Караченец, Е.П. Поздняков, Л.Н. Ткаченко, Ю.А. Редин, Ю.С. Рудой, В.А. Рябчий. – № 98088; заявл. № 1594672, 06.10.1975; зарегистр в Госреестре изобретений СССР 04.08.1976.
15. Караченец Д.В. Адаптивная система управления степенью предварительного концентрирования дейтерия / Д.В. Караченец // Тезисы докладов на XX междунар. конф. по автоматическому управлению. – Николаев, 2013. – С. 129 – 130.
16. Линник Ю.В. Метод наименьших квадратов и основы теории обработки наблюдений / Ю.В. Линник. – М.: Физматгиз, 1962. – 352 с.
17. Киперман С. Сага о Гельпериных [Электронный ресурс] / С. Киперман // Секрет. – Израиль, Хайфа, 2011. – 14.01. – Режим доступа: <http://velelens.livejournal.com/400693.html>.
18. Кунцевич В.М. Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / Кунцевич В.М. – Киев: Наукова думка, 2006. – 264 с.

Стаття надійшла до редакції 09.03.2017