

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ РОЗЧИНІВ
У АПАРАТАХ ЗАНУРЕНОГО ГОРІННЯ МЕТОДОМ
МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторної роботи
з курсів «Основи теплотехніки»,
«Теплотехнічні процеси та установки»
для студентів спеціальностей «Енергетичний менеджмент»,
«Електротехнічні системи електроспоживання»
усіх форм навчання

Затверджено Методичною радою НТТУ «КПІ»

Київ
«Політехніка»
2007

Дослідження процесу випарювання розчинів у апаратах зануреного горіння методом математичного моделювання: Метод. вказівки до викон. лаборатор. роботи з курсів «Основи теплотехніки», «Теплотехнічні процеси та установки» для студ. спец. 7.090608 «Енергетичний менеджмент», 7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання» усіх форм навч. / Уклад.: В. І. Шкляр, Т. О. Ринкова, Ю. В. Лохманець. – К.: ІВЦ Видавництво «Політехніка», 2007. – 24 с.

Гриф надано Методичною радою НТУУ «КПІ»
(Протокол № 7 від 28.02.2007 р.)

Навчальне видання

Дослідження процесу випарювання розчинів у апаратах зануреного горіння методом математичного моделювання

Методичні вказівки
до виконання лабораторної роботи
для студентів спеціальностей
7.090608 «Енергетичний менеджмент»,
7.090603 «Електротехнічні системи електроспоживання»

Укладачі: *Шкляр Віктор Іванович*, канд. техн. наук, доц.
Ринкова Тетяна Олексіївна, канд. техн. наук, доц.
Лохманець Юрій Володимирович

Відповідальний
Редактор *В. І. Дешко*, доктор техн. наук, проф..

Рецензент *І. Л. Шилович*, канд. техн. наук, доц.

За редакцією укладачів

Надруковано з оригінал-макета замовника

ВСТУП

Теплотехнічні процеси, які застосовуються в багатьох галузях виробництва, можна досліджувати методами фізичного і математичного моделювання.

Фізичне моделювання полягає в тому, що результати експериментальних досліджень, які проводяться на фізичній моделі у лабораторії, переносять за допомогою методів теорії подібності на діючі промислові апарати, в яких протікають подібні тепло- і масообмінні процеси. Недоліком фізичного моделювання є те, що рівняння подібності можна використовувати тільки в певному обмеженому інтервалі значень фізичних величин.

Математичне моделювання передбачає складання математичної моделі на основі фізичних уявлень про процес та реалізацію її на персональному комп'ютері (ПК). Адекватність математичної моделі перебігу реального процесу підтверджується значеннями параметрів роботи апарата або установки у виробничих умовах.

В даних методичних вказівках повністю простежуються етапи метода математичного моделювання для дослідження процесів нагрівання води та випарювання розчинів у апаратах зануреного горіння (АЗГ). Апарати з зануреними пальниками належать до групи контактних (змішувальних) теплообмінників, які останнім часом застосовуються в багатьох галузях промисловості. АЗГ можна використовувати для зниження енергоємності технологічних процесів тому, що гарячим теплоносієм у апараті є продукти згорання, які утворюються при спалюванні газоподібного палива.

1.МЕТА ТА ОСНОВНІ ЗАВДАННЯ РОБОТИ

Мета роботи – навчитися використовувати метод математичного моделювання для дослідження тепло- масообмінних процесів на прикладі роботи апарата зануреного горіння (АЗГ).

Основні завдання роботи:

1. Скласти математичну модель процесу нагрівання води і випарювання розчинів у АЗГ.
2. Дослідити з допомогою ПК залежність температури нагріву води (t) або розчину (t_A) у апараті від коефіцієнта надлишку повітря (α).
3. За результатами розрахунків ПК знайти різницю між температурами нагріву розчину і води при атмосферному тиску в АЗГ ($t - t_A$) та порівняти її із значеннями температурних депресій, які відомі з технічної літератури.

2. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ

2.1 Загальна характеристика контактних теплообмінників

За принципом роботи теплообмінники поділяються на три великі групи: теплообмінники поверхневого типу (рекуперативні та регенеративні апарати), контактні (змішувальні) теплообмінники та теплообмінники з внутрішніми джерелами енергії (електронагрівачі, реактори). Розглянемо детальніше принцип роботи та конструкції контактних теплообмінників.

У контактних апаратах гарячий та холодний теплоносії безпосередньо контактують один з одним. В них найповніше використовується тепло та гарячого теплоносія. Ці апарати застосовують тоді, коли готовий технологічний продукт можна розбавляти конденсатом у випадку нагрівання парою або якщо готовий технологічний продукт не боїться забрудненням продуктами згорання.

За конструктивними ознаками змішувальні теплообмінники поділяються на наступні групи [1,2]:

Пустотілі безнасадкові колони і камери (рисунок 1, поз. 1). У цих теплообмінниках рідина розпилюється в газове середовище за допомогою форсунок. Контакт рідини і газу, а отже і теплообмін між ними, відбувається на поверхні утворених під час розпилення крапель рідини. Ці апарати відрізняються невеликим опором газового потоку та найменшими витратами холодної рідини. Проте для розпилення рідини за допомогою форсунок або дискових розпилювачів потрібні значні витрати енергії. До недоліків цієї групи контактних теплообмінників треба віднести великі габаритні розміри апаратів та значний краплинний винос.

Каскадні апарати переважно застосовуються як конденсатори змішування (рисунок 1, поз. 2). У порожньому вертикальному циліндрі встановлюються на певній відстані одна від одної горизонтальні чи похилі перегородки (тарілки). Рідина, яка подається у верхню частину апарата, поступово перетікає з тарілки на тарілку під дією гравітаційних сил. Пара подається через патрубок у нижній частині конденсатора і рухається протитоком до рідини, що охолоджується. Пара конденсується безпосередньо у рідину і разом з конденсатом виводиться через нижній патрубок апарата у барометричну трубу. Повітря відсмоктується через верхній патрубок вакуумним насосом. Каскадні теплообмінники прості за конструкцією й не вимагають спеціального насоса для відведення рідини. Проте встановлення їх на значній висоті часто вимагає спеціальних будівельних споруд, а подача охолоджувальної води на значну висоту, потребує більшої витрати енергії.

Насадкові колони або скрубери являють собою циліндричні апарати, у середині яких розміщена насадка (рисунок 1, поз. 3). У верхній частині скрубера над насадкою вмонтовано розподільний пристрій у вигляді перфорованої труби або розпилювач для рівномірного попадання рідини на насадку. В цих апаратах контакт газу з рідиною відбувається на змоченій поверхні насадки. Для збільшення поверхні контакту фаз встановлюють насадки різних видів і конструкцій. За напрямом руху рідини і газу насадкові апарати діляться на прямотоківі та протитоківі. Насадкові колони відрізняються простотою конструкції, але вони мають більш високий опір газового тракту, ніж пустотілі та каскадні апарати.

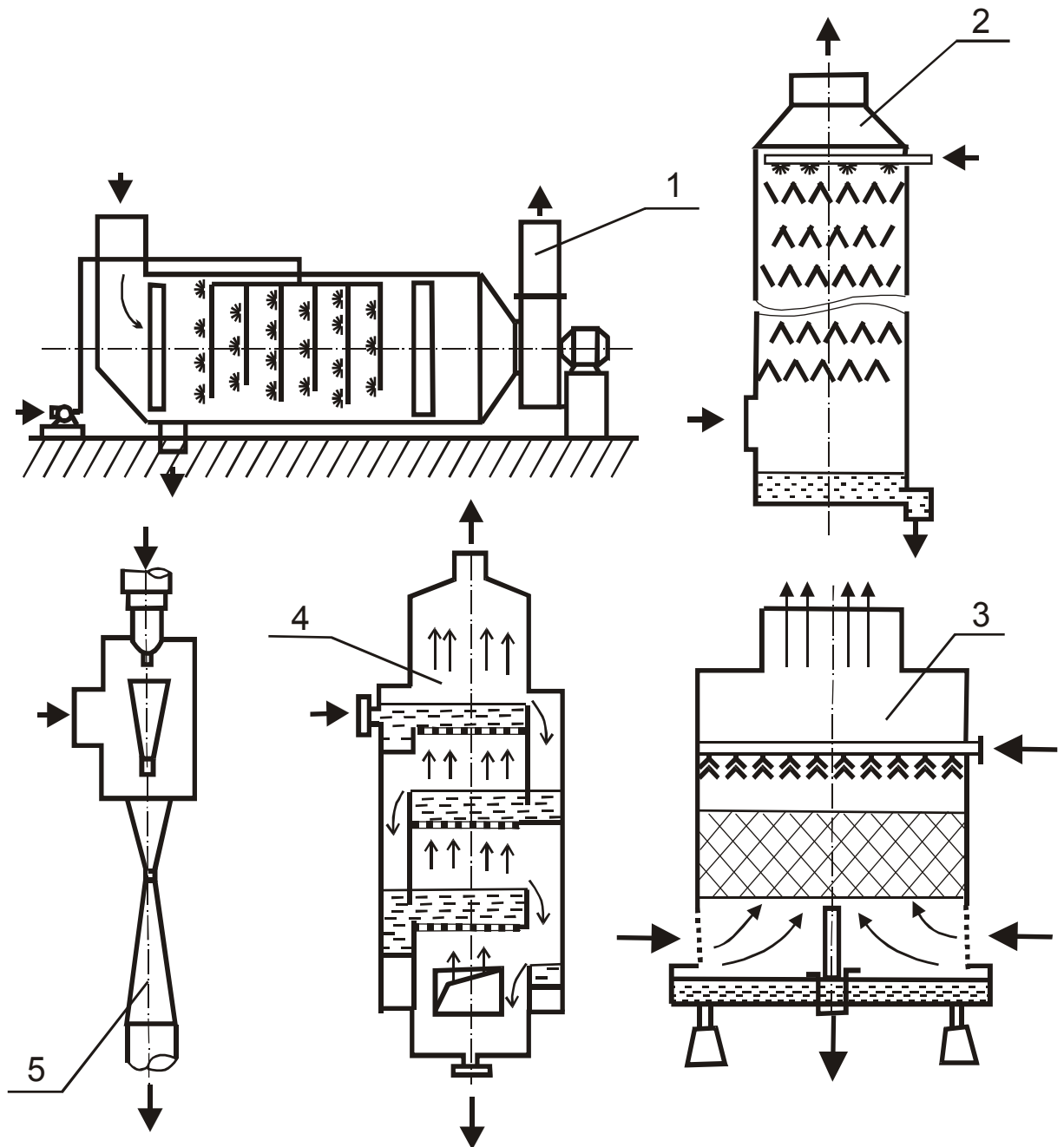


Рисунок 1 - Апарати змішуючого типу:
 1-полий; 2-каскадний; 3-насадковий; 4-барботажний; 5-струминний.

Пінні або барботажні апарати мають форму високих колон (рисунок 1, поз. 4). Робочий простір колони розділений горизонтальними тарілками на ряд камер. Тарілки бувають різних конструкцій: ковпачкові, сітчасті, провальні тощо. На кожній тарілці підтримується шар рідини, висота якого визначається верхнім рівнем заливних труб (гідравлічний затвор). Газ або пара надходять у шар рідини або з-під ковпачка, або через отвори в перфорованих тарілках. Поверхня контакту рідкої й газової фаз створюється барботажем газу в рідину. Особливістю барботажних колон є ступеневий характер процесу, що в них відбувається. Газ послідовно барботує крізь рідину, переходячи з однієї тарілки на другу знизу до верхньої частини колони. Ці апарати характеризуються підвищеною інтенсивністю тепло- і масообміну на одиницю об'єму апарата, допускають роботу із забрудненими та помірно в'язкими рідинами, нечутливі до коливань витрати теплоносіїв. Однак вони складні за конструкцією, металоємні, обмежено придатні для роботи з агресивними середовищами й відрізняються високим гідравлічним опором.

Струминні апарати застосовуються для конденсації пари та створення розрідження. Їх ще називають вакуумними або водоструминними насосами (рисунок 1, поз. 5). В цих пристроях вода підводиться у верхню частину корпусу апарата через вертикальні сопла. Із сопла вода з великою швидкістю надходить у систему концентричних конусів. Утворюється зона розрідження і пара через боковий отвір відсмоктується водою до кільцевих щілин між конусами. Надходячи у центральний простір струминного апарата, пара конденсується і конденсат разом з нагрітою водою видаляється з апарата через дифузор. Перевагою цього типу контактних теплообмінників є їх компактність. Для їхньої роботи обов'язково мати насос для відкачування води і конденсату, оскільки тиск суміші на виході з дифузора де-що вищий за атмосферний.

Особливе місце серед змішувальних апаратів посідають апарати з зануреними пальниками, які відносяться до контактних теплообмінників барботажного типу. Розглянемо їх конструкцію та принцип дії.

2.2 Апарати зануреного горіння

Процеси тепло- і масообміну, що відбуваються у апаратах з зануреними пальниками, відрізняються значною складністю [3]. Теплота, яка підводиться до рідини від продуктів згоряння при безпосередньому контакті з нею, витрачається на нагрівання рідини та випарювання води. Поверхня контакту фаз не є фіксованою. Вона складається з сумарної поверхні газових бульбашок, розміри яких залежать від гідравлічних умов барботажу та фізико-хімічних властивостей розчину. Інтенсивне випарювання розчину

протікає шляхом насичення газових бульбашок водяною парою, яка видається при спливанні бульбашок до вільної поверхні рідини. Теплота, яка віддається продуктами згорання рідині, повертається до них з теплою пароутворення пари, що насичує бульбашки газу. Коли продукти згорання повністю насичуються водяною парою, тепловий потік від них буде дорівнювати тепловому потоку утвореної пари, а напрямки цих потоків будуть протилежними. Таким чином, даний процес є процесом адиабатного випаровування і температура нагрівання рідини в АЗГ не перевищує температури адиабатного випаровування, яку називають температурою мокрого термометра ($t_A = t_M$). Отже, в апаратах зануреного горіння випарювання розчинів відбувається при температурі мокрого термометра, яка нижче температури кипіння розчину в звичайному випарному апараті при атмосферному тиску. Коефіцієнт використання теплоти згорання палива в цьому випадку досягає 95 - 96 %.

Апарат зануреного горіння представляє собою циліндричну посудину з конічним днищем. Для захисту випарного апарата від корозії агресивними розчинами внутрішню поверхню стінок апарата футерують корозійностійкими матеріалами. В залежності від продуктивності, апарати забезпечуються однією, двома або більшою кількістю пальників, розташованих на кришці випарного апарата. Пальник опускається у рідину. Рідина подається у АЗГ таким чином, щоб випарювання не порушувало рівень занурення пальників. Парогазова суміш, що утворюється над дзеркалом випаровування, видаляється з апарата через верхній штуцер кришки. У парогазовому просторі монтується сепаратор для зменшення краплинного виносу.

Важливим є питання глибини занурення пальника, від якої залежить площа міжфазної поверхні. При малих глибинах занурення може статися так, що площа міжфазної поверхні недостатня для повного використання теплоти продуктів згорання і температура парогазової суміші (t_{III}) значно вище температури рідини в апараті (t_A). Збільшення глибини занурення пальника призводить до збільшення міжфазної поверхні, а отже до підвищення частки теплоти, що передається від газів до рідини. При певній глибині занурення пальника температура сухих продуктів згорання дорівнює температурі нагрівання розчину у апараті. Ця глибина називається **оптимальною** (h_{opt}). При оптимальній глибині занурення, якщо витрата і температура продуктів згорання сталі, подальше занурення пальника та подальше збільшення поверхні контакту фаз не має сенсу. Це відбувається тому, що ці заходи не підвищують температуру нагрівання (t_A), через те, що в АЗГ не можна досягнути температури вище за температуру мокрого термометра.

Можливість випарювання при помірно високих температурах агресивних, забруднених і здатних до кристалізації розчинів при контакті з чадними газами без нагрівальних елементів призвела до створення промислових установок зануреного горіння. Створені високопродуктивні апарати зануреного горіння для випарювання водних розчинів мінеральних солей магнію та калію на Калушському хімічному комбінаті (Львівська область); для концентрування відходів сірчаної кислоти при травленні прокату в металургійній промисловості (Кременчук); для випарювання розчинів гідролісної сірчаної кислоти при виробництві діоксиду титану, що йде для виготовлення титанових білил (Сумський хімкомбінат); для випарювання чорного щолоку в целюлозно-паперовій промисловості (Жидачів).

На рисунку 2 представлена принципова схема апарата зануреного горіння, показані матеріальні потоки теплоносіїв та параметри, що характеризують їх властивості.

3. МАТЕМАТИЧНА МОДЕЛЬ ПРОЦЕСУ ВИПАРЮВАННЯ У АЗГ

3.1 Постановка задачі й вихідні дані

Математична статична модель процесу нагрівання і випарювання в апаратах зануреного горіння складається з рівнянь теплового і матеріального балансів, які дозволяють визначити всі невідомі величини, що входять до цих рівнянь, через основні параметри процесу та фізико-хімічні властивості контактуючих теплоносіїв.

Математична модель розроблена для випадку роботи апарата, коли глибина занурення пальника є оптимальною і коли температура сухих продуктів згоряння дорівнює температурі рідини у АЗГ. Ступінь насичення парогазової суміші, що видаляється з апарата, водяною парою досягає ста відсотків (100 %). Температура і концентрація розчину однакові у будь-якому місці контактного теплообмінника внаслідок інтенсивного перемішування контактуючих фаз. Рівень рідини у АЗГ підтримується сталим.

Розглянемо загальний випадок обробки розчину у випарному апараті-кристалізаторі. Будемо вважати, що в об'ємі апарата знаходиться насичений (маточний) розчин при температурі (t_A), з якого при певних умовах можуть виділитися кристали.

Рівняння *теплового балансу* будемо відносити до кількісної одиниці палива, що згоряє, (для рідкого палива – 1 кг ; для газоподібного палива – 1 м³ за нормальних умов). Це рівняння запишемо наступним чином:

$$Q_B^P + \alpha \cdot V_B^0 \cdot c_B \cdot t_B + G_{KP} \cdot q_{KP} + 1 \cdot c_T \cdot t_T + S \cdot c_H \cdot t_H =$$

$$= G_{CF} \cdot h_2 + S_M \cdot c_A \cdot t_A + G_{KP} \cdot c_{KP} \cdot t_A + Q_{II}$$
(1)

Матеріальний баланс АЗГ буде мати вигляд:

$$S = S_M + G_{KP} + W$$
(2)

Для того, щоб вирішити систему наведених рівнянь необхідно сформулювати постановку задачі й оперувати певними вихідними даними.

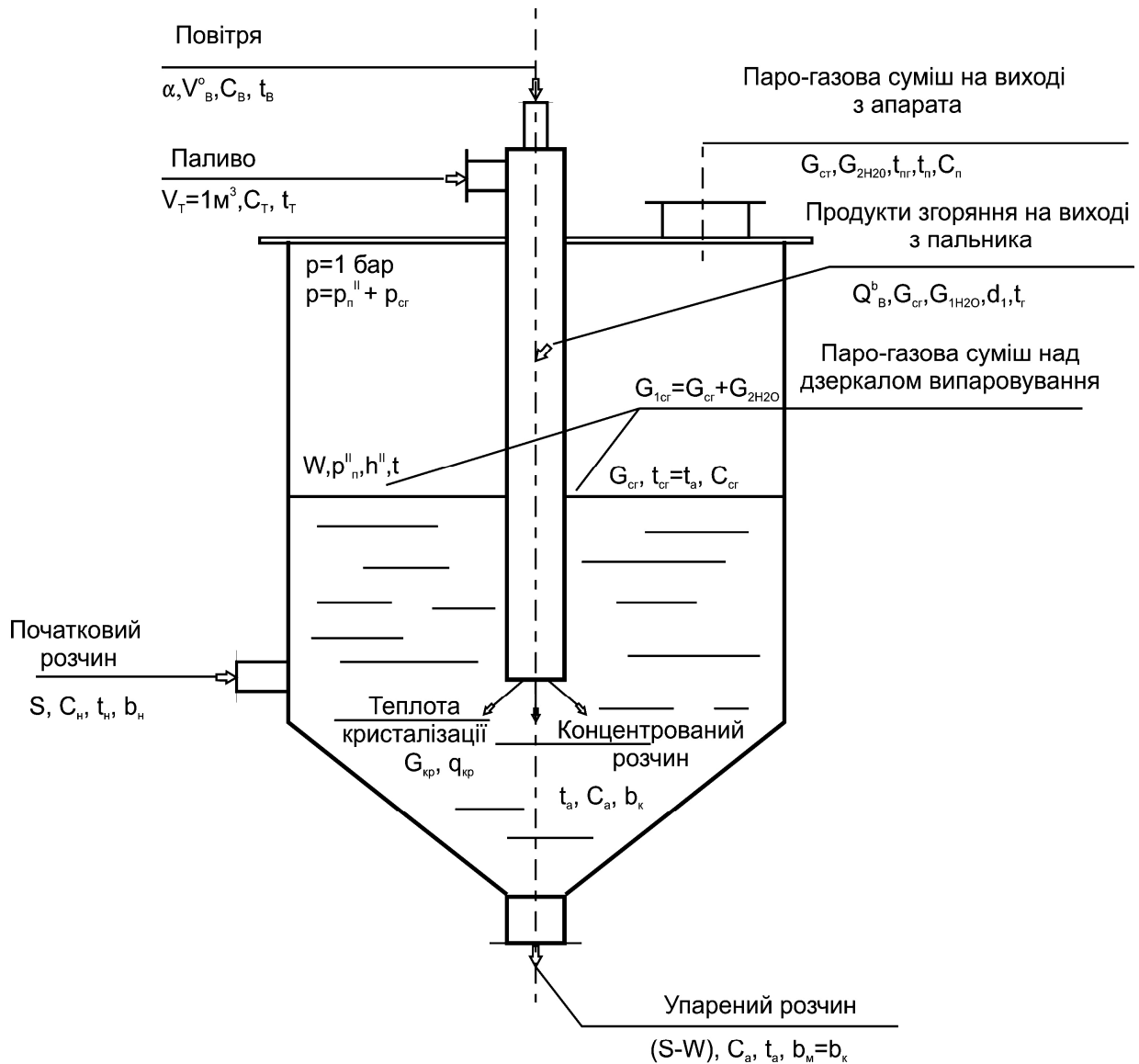


Рисунок 2 - Схема матеріальних і теплових потоків у АЗГ

Постановка задачі полягає у наступному: визначити температуру нагрівання рідини у АЗГ (t_a); кількість початкового розчину (S); кількість

концентрованого кінцевого розчину (S_M) і утворених кристалів (G_{KP}); кількість вологи, що випаровується в АЗГ (W); кількість сухих продуктів згоряння (G_{CF}); ентальпію парогазової суміші, що видаляється з контактного теплообмінника (h_2); температуру парогазової суміші на виході з апарата (t_{III}), якщо коефіцієнт надлишку повітря (α) змінюється від 1 до 5.

Для розв'язання поставленої задачі необхідно прийняти наступні вихідні дані.

- 1.) Тиск у апараті $p = 760 \text{ мм. рт. ст} = 101325 \text{ Па}$.
- 2.) Склад природного газоподібного палива, що надходить у пальник на згоряння (таблиця 1) [1]:

Таблиця 1 – Склад природного газоподібного палива

Родовище газу	Склад сухого газу, % по об'єму								Густина $\rho, \text{ кг/м}^3$	Нижча теплота згорання $Q_{\text{н}}^P, \text{ ккал/м}^3$
	CH_4	C_2H_6	C_3H_8	C_4H_{10}	C_5H_{12} +вищі	CO_2	N_2 +інш.	H_2S		
Зачепилівське	87,1	5,9	2,1	1,2	3,2	0,1	0,4	0	0,686	10262,1
Сагайдакське	92,4	0,025	0,025	0,01	0	0,7	6,84	0	0,599	7917,3
Співаковське	92,2	3,9	0,85	0,45	0,05	0,9	1,65	0	0,594	8811,5
Шебелінське	92,6	4,5	0,9	0,7	0	0,1	1,2	0	0,594	9001,0
БільчеБолиця	98,2	0,22	0,13	0,06	0,09	0,2	1,1	0	0,566	8511,6
Дашавське	98,3	0,3	0,12	0,15	0,03	0,1	1	0	0,562	8534,6
Косівське	98,5	0,18	0,1	0,12	0	0,1	1	0	0,561	8510,2

- 3.) Початкова температура та об'ємна теплоємність палива, що подається у пальник:

$$t_T = 25 \text{ } ^\circ\text{C}, c_T = 0,37 \text{ ккал/ (нм}^3 \text{ K)} = 1,55 \text{ кДж/(нм}^3 \text{ K)}.$$

- 4.) Вища теплота згоряння палива:

$$Q_B^P, \text{ кДж/нм}^3$$

Теплота згоряння, яка враховує теплоту конденсації водяної пари з продуктів згоряння при контакті з холодним розчином, розраховується за формулою [1]:

$$Q_B^P = Q_H^P + 4,83(H_2 + 2CH_4 + \sum \frac{n}{2} C_m H_n + H_2S), \text{ кДж/нм}^3.$$

- 5.) Втрати теплоти у навколишнє середовище:

$$Q_{II} = 0,1 \cdot Q_B^P, \text{ кДж/нм}^3.$$

- 6.) Початкова температура та об'ємна теплоємність повітря:

$$t_B = 25^\circ\text{C}, c_B = 0,31 \text{ ккал}/(\text{м}^3 \text{K}) = 1,3 \text{ кДж}/(\text{м}^3 \text{K}).$$

7.) Теоретично необхідний об'єм повітря для згорання одного нормального метра кубічного газоподібного палива. Ця величина обчислюється за залежністю [2]:

$$V_B^0 = 0,0476[0,5CO + 0,5H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4} \right) C_m H_n - O_2], \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

8.) Формули для розрахунку дійсних об'ємів продуктів згорання [2,4]:

$$V_{RO_2} = 0,01(CO_2 + CO + CH_4 + H_2S + \sum m \cdot C_m H_n), \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_{N_2} = V_{N_2}^0 + (\alpha - 1) \cdot 0,79 \cdot V_B^0, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_{N_2}^0 = 0,79V_B^0 + 0,01N_2, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_{O_2} = 0,21(V_B - V_B^0), \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_B = \alpha V_B^0, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + 0,016(\alpha - 1)V_B^0, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

$$V_{H_2O}^0 = 0,01(H_2 + H_2S + \sum \frac{n}{2} C_m H_n) + 0,016V_B^0, \frac{\text{нм}^3}{\text{нм}^3}$$

9.) Таблиця фізичних властивостей продуктів згорання (таблиця 2) [2]:

Таблиця 2 – Фізичні властивості продуктів згорання

Продукти згорання	$\rho, \frac{\text{кг}}{\text{нм}^3}$	$c, \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$	$R, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}}$
CO_2	1,977	0,8148	188,9
N_2	1,251	1,0392	296,8
O_2	1,429	0,9148	259,8
H_2O	0,804	2,0722	461,9

10) Початкова температура, концентрація і теплоємність розчину:

$$t_H, \text{ }^\circ\text{C}; b_H, \% \text{ мас.}; c_H, \text{ кДж}/(\text{кг K}).$$

11) Теплота кристалізації $q_{кр}$, кДж/кг.

12) Концентрація рідини в масових відсотках: b_K – кінцевого розчину; $b_{НАС}$ (або b_M) – насиченого або маточного розчину; $b_{КР}$ - концентрація кристалів ; $b_{УХ}$ - загальна концентрація рідини, що видаляється з АЗГ.

13) Таблиці тиску насиченої водяної пари над водним розчином кінцевої концентрації та над чистим розчинником (водою) в залежності від температури:

$$p''_{П} = f(t), \text{ Па}; p''_{ВП} = f(t), \text{ Па}.$$

14.) Таблиці теплоємності кінцевого розчину в залежності від температури:

$$c_A = f(t), \text{ кДж}/(\text{кг K}).$$

15.) Таблиці ентальпії насиченої водяної пари в залежності від температури:

$$h'' = f(t), \text{ кДж}/\text{кг}.$$

16.) Теплоємність кристалів $c_{КР}$, кДж/(кг K).

17.) Теплоємність перегрітої пари:

$$c_{П} = 0,468 \text{ ккал}/(\text{кг K}) = 1,96 \text{ кДж}/(\text{кг K}).$$

18.) Константи: A_1, A_2, A_3, A_4, A_5 , зміст яких буде розкрито далі.

19.) Коефіцієнт надлишку повітря α , який буде змінюватися від 1 до 5.

3.2. Система рівнянь математичної моделі

Згідно з постановкою задачі та вихідних даних рівняння теплового (1) і матеріального (2) балансів мають сім невідомих. Для того, щоб система була однозначною, її треба доповнити відповідним числом рівнянь. До них треба віднести такі залежності.

Матеріальний баланс по безводному продукту:

$$S \cdot b_H = (S_M + G_{КР})b_{УХ} = S_M b_M + G_{КР} b_{КР} \quad (3)$$

Кількість води, що випаровується з розчину:

$$W = S \left(1 - \frac{b_H}{b_{yx}} \right) \quad (4)$$

Кількість водяної пари, що насичує продукти згорання:

$$W = G_{CF} (d_2 - d_1), \quad (5)$$

де d_1 - вологовміст продуктів згорання на вході у розчин; d_2 – вологовміст продуктів згорання на виході з АЗГ.

$$d_1 = \frac{G_{1H_2O}}{G_{CF}} \quad (6)$$

$$d_2 = \frac{G_{2H_2O}}{G_{CF}} \quad (7)$$

Кількість сухих продуктів згорання:

$$G_{CF} = \sum V_i \rho_i = V_{CO_2} \rho_{CO_2} + V_{N_2} \rho_{N_2} + V_{O_2} \rho_{O_2} \quad (8)$$

Кількість водяної пари на вході у розчин:

$$G_{1H_2O} = V_{H_2O} \rho_{H_2O} \quad (9)$$

Кількість водяної пари на виході з АЗГ:

$$G_{2H_2O} = G_{1H_2O} + W \quad (10)$$

Ентальпія парогазової суміші над дзеркалом випаровування:

$$h_2 = c_{CF} t_A + d_2 h'' \quad (11)$$

Теплоємність сухих продуктів згорання:

$$c_{CF} = \sum g_i c_i, \quad (12)$$

де g_i - масова частка компонента сухих продуктів згорання.

Баланс ентальпій сухих продуктів згорання і водяної пари над дзеркалом випаровування та на виході з контактного теплообмінника:

$$G_{CF}c_{CF}t_A + G_{CF}d_2h'' = G_{CF}c_{CF}t_{III} + G_{CF}d_2 \left[h'' + c_{II} (t_{III} - t_{II}) \right], \quad (13)$$

де t_{II} — температура водяної пари, яка відповідає тиску насичення над розчином кінцевої концентрації.

Отриману систему рівнянь, яка є початковою замкненою математичною моделлю процесу, можна скоротити, якщо врахувати зв'язок між різними величинами.

3.3 Перетворення математичної моделі

Спочатку зробимо спрощення виразу для визначення кількості вологи, яка насичує продукти згоряння (5):

$$W = G_{CF}(d_2 - d_1).$$

Як відомо:

$$d_1 = \frac{G_{H_2O}}{G_{CF}} = \frac{V_{H_2O}}{\sum V_i \rho_i} \quad (14)$$

Використовуючи для парогазової суміші рівняння стану ідеального газу, отримаємо:

$$p_{II}'' V = G_{H_2O} R_{II} T \quad (15)$$

$$(p - p_{II}'') V = G_{CF} R_{CF} T \quad (16)$$

Розділимо (15) на (16) і отримаємо:

$$\frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} = \frac{G_{H_2O}}{G_{CF}} \cdot \frac{R_{II}}{R_{CF}}$$

або

$$d_2 = \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot \frac{R_{CF}}{R_{II}} = \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot \frac{\sum g_i R_i}{R_{II}}$$

Враховуючи, що $g_i = \frac{V_i \rho_i}{\sum V_i \rho_i}$, запишемо визначення d_2 через відомі величини:

$$d_2 = \frac{p_{\Pi}''}{p - p_{\Pi}''} \cdot \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{\sum V_i \rho_i} \quad (17)$$

Підставимо (14) і (17) в рівняння для знаходження W і розділимо на $\sum V_i \rho_i$, пам'ятаючи про те, що $G_{CF} = \sum V_i \rho_i$:

$$W = \sum V_i \rho_i \left(\frac{p_{\Pi}''}{p - p_{\Pi}''} \cdot \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{\Pi} \cdot \sum V_i \rho_i} - \frac{V_{H_2O} \rho_{H_2O}}{\sum V_i \rho_i} \right).$$

Тоді:

$$W = \frac{p_{\Pi}''}{p - p_{\Pi}''} \cdot \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{\Pi}} - V_{H_2O} \rho_{H_2O} \quad (18)$$

Або, вводячи константи:

$$A_4 = \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{\Pi}},$$

$$A_5 = V_{H_2O} \rho_{H_2O},$$

Нарешті знайдемо наступну залежність:

$$W = \frac{p_{\Pi}''}{p - p_{\Pi}''} \cdot A_4 - A_5 \quad (19)$$

Далі перетворимо рівняння теплового балансу. Перенесемо втрати теплоти в навколишнє середовище (Q_{Π}) в ліву частину рівняння теплового балансу (1). В лівій частині рівняння (1) можна виділити константи:

$$A_1 = (Q_B^P - Q_{\Pi}) + 1 \cdot c_T t_T, \quad A_2 = c_H t_H$$

та доданки, в які входять невідомі величини S , G_{KP} і доданок, величина якого залежить від коефіцієнта надлишку повітря (α), який змінює своє значення.

У праву частину рівняння теплового балансу (1) також входять доданки з невідомими S_M та G_{KP} й добуток $G_{CF} h_2$. Вираз ($G_{CF} h_2$) можна перетворити. Ентальпія парогазової суміші знайдеться за відомою формулою (11), в якій кількість і теплоємність сухих продуктів згорання складають:

$$G_{CF} = \sum V_i \rho_i \text{ і } c_{CF} = \sum g_i c_i = \frac{\sum V_i \rho_i c_i}{\sum V_i \rho_i}.$$

Підставимо вищезазначенні вирази у формулу (11) й отримаємо:

$$h = \frac{\sum V_i \rho_i c_i}{\sum V_i \rho_i} \cdot t_A + \frac{p''_{\Pi}}{p - p''_{\Pi}} \cdot \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{\sum V_i \rho_i} \cdot \frac{1}{R_{\Pi}} \cdot h''.$$

Отже:

$$G_{CF} h_2 = \left(\sum V_i \rho_i c_i \right) \cdot t_A + \left(\frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{\Pi}} \right) \cdot \frac{p''_{\Pi}}{p - p''_{\Pi}} \cdot h''.$$

Величини, які виділені у дужках, є константами при сталому складі газоподібного або рідкого палива і дорівнюють:

$$A_3 = \sum V_i \rho_i c_i, \quad A_4 \text{ (див. вище).}$$

Тоді:

$$G_{CF} h_2 = A_3 t_A + A_4 \frac{p''_{\Pi}}{p - p''_{\Pi}} \cdot h''.$$

Рівняння теплового балансу (1) остаточно буде мати вигляд:

$$A_1 + \alpha V_B^0 c_B t_B + A_2 S + G_{KP} q_{KP} = A_3 t_A + A_4 \frac{p''_{\Pi}}{p - p''_{\Pi}} \cdot h'' + S_M c_M t_A + G_{KP} c_{Kl} \quad (20)$$

У виразі (20) не визначені наступні змінні: S, S_M, G_{KP} .

Для знаходження кількості початкового розчину, необхідно мати початкову і кінцеву концентрації речовини та кількість води, що випаровується. Раніше було зазначено, що

$$W = S \left(1 - \frac{b_H}{b_{YX}} \right)$$

Введемо параметр $\delta = \left(1 - \frac{b_H}{b_{YX}} \right)$. Тоді будемо мати:

$$\delta = \left(1 - \frac{b_H}{b_{YX}} \right) = \frac{W}{S} \quad (21)$$

Одним невідомим стало менше, тому що δ однозначно обчислюється через початкову і кінцеву концентрації розчину і не може вважатись новим невідомим.

Визначимо S_M з рівняння матеріального балансу АЗГ:

$$\begin{aligned} S &= S_M + G_{KP} + W, \\ S_M &= S - W - G_{KP}. \end{aligned}$$

Враховуючи вираз (21), отримаємо:

$$\begin{aligned} S_M &= \frac{W}{\delta} - W - G_{KP}, \\ S_M &= W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) - G_{KP} \end{aligned} \quad (22)$$

Знайдемо вираз для визначення кількості кристалів, які при певних умовах можуть утворюватися. Для цього використаємо рівняння матеріального балансу по безводному продукту:

$$(S_M + G_{KP}) \cdot b_{yx} = S_M b_M + G_{KP} b_{KP}.$$

З виразу (22) підставимо значення S_M і отримаємо:

$$\left(W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) - G_{KP} + G_{KP} \right) \cdot b_{yx} = W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) \cdot b_M - G_{KP} b_M + G_{KP} b_{KP}$$

Після скорочення маємо:

$$G_{KP} = W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) \cdot \frac{(b_{yx} - b_M)}{(b_{KP} - b_M)} \quad (23)$$

Таким чином, система рівнянь (1) – (12), які описують процес тепло- і масообміну в АЗГ для випарних апаратів – кристалізаторів, зводиться до п'яти виразів (19) – (23), які будемо називати спрощеною замкненою математичною моделлю.

Якщо апарат з зануреними пальниками використовується тільки для збільшення концентрації розчинів, а виділення кристалів відсутнє, цю систему можна значно спростити. Ознакою того, що кристали не виділяються, є умова $b_{KP} = 0$. Тоді загальна концентрація рідини, що видаляється з АЗГ, не враховує наявності кристалів і дорівнює концентрації насиченого розчину $b_M (b_{HAC})$. За таких умов вираз (23) приймає нульове значення, що призводить до відповідних змін у моделі:

$$G_{KP} = 0 \Rightarrow G_{KP}c_{KP}t_A = 0; G_{KP}q_{KP} = 0.$$

Тоді математична модель процесу обробки в АЗГ розчинів, які не утворюють кристалів, буде мати вигляд:

$$A_1 + \alpha V_B^0 c_B t_B + A_2 \frac{W}{\delta} = A_3 t_A + A_4 \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} h'' + W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) c_K t_A \quad (24)$$

$$W = \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} A_4 - A_5 \quad (25)$$

$$\delta = \left(1 - \frac{b_H}{b_K} \right) = \frac{W}{S}, \quad b_{\hat{E}} > b_I \quad (26)$$

У порівнянні з системою (19) – (23) наведена система (24) – (26) має деякі відмінності, що пов'язані з фізичними уявленнями про процес. Концентрація, а внаслідок цього і теплоємність розчину у контактному апараті зануреного горіння не можуть бути більше відповідних параметрів насиченого розчину (маточного). Це пов'язано з тим, що тільки наявність маточного розчину в АЗГ, є передумовою виділення кристалів. А якщо кристалів немає, то концентрація і теплоємність розчину позначаються b_K та c_K .

Якщо апарат зануреного горіння використовується як водонагрівач, $b_K = b_H = 0$ і $c_K = c_{ВОД}$, система (24) – (26) зводиться до наступної:

$$A_1 + \alpha V_B^0 c_B t_B + A_2 \frac{W}{\delta} = A_3 t_A + A_4 \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} + W \left(\frac{1 - \delta}{\delta} \right) c_{ВОД} t_A \quad (27)$$

$$W = \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} A_4 - A_5 \quad (28)$$

$$\delta = \frac{W}{S} = 1 - 0 \quad (29)$$

У рівнянні (27) $c_{ВОД}$ – теплоємність води, яку приймають рівною: $c_{ВОД} = 4,19 \frac{\text{кДж}}{\text{кг} \cdot \text{К}}$. Параметр δ може приймати значення від одиниці до нуля в залежності від співвідношення води, що надходить у АЗГ та води, яка випаровується.

Температура парогазової суміші, що виходить з апарата, визначається з енергетичного балансу процесу змішування сухих продуктів згоряння з

водяною парою (13). Розділимо праву та ліву частину цього рівняння на кількість сухих продуктів згоряння (G_{CF}) і отримаємо баланс ентальпій:

$$c_{CF}t_A + d_2h'' = c_{CF}t_{III} + d_2h_2'' + d_2c_{II}t_{III} - d_2c_{II}t_{II}$$

Роз'яжемо останній вираз відносно t_{III} :

$$\begin{aligned} t_{III}(c_{CF} + d_2c_{II}) &= c_{CF}t_A + d_2c_{II}t_{II}, \\ t_{III} &= \frac{c_{CF}t_A + d_2c_{II}t_{II}}{c_{CF} + d_2c_{II}} \end{aligned} \quad (30)$$

Враховуючи, що:

$$c_{CF} = \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{\sum V_i \rho_i}, \quad d_2 = \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{II} \sum V_i \rho_i} \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''},$$

зробимо прості математичні перетворення та отримаємо формулу для визначення температури парогазової суміші на виході з апарата з зануреними пальниками.

$$t_{III} = \frac{\sum V_i \rho_i c_i \cdot t_A + \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{II}} \cdot \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot c_{II} t_{II}}{\sum V_i \rho_i c_i + \frac{\sum V_i \rho_i R_i}{R_{II}} \cdot \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot c_{II}}.$$

Після введення констант A_3 і A_4 будемо мати кінцеву формулу:

$$t_{III} = \frac{A_3 \cdot t_A + A_4 \cdot \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot c_{II} t_{II}}{A_3 + A_4 \cdot \frac{p_{II}''}{p - p_{II}''} \cdot c_{II}} \quad (31)$$

Порядок реалізації математичної моделі процесу в АЗГ зручно показати на прикладі блок – схеми алгоритму розрахунків.

3.4. Блок-схема алгоритму і програма реалізації математичної моделі процесу обробки рідини у АЗГ

У лабораторній роботі студентам надається можливість виконати на персональному комп'ютері порівняльний аналіз і з'ясувати, як температура при концентруванні певного водного розчину у АЗГ відрізняється від температури нагрівання чистого розчинника (води) для конкретного коефіцієнта надлишку повітря (α). Крім того, прослідкувати зміну температури нагрівання рідини у АЗГ при збільшенні α . В даній роботі розглядаються розчини, які не утворюють кристалів і тому використовується спрощена математична модель (24) – (26).

Рішенням математичної моделі процесів випарювання розчинів і нагрівання рідини у АЗГ є таке значення температури t_a при певному значенні α , для якого різниця лівої та правої частин теплового балансу (24) приймає нульове значення або відрізняється від нуля на скільки завгодно малу наперед зазначену величину ε , наприклад, $\varepsilon = 0,01$.

Для досягнення поставленої задачі було розроблено алгоритм обчислення, блок-схема якого представлена на рисунку 3 і програму обчислення на персональному комп'ютері, реалізовану у вигляді макросу у MS Excel.

Дамо необхідні пояснення до алгоритму.

На початку роботи до програми вводяться усі необхідні вихідні дані, після чого для кожного значення коефіцієнту надлишку повітря α виконується розрахунок коефіцієнтів $A1 - A5$. Далі для граничних значень температур t_A , а також для середнього арифметичного значення цієї температури розраховується розходження рівняння теплового балансу (24), тобто модуль різниці його лівої та правої частин. Для розрахунку тисків над розчином та над водою, теплоємностей та ентальпій розчину використовується лінійна інтерполяція на основі заданих табличних даних. Далі реалізується метод половинного ділення для знаходження такого значення температури, при якому різниця лівої та правої частин рівняння теплового балансу не перевищуватиме задану величину ε .

Суть методу полягає у послідовному діленні навпіл температурного інтервалу з наступним розглядом лише тієї його половини, на границях якої величина розходження балансу змінює свій знак, тобто проходить через нуль. Інша половина інтервалу відкидається. На інтервалі, що залишився, відбувається наступне ділення навпіл, і т.д., доки не буде отримано рішення з заданою точністю.

Процес знаходження розв'язку повторюється для кожного нового значення α і для кожного заданого розчину.

В кінці роботи програми відбувається виведення розрахункових даних.

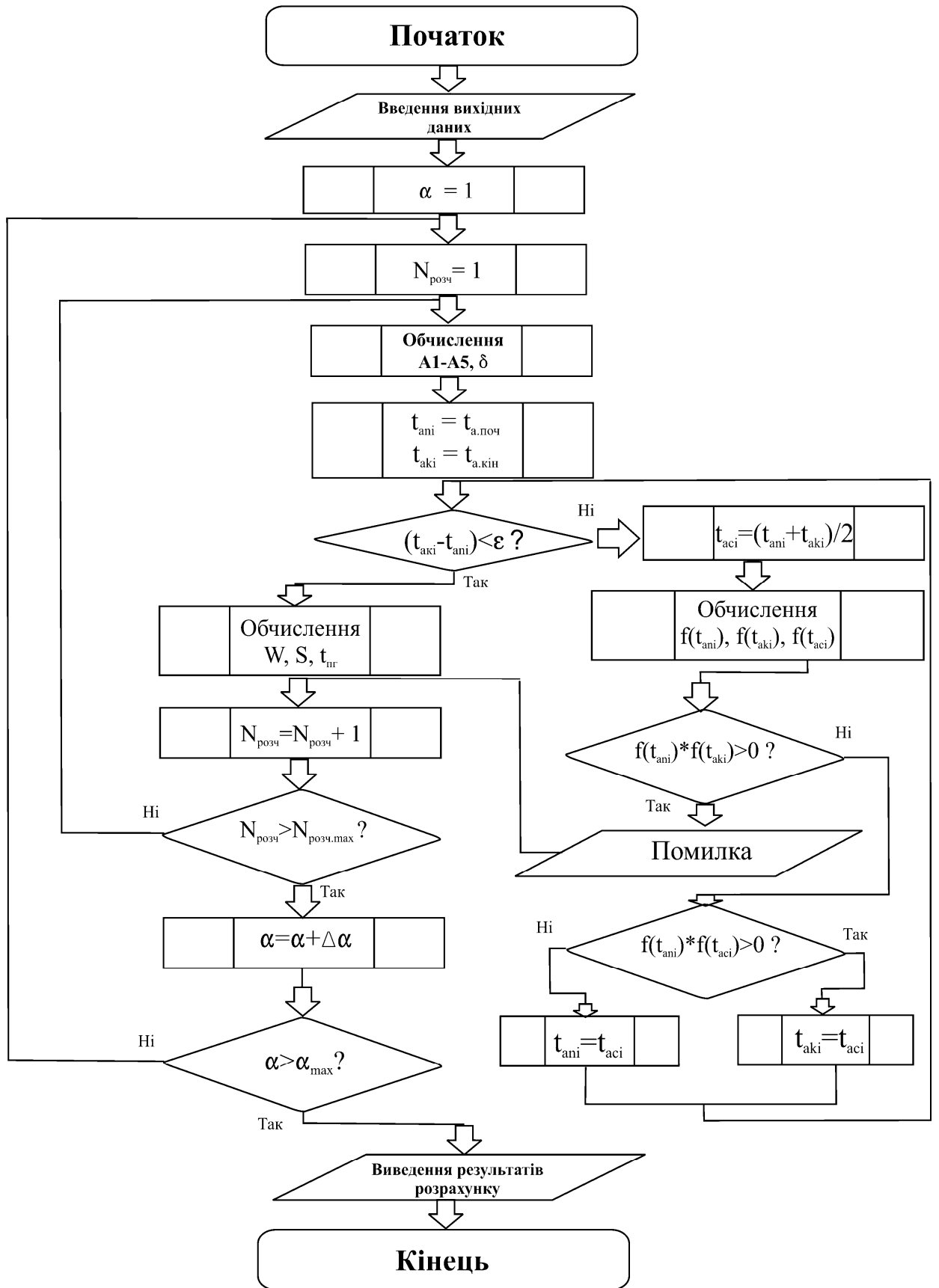


Рисунок 3 - Блок-схема алгоритму обчислень

4. Для друку таблиці результатів розрахунку та графіка треба виділити потрібні фрагменти аркуша та друкувати лише їх (для чого у вікні *Файл* → *Печать...* у розділі *Вывести на печать* вибрати пункт *выделенный диапазон*) або зкопіювати ці фрагменти до документу MS Word, і роздрукувати їх звідти. Рекомендовано для друку обрати альбомну орієнтацію аркуша.
5. Рекомендовано зберігати модифікований файл під новим ім'ям з метою збереження початкового варіанту. Найкраще зберегти файл під новим ім'ям перед модифікацією, для чого відкрити вікно *Файл* → *Сохранить как...* і ввести нове ім'я для модифікованого файлу, наприклад згідно варіанту.

КОНТРОЛЬНІ ЗАПИТАННЯ

1. Назвати основні завдання лабораторної роботи.
2. Пояснити відмінність методів фізичного і математичного моделювання.
3. На які групи поділяються теплообмінники в залежності від принципу їх роботи?
4. На які типи поділяються контактні теплообмінники за конструктивними ознаками?
5. Пояснити, які особливості мають процеси тепло- і масообміну в апаратах з зануреними пальниками.
6. Перелічити основні конструктивні елементи АЗГ.
7. Назвати основні переваги та недоліки АЗГ.
8. Записати рівняння теплового та матеріального балансів у АЗГ. Розкрити фізичний зміст складових.
9. Перелічити вихідні дані, які використовуються для розрахунку.
10. Записати рівняння повної математичної моделі процесів у АЗГ.
11. Записати спрощене рівняння для визначення кількості вологи, яка насичує продукти згорання.
12. Записати спрощене рівняння теплового балансу.
13. Пояснити фізичний зміст параметра δ . У якому випадку нагрівання рідин в АЗГ, його можна змінювати від 0 до 1, а в якому він безпосередньо визначається за концентраціями розчину, що надходить в апарат і видаляється з нього.
14. Як з рівняння матеріального балансу визначити витрату маточного розчину, якщо використовується параметр δ ?
15. Яким чином із матеріального балансу по безводному продукту визначається витрата кристалів у випадку їх утворення?

16. Записати спрощену математичну модель процесів у АЗГ.
17. Як змінюється спрощена замкнена математична модель процесів у АЗГ у випадку відсутності утворення кристалів (випарювання розчинів)?
18. Записати математичну модель процесу АЗГ-водонагрівача.
19. Як визначається температура парогазової суміші на виході з АЗГ?
20. Пояснити, яким чином в даній роботі знаходиться розв'язок нелінійного рівняння теплового балансу.
21. В чому полягає метод ділення навпіл?
22. Виходячи з яких умов доцільно задавати величину допустимої похибки розрахунку?
23. Чому початковий температурний інтервал для розрахунку певного розчину повинен бути не надто широким?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Удыма П.Г. Аппараты с погружными горелками. 2-е изд. М.: Машиностроение, 1973. – 269 с.
2. Алабовский А.Н. Выпарные аппараты погружного горения. К.: Вища школа, 1980. – 119 с.
3. Алабовский А.Н. Тепловой расчет аппаратов погружного горения. Методические указания. К.: КПИ, 1992. – 16 с.
4. Справочник химика / Под ред. В.Н. Никольского, 4-е изд. М-Л.: Химия, 1994. т.3. 672 с.