

## АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ ТА СИСТЕМ

УДК 669.162.22

© Кравченко В.П.\*

### МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ДУТТЯМ ГРУПИ ДОМЕННИХ ПЕЧЕЙ ЧЕРЕЗ ЗАГАЛЬНИЙ КОЛЕКТОР

В роботі розглянуто два типи систем забезпечення дуттям групи доменних печей - з одним та двома загальними колекторами. Перша система складається із чотирьох турбокомпресорів, які працюють паралельно на один спільний колектор, і чотирьох доменних печей, які одержують дуття із цього колектору. Для такої системи знайдено диференційне рівняння, яке описує зміну тиску у загальному колекторі в залежності від параметрів дуття, яке споживають доменні печі, а також від режиму роботи турбокомпресорів, які працюють паралельно на цей колектор. Друга система забезпечення дуттям складається з такої ж кількості турбокомпресорів і доменних печей, але вона має два спільних колектори, з'єднаних між собою спільним трубопроводом. Для такої структури знайдена система із двох диференціальних рівнянь, які описують залежність тиску дуття від параметрів турбокомпресорів і режиму роботи доменних печей. Знайдені диференціальні рівняння для обох типів систем забезпечення дуттям є диференціальні рівняння з випадковими коефіцієнтами. Показано, що замінюючи ці випадкові коефіцієнти їх середніми значеннями, а потім розглядаючи сталий режим роботи систем, можливо розрахувати параметри турбокомпресорів, які забезпечують доменні печі дуттям з заданими параметрами. Для кожного типу систем розглянуті конкретні приклади, в яких для заданих типів доменних печей одержані необхідні параметри турбокомпресорів. Показано, що другий тип систем є більш бажаним, хоча і потребує підвищених параметрів турбокомпресорів.

**Ключові слова:** доменна піч, дуття, загальний колектор, турбокомпресор, паралельна робота, математична модель, диференційне рівняння, приклад, вибір турбокомпресора.

**Кравченко В.П. Математическое моделирование систем обеспечения дутьем группы доменных печей через общий коллектор.** В работе рассматриваются два типа систем обеспечения дутьем группы доменных печей – с одним и двумя общими коллекторами. Первая система состоит из четырех турбокомпрессоров, которые работают параллельно на один общий коллектор, и четырех доменных печей, которые получают дутье из этого коллектора. Для такой системы найдено дифференциальное уравнение, которое описывает изменение давления в общем коллекторе в зависимости от параметров дутья, потребляемого доменными печами, а также от режима работы турбокомпрессоров, которые работают параллельно на этот коллектор. Вторая система обеспечения дутьем имеет такое же количество турбокомпрессоров и доменных печей, но имеет два общих коллектора, соединенных между собой трубопроводом. Для такой структуры получено математическое описание ее работы в виде системы двух дифференциальных уравнений, которые описывают зависимость давления дутья от параметров турбокомпрессоров и режима работы доменных печей. Полученные дифференциальные уравнения для обоих типов систем обеспечения дутьем доменных печей являются дифференциальными уравнениями со случайными коэффициентами. Далее показано, что заменяя эти случайные коэффициенты их средними значениями, а

\* канд. техн. наук, доцент, ГВУЗ «Приазовский государственный технический университет», г. Мариуполь, [kravchenko\\_vp@ukr.net](mailto:kravchenko_vp@ukr.net)

потом рассматривая установившийся режим работы систем, можно рассчитать параметры турбокомпрессоров, которые позволят обеспечить доменные печи дутьем с заданными параметрами. Для каждого типа систем рассмотрены конкретные примеры, в которых для заданных типов доменных печей найдены необходимые параметры турбокомпрессоров. Показано, что второй тип системы обеспечения дутьем доменных печей является предпочтительным, хотя и требует повышенных параметров турбокомпрессоров.

**Ключевые слова:** доменная печь, дутье, общий коллектор, турбокомпрессор, параллельная работа, математическая модель, дифференциальное уравнение, пример, выбор турбокомпрессора.

*V.P. Kravchenko. Mathematical modelling of the systems providing groups of blast-furnaces with blast via a common manifold. Two types of the systems providing groups of blast-furnaces with blast through one or two common manifolds were analyzed in the article. The first system consists of four turbo-superchargers, working in parallel for one common manifold and four blast furnaces supplied with blast from that manifold. A differential equation was found for such a system, describing pressure alterations inside the manifold, due to parameters of the blast consumed by the furnaces and due to the operation of turbo-superchargers working in parallel for that manifold. The second system of blast supply has the same number of turbo-superchargers and blast-furnaces, but has two common manifolds, connected by a pipeline. A mathematical description of this work as a system of two differential equations, describing the dependence of the blast pressure upon the parameters of turbo-superchargers and the mode of blast-furnaces operation was developed. The obtained differential equations are differential equations with random coefficients. Then it was shown that by replacing these random coefficients with their average values and analyzing the set systems operation mode afterwards it will be possible to evaluate the parameters of the turbo-superchargers, that will make it possible to provide the blast furnaces with blast with preset parameters. Detailed examples were given for each type of the systems, in which the required parameters of the turbo-superchargers were found. It was shown that the second type of blast supply was more preferable, although it requires increased parameters of turbo-superchargers.*

**Keywords:** blast-furnace, blast, common manifold, turbo-supercharger, operation in parallel, mathematical model, differential equation, example, choice of a turbo-supercharger.

**Постановка проблеми.** В останній час при проектуванні нових та реконструкції старих доменних цехів пропонуються системи забезпечення доменних печей (ДП) дуттям через загальний колектор, на який паралельно працює декілька турбокомпресорів. Вважається, що така система є більш ефективною у порівнянні з системою індивідуального забезпечення дуттям (один турбокомпресор на одну ДП), оскільки зменшує непродуктивні викиди дуття через скидний клапан (СНОРТ) при тимчасових зупинках печі. Однак, практично відсутні роботи, в яких би математично аналізувалась робота системи забезпечення дуттям ДП через загальний колектор. В даній роботі зроблена спроба математично описати системи з загальним колектором та проаналізувати їх роботу в певних режимах.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питанням забезпечення дуттям доменних печей присвячено багато робіт, в яких розглядаються склад і якість дуття [1], основні газодинамічні характеристики дуття і робота печі при підвищеному тиску на колошнику [2], аналіз традиційних структур систем забезпечення дуттям «одна доменна піч - один турбокомпресор» [3], тощо. Що стосується аналізу систем забезпечення дуттям через загальний колектор з паралельною роботою турбокомпресорів, то маємо обмежену кількість публікацій [4], в яких, в основному, розглядаються загальні питання. Поза увагою залишаються питання математичного опису роботи таких систем і розрахунків, за допомогою яких можливо знаходити параметри турбокомпресорів, які б забезпечували дуттям доменні печі з конкретними характеристиками. Представлена робота є спробою математично описати такі системи і розглянути їх роботу в сталому режимі.

Розглянемо систему із чотирьох турбокомпресорів (ТК) з однаковими робочими характе-

ристиками  $P_i = f(Q_i)$ , які працюють паралельно на спільний колектор і забезпечують дуттям через цей колектор чотири доменні печі (ДП). В роботі розглядаються два типи таких систем – з одним спільним колектором і двома, що з'єднані одним трубопроводом.

**Мета статті** – математично описати роботу таких систем, знайти метод розрахунку технічних параметрів турбокомпресорів, які б забезпечували дуттям певну кількість доменних печей з заданими параметрами через загальний колектор, і порівняти роботу цих двох типів систем.

**Викладення основного матеріалу.** В роботі розглядається окремо кожен з вищезазначених типів систем забезпечення дуттям через загальний колектор.

1. Система забезпечення дуттям доменних печей з одним загальним колектором.

Розглянемо систему (рис. 1) із чотирьох турбокомпресорів (ТК) з однаковими робочими характеристиками  $P_i = f(Q_i)$ , які працюють паралельно на один спільний колектор.

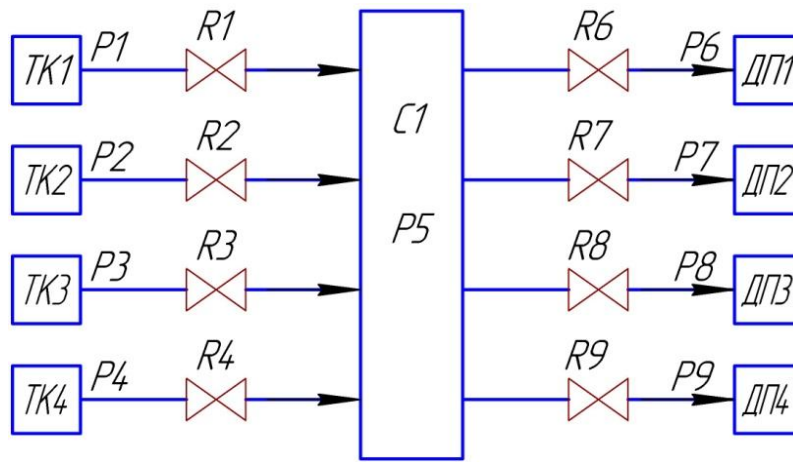


Рис. 1 – Система забезпечення дуттям доменних печей з одним загальним колектором

Кожен із турбокомпресорів має можливість змінювати  $P_i$  та  $Q_i$  (згідно робочої характеристики). Це може бути система автоматичного регулювання кількості обертів  $n$  турбокомпресора або система автоматичного регулювання положення  $s$  жалюзі на вході або виході турбокомпресора. В даній роботі така можливість умовно реалізується зміною значення газодинамічного опору  $R_i$  потоку дуття від кожного турбокомпресора.

Із колектора через окремі повітропроводи дуття подається на кожну з чотирьох доменних печей (ДП). Параметри дуття для окремої печі регулюються шляхом зміни значення газодинамічного опору  $R_j$  на її трубопроводі. Як відомо [1,2], для кожної ДП встановлюються певні параметри дуття (як правило, стабілізується тиск  $P_i$ , а кількість дуття  $Q_i$ , яку сприймає піч, визначається газопроникливістю її стовпа шихти).

Розглянемо як змінюється тиск  $P_5$  у спільному колекторі в залежності від параметрів дуття на його вході та виході. Позначимо ємкість колектору через  $C1$  [м<sup>3</sup>]. Якщо маємо тиск на виході кожного турбокомпресора  $P_1, P_2, P_3, P_4$ , то при їх паралельній роботі на спільний колектор ці тиски повинні бути однаковими і дорівнювати заданому значенню  $P_0$ :

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = P_0.$$

Значення ж тиску дуття, яке надходить з колектору, повинно бути певним для кожної доменної печі. Позначимо ці тиски  $P_6, P_7, P_8, P_9$ . Швидкість зміни тиску  $P_5$  у колекторі пропорційна ємкості колектору  $C1$  і залежить від балансу тисків дуття на вході і виході колектору, а також від величини відповідних газодинамічних опорів на вході  $R_i$  та виході  $R_j$ , тобто:

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} = \frac{(P0 - P5)}{R1} + \frac{(P0 - P5)}{R2} + \frac{(P0 - P5)}{R3} + \frac{(P0 - P5)}{R4} - \frac{(P5 - P6)}{R6} - \frac{(P5 - P7)}{R7} - \frac{(P5 - P8)}{R8} - \frac{(P5 - P9)}{R9} \quad (1)$$

або

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} = (P0 - P5) \left( \frac{1}{R1} + \frac{1}{R2} + \frac{1}{R3} + \frac{1}{R4} \right) - \frac{(P5 - P6)}{R6} - \frac{(P5 - P7)}{R7} - \frac{(P5 - P8)}{R8} - \frac{(P5 - P9)}{R9} \quad (2)$$

Оскільки у правій та лівій частинах рівняння (2) розмірності фізичних одиниць повинні співпадати, то при розмірності  $C1 [M^3]$ ,  $P1 - P9 [Па]$ ,  $\tau [с]$ , розмірність величини  $R_i$  є  $[с / M^3]$ , а величини  $1 / R_i$  відповідно  $[M^3 / с]$ , тобто це розмірність витрат дуття  $Q_i$  через  $i$ -й трубопровід системи подачі дуття. Таким чином, газодинамічний опір потоку дуття  $R_i$  є узагальненою характеристикою, фізичне тлумачення якої полягає у наступному – чим більша кількість дуття проходить в одиницю часу через трубопровід, тим менше його газодинамічний опір і навпаки.

З урахуванням цього, рівняння (2) напишемо так:

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} = (P0 - P5) \cdot (Q1 + Q2 + Q3 + Q4) - (P5 - P6) \cdot Q6 - (P5 - P7) \cdot Q7 - (P5 - P8) \cdot Q8 - (P5 - P9) \cdot Q9 ;$$

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} = (P0 - P5) \sum_{i=1}^4 Q_i - (P5 - P6) \cdot Q6 - (P5 - P7) \cdot Q7 - (P5 - P8) \cdot Q8 - (P5 - P9) \cdot Q9 \quad (3)$$

У рівнянні (3) зробимо перетворення і перенесемо у ліву частину всі члени з  $P5$ :

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} = P0 \sum_{i=1}^4 Q_i - P5 \sum_{i=1}^4 Q_i - P5 \sum_{i=6}^9 Q_i + P6 \cdot Q6 + P7 \cdot Q7 + P8 \cdot Q8 + P9 \cdot Q9 ;$$

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} + P5 \left( \sum_{i=1}^4 Q_i + \sum_{i=6}^9 Q_i \right) = P0 \sum_{i=1}^4 Q_i + P6 \cdot Q6 + P7 \cdot Q7 + P8 \cdot Q8 + P9 \cdot Q9 \quad (4)$$

У рівнянні (4) позначимо:

$$\sum_{i=1}^4 Q_i = Q_{ex} ;$$

$$\sum_{i=6}^9 Q_i = Q_{vux} .$$

Тобто для колектора це сумарний вхідний та вихідний потоки дуття:

$$Q_{\text{сум}} = Q_{\text{вх}} + Q_{\text{вих}}.$$

Тоді рівняння (4) можна записати так:

$$C1 \frac{dP5}{d\tau} + P5 \cdot (Q_{\text{вх}} + Q_{\text{вих}}) = P0 \cdot Q_{\text{вх}} + P6 \cdot Q6 + P7 \cdot Q7 + P8 \cdot Q8 + P9 \cdot Q9. \quad (5)$$

Поділимо праву та ліву частину рівняння (5) на  $Q_{\text{сум}} = Q_{\text{вх}} + Q_{\text{вих}}$ .

$$C1 \frac{dP5}{Q_{\text{сум}} d\tau} + P5 = P0 \cdot \frac{Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{сум}}} + P6 \cdot \frac{Q6}{Q_{\text{сум}}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}}}. \quad (6)$$

Позначимо у рівнянні (6) величину  $\frac{C1}{Q_{\text{сум}}}$  через  $T1$ , тоді маємо:

$$T1 \frac{dP5}{d\tau} + P5 = P0 \cdot \frac{Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{сум}}} + P6 \cdot \frac{Q6}{Q_{\text{сум}}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}}}. \quad (7)$$

Диференційне рівняння (7) описує зміну тиску  $P5$  у загальному колекторі в залежності від параметрів дуття, яке споживають доменні печі, а також від режиму роботи турбокомпресорів, які паралельно працюють на цей колектор. Як бачимо, у цьому рівнянні стала часу  $T1$  є величиною залежною від сумарного потоку дуття на вході і виході колектору. Крім того, на величину  $P5$  впливають не тільки параметри дуття кожної ДП, а і величина сумарного потоку дуття  $Q_{\text{сум}}$ . При традиційному режимі стабілізації тиску дуття на вході печі на певному заданому рівні кількість дуття, яку «бере» доменна піч, залежить від газопроникливості її стовпа шихти і є величиною змінною. Тобто  $Q_i$ , а значить і сумарний потік  $Q_{\text{сум}}$ , випадково коливаються навколо свого середнього значення. Таким чином, одержане диференційне рівняння є рівнянням зі змінними випадковими параметрами. Існує декілька способів вирішення таких рівнянь. Одним із найбільш простих є заміна випадкових параметрів їх середніми значеннями і перехід до традиційних методів вирішування диференційних рівнянь зі сталими параметрами. Рішення такого рівняння буде описувати перехідні процеси у даній системі забезпечення дуттям «у середньому» і є важливими при проектуванні та налагодженні систем автоматичного регулювання параметрів дуття при роботі з загальним колектором.

При проектуванні системи забезпечення дуттям через загальний колектор важливо знати загальні параметри такої системи, а саме – максимальний тиск  $P0$  і продуктивність  $Q_{\text{вх}}$  турбокомпресорів, максимально можливий тиск у загальному колекторі  $P5$  та інші.

Для відповіді на ці питання достатньо проаналізувати рівняння (7) з осередненими параметрами і в усталеному режимі, тобто після завершення перехідного процесу.

В усталеному режимі похідна  $T1 \frac{dP5}{d\tau} = 0$  і тоді рівняння (7) можемо записати так:

$$P5 = P0 \cdot \frac{Q_{\text{вх}}}{Q_{\text{сум}}} + P6 \cdot \frac{Q6}{Q_{\text{сум}}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}}}. \quad (8)$$

Окрім нульового значення похідної у сталому режимі потоки дуття на вході і виході загального колектора будуть однаковими, тобто:

$$Q_{\text{вх}} = Q_{\text{вих}}.$$

А це означає, що  $Q_{сум} = 2 \cdot Q_{ex}$ . Тоді із рівняння (8) маємо:

$$P5 = P0 \cdot \frac{Q_{ex}}{2 \cdot Q_{ex}} + P6 \cdot \frac{Q6}{2 \cdot Q_{ex}} + P7 \cdot \frac{Q7}{2 \cdot Q_{ex}} + P8 \cdot \frac{Q8}{2 \cdot Q_{ex}} + P9 \cdot \frac{Q9}{2 \cdot Q_{ex}}. \quad (9)$$

Скорочуючи однакові величини, одержуємо рівняння:

$$P5 = \frac{1}{2} \left( P0 + P6 \cdot \frac{Q6}{Q_{ex}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{ex}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{ex}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{ex}} \right). \quad (10)$$

В одержаному рівнянні величини  $P6, P7, P8, P9$ , а також  $Q6, Q7, Q8, Q9$  і відповідно  $Q_{ex} = Q_{вих}$  є величинами заданими, бо вони визначаються конструкцією печей. Тому із (10), знаючі параметри дуття для кожної печі, можна визначити, яким повинен бути тиск  $P5$  у загальному колекторі для певного типу турбокомпресора, тобто його певних технічних характеристик ( $P0$  та  $Q_{ex i}$ ).

Розглянемо приклад. Доменний цех має у своєму складі чотири ДП, основні характеристики яких наведені у таблиці.

Таблиця

Характеристика доменних печей

Номер печі	Об'єм [м3]	Витрати дуття [м3/хв]	Тиск дуття [бар]
ДП1	3000	6000	4,0
ДП2	1386	3100	3,0
ДП3	1386	3100	3,0
ДП4	1719	3500	3,3
		$\Sigma = 15700$	

Для забезпечення цих ДП передбачається встановити чотири турбокомпресори з продуктивністю кожного  $Q_{ex i} = 4500 \text{ м}^3 / \text{хв}$  і тиском  $P0 = 5 \text{ бар}$ . Для забезпечення дуттям передбачається загальний колектор дуття (рис. 1) і паралельна робота турбокомпресорів. Із таблиці знаходимо загальну кількість дуття  $Q_{ex}$ , яку повинні забезпечити турбокомпресори при їх паралельній роботі на чотири ДП.

$$Q_{ex} = \Sigma = 15700 \text{ м}^3 / \text{хв}.$$

Визначимо, яке значення тиску  $P5$  необхідно підтримувати у загальному колекторі, щоб забезпечити задані параметри дуття для доменних печей цеху. Із рівняння (10) знайдемо:

$$P5 = \frac{1}{2} \left( 5 + 4 \cdot \frac{6000}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3,3 \cdot \frac{3500}{15700} \right) =$$

$$= 0,5 \cdot (5 + 4 \cdot 0,3822 + 3 \cdot 0,1974 + 3 \cdot 0,1974 + 3,3 \cdot 0,2229) = 4,225 \text{ бар}$$

Таким чином, для забезпечення потрібних параметрів дуття розглянутих доменних печей при використанні чотирьох турбокомпресорів з тиском  $P0 = 5 \text{ бар}$  в загальному колекторі необхідно підтримувати тиск  $P5$  на рівні  $4,225 \text{ бар}$ .

Розглянута система з одним загальним колектором недостатньо осереднює сумарний потік дуття від турбокомпресорів, оскільки до цього ж колектору приєднуються трубопроводи дуття від кожної печі. Це може призводити до значного впливу параметрів дуття окремої печі на найближчий турбокомпресор, що, в свою чергу, може призвести до розбалансування їх паралельної роботи. Тому запропоновано використовувати два паралельних загальних колектора зі змішувальним трубопроводом між ними [3].

2. Система забезпечення дуттям доменних печей з двома загальними колекторами

Для тих же умов, тобто для тієї ж групи доменних печей, розглянемо систему з двома загальними колекторами, що з'єднані одним трубопроводом, який має газодинамічний опір  $R_6$  (рис. 2).

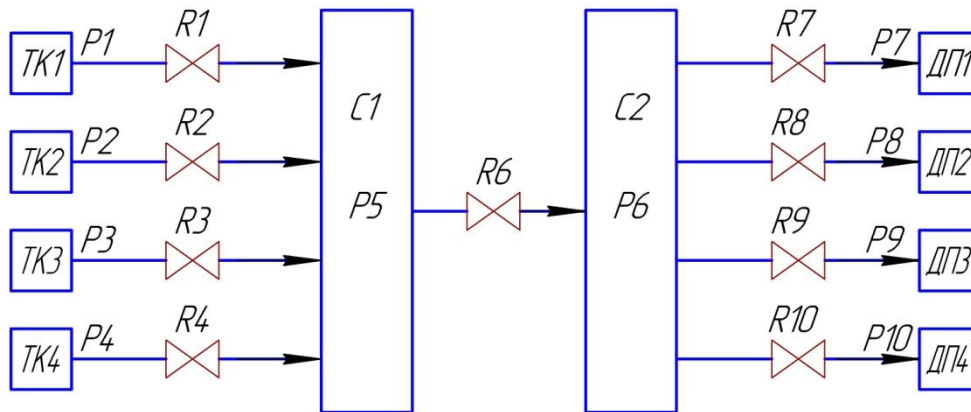


Рис. 2 – Система забезпечення дуттям доменних печей з двома загальними колекторами.

Запишемо рівняння для швидкості зміни тиску у першому колекторі по аналогії з рівнянням (11):

$$C_1 \frac{dP_5}{d\tau} = \frac{(P_0 - P_5)}{R_1} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_2} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_3} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_4} - \frac{(P_5 - P_6)}{R_6}. \quad (11)$$

Швидкість зміни тиску  $P_6$  у другому колекторі, який має ємність  $C_2$ , описується рівнянням:

$$C_2 \frac{dP_6}{d\tau} = \frac{(P_5 - P_6)}{R_6} - \frac{(P_6 - P_7)}{R_7} - \frac{(P_6 - P_8)}{R_8} - \frac{(P_6 - P_9)}{R_9} - \frac{(P_6 - P_{10})}{R_{10}}. \quad (12)$$

В рівняння (12) входить величина тиску  $P_5$  у першому колекторі. Таким чином, двохколекторна система забезпечення дуттям ДП описується системою із двох диференціальних рівнянь (11) та (12).

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dP_5}{d\tau} &= \frac{(P_0 - P_5)}{R_1} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_2} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_3} + \frac{(P_0 - P_5)}{R_4} - \frac{(P_5 - P_6)}{R_6}, \\ C_2 \frac{dP_6}{d\tau} &= \frac{(P_5 - P_6)}{R_6} - \frac{(P_6 - P_7)}{R_7} - \frac{(P_6 - P_8)}{R_8} - \frac{(P_6 - P_9)}{R_9} - \frac{(P_6 - P_{10})}{R_{10}}. \end{aligned} \quad (13)$$

Виконаємо перетворення рівнянь одержаної системи з урахуванням того, що  $\frac{1}{R_6} = Q_{\text{вих1}}$  є величина вихідного потоку дуття із першого колектора і вона ж є величиною вхідного потоку

дугтя  $Q_{\text{ex}2}$  для другого колектору. Крім того, як і раніше, позначимо  $Q_{\text{ex}1} + Q_{\text{вих}1} = Q_{\text{сум}1}$  для першого колектору і  $Q_{\text{ex}2} + Q_{\text{вих}2} = Q_{\text{сум}2}$  для другого. В результаті одержимо систему:

$$\begin{aligned} \frac{C1}{Q_{\text{сум}1}} \cdot \frac{dP5}{d\tau} + P5 &= P0 \cdot \frac{Q_{\text{ex}1}}{Q_{\text{сум}1}} + P6 \cdot \frac{Q_{\text{вих}1}}{Q_{\text{сум}1}}; \\ \frac{C2}{Q_{\text{сум}2}} \cdot \frac{dP6}{d\tau} + P6 &= P5 \cdot \frac{Q_{\text{ex}2}}{Q_{\text{сум}2}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}2}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}2}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}2}} + P10 \cdot \frac{Q10}{Q_{\text{сум}2}}. \end{aligned} \quad (14)$$

Замінюючи коефіцієнт перед похідною в обох рівняннях на сталу часу, відповідно,  $T1$  та  $T2$ , остаточно маємо:

$$\begin{aligned} T1 \cdot \frac{dP5}{d\tau} + P5 &= P0 \cdot \frac{Q_{\text{ex}1}}{Q_{\text{сум}1}} + P6 \cdot \frac{Q_{\text{вих}1}}{Q_{\text{сум}1}}; \\ T2 \cdot \frac{dP6}{d\tau} + P6 &= P5 \cdot \frac{Q_{\text{ex}2}}{Q_{\text{сум}2}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}2}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}2}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}2}} + P10 \cdot \frac{Q10}{Q_{\text{сум}2}}. \end{aligned} \quad (15)$$

Система диференційних рівнянь (15) описує поведінку в динаміці системи забезпечення ДП від двох колекторів. Як і в попередньому розділі, одержані диференційні рівняння системи є рівняннями зі змінними випадковими параметрами. Рішення даної системи буде описувати перехідні процеси у системі із двох колекторів при різних значеннях параметрів дугтя кожної із чотирьох ДП.

Розглянемо, як і для системи з одним колектором, усталений режим роботи даної системи. Прирівнявши похідні нулю та враховуючи, що в даному режимі всі вхідні та вихідні потоки однакові, тобто  $Q_{\text{ex}1} = Q_{\text{вих}1} = Q_{\text{ex}2} = Q_{\text{вих}2}$  і  $Q_{\text{сум}1} = Q_{\text{сум}2}$ , одержуємо систему алгебраїчних рівнянь.

$$\begin{aligned} P5 &= P0 \cdot \frac{Q_{\text{ex}1}}{Q_{\text{сум}1}} + P6 \cdot \frac{Q_{\text{вих}1}}{Q_{\text{сум}1}}; \\ P6 &= P5 \cdot \frac{Q_{\text{ex}2}}{Q_{\text{сум}2}} + P7 \cdot \frac{Q7}{Q_{\text{сум}2}} + P8 \cdot \frac{Q8}{Q_{\text{сум}2}} + P9 \cdot \frac{Q9}{Q_{\text{сум}2}} + P10 \cdot \frac{Q10}{Q_{\text{сум}2}}. \end{aligned} \quad (16)$$

З урахуванням рівності потоків дугтя в системі (16) будемо використовувати тільки позначення  $Q_{\text{ex}1}$  та  $Q_{\text{сум}1} = 2 \cdot Q_{\text{ex}1}$ . В результаті маємо систему двох алгебраїчних рівнянь виду:

$$\begin{aligned} P5 &= P0 \frac{1}{2} + P6 \frac{1}{2}; \\ P6 &= P5 \frac{1}{2} + P7 \cdot \frac{Q7}{2 \cdot Q_{\text{ex}1}} + P8 \cdot \frac{Q8}{2 \cdot Q_{\text{ex}1}} + P9 \cdot \frac{Q9}{2 \cdot Q_{\text{ex}1}} + P10 \cdot \frac{Q10}{2 \cdot Q_{\text{ex}1}} \end{aligned} \quad (17)$$

В системі (17) два рівняння та три невідомих величини  $P0$ ,  $P5$  та  $P6$ . Причому основною тут є величина  $P6$ , оскільки вона повинна забезпечувати потрібний тиск для всіх доменних печей. Головною вимогою до  $P6$  є те, що вона повинна бути більшою ніж максимально потрібний тиск для доменних печей даного цеху. Тому для рішення системи рівнянь (17) необ-



хідно знати максимально потрібний тиск дуття для ДП даного цеху і задаватись таким значенням  $P_6$ , яке було б більше цієї величини. Тоді, при заданому значенні  $P_6$ , вирішуючи систему (17), знаходимо значення  $P_5$ , а потім і потрібний тиск  $P_0$  турбокомпресорів та їх робочі характеристики.

Розглянемо, які значення повинні мати тиски  $P_6$  та  $P_5$  в першому та другому колекторах, використовуючи дані прикладу, наведеного у попередньому розділі. Оскільки для першої доменної печі даного цеху треба дуття у кількості  $Q_7 = 6000 \text{ м}^3 / \text{хв}$  та тиском  $P_7 = 4 \text{ бар}$ , то тиск  $P_6$  у другому колекторі, який забезпечує дуттям доменні печі, повинен бути більшим за цю величину, тобто, з певним запасом, це  $P_6 = 4,5 \text{ бар}$ . Тепер, підставляючи відповідні дані у друге рівняння системи (17), знайдемо значення тиску  $P_5$  у першому колекторі.

$$4,5 = P_5 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot \frac{6000}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{2 \cdot 15700} + 3 \cdot \frac{3100}{2 \cdot 15700} + 3,3 \cdot \frac{3500}{2 \cdot 15700}.$$

Звідси:

$$P_5 = 2 \cdot 4,5 - 4 \cdot \frac{6000}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3,3 \cdot \frac{3500}{15700} = 5,6 \text{ бар};$$

$$P_5 = 5,6 \text{ бар}.$$

Тепер із першого рівняння системи (17) знайдемо  $P_0$ .

$$P_0 = 2 \cdot P_5 - P_6 = 2 \cdot 5,6 - 4,5 = 11,2 - 4,5 = 6,7 \text{ бар}.$$

Таким чином, для даних доменних печей при використанні двох колекторної системи забезпечення дуттям необхідно:

- використовувати турбокомпресори з тиском  $P_0$  не менше  $6,7 \text{ бар}$ ;
- підтримувати тиск  $P_5$  у першому колекторі на рівні  $5,6 \text{ бар}$ ;
- підтримувати тиск  $P_6$  у другому колекторі на рівні  $4,5 \text{ бар}$ .

Якщо ж використовувати турбокомпресори такі, як і для одно колекторної системи, то одержимо такі значення тиску у першому і другому колекторах.

Підставимо у перше та друге рівняння системи (17)  $P_0 = 5 \text{ бар}$  та відповідні дані.

$$P_5 = \frac{1}{3} \left( 2 \cdot 5 + 4 \cdot \frac{6000}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3,3 \cdot \frac{3500}{15700} \right) = 4,48 \text{ бар};$$

$$P_6 = \frac{1}{3} \left( 5 + 4 \cdot \frac{6000}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3 \cdot \frac{3100}{15700} + 3,3 \cdot \frac{3500}{15700} \right) = 2,82 \text{ бар}.$$

Як бачимо, характеристики даних турбокомпресорів при цій системі подачі дуття не можуть забезпечити потрібні параметри дуття для розглянутих доменних печей.

### Висновки

1. Розглянуті два типи систем забезпечення дуттям групи доменних печей через загальний колектор – з одним колектором і двома колекторами, що з'єднані одним трубопроводом.
2. Розроблена математична модель систем забезпечення доменних печей через загальний колектор у вигляді диференціальних рівнянь з випадковими коефіцієнтами.
3. Виконано аналіз роботи обох типів систем забезпечення дуттям доменних печей шляхом заміни випадкових параметрів їх середніми значеннями і перехід до традиційних методів

вирішування диференційних рівнянь зі сталими параметрами.

4. Розгляд роботи систем у сталому режимі дозволив за допомогою одержаних диференційних рівнянь розрахувати технічні параметри турбокомпресорів, які можуть забезпечити дуттям задану групу доменних печей.

5. Наведені приклади розрахунків по вибору технічних параметрів турбокомпресорів для групи доменних печей з заданими характеристиками.

6. Використання двохколекторної системи забезпечення дуттям групи доменних печей дозволяє більш плавно регулювати роботу турбоповітродувок (при коливаннях кількості дуття окремих печей) за рахунок ємкості двох колекторів.

**Список використаних джерел:**

1. Тихомиров Е.Н. Комбинированное дутье доменных печей / Е.Н. Тихомиров. – М. : Металлургия, 1974. – 240 с.
2. Щедрин В.М. Теория доменной плавки под давлением / В.М. Щедрин. – М. : ГНТИЧ и ЦМ, 1962. – Т. 1. – 279 с.
3. Пашков В.Д. Воздуходувное хозяйство металлургических заводов / В.Д. Пашков. – М. : Металлургия, 1962. – 378 с.
4. Информационный ресурс : <http://www.accontrols.com>.

**Bibliography:**

1. Tikhomirov E.N. The combined blast of blast furnaces / E.N. Tikhomirov. – M. : Metallurgiya, 1974. – 240 p. (Rus.)
2. Shchedrin V.M. Theory blast furnace pressure / V.M. Shchedrin. – M. : GNTICH and CM, 1962. – Vol. 1. – 279 p. (Rus.)
3. Pashkov V.D. Blower economy ironworks / V.D. Pashkov. – M. : Metallurgiya, 1962. – 378 p. (Rus.)
4. Information resource : <http://www.accontrols.com>.

Рецензент: В.О. Маслов  
д-р техн.наук, проф., ДВНЗ «ЛГТУ»

Стаття надійшла 05.05.2016