

УДК 622.48

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ПРИСТРОЮ
АВТОМАТИЗАЦІЇ ПРОЦЕСУ ПОДАВАННЯ АЗОТУ У
ІЗОЛЬОВАНИЙ ОБ'ЄМ АВАРІЙНИХ ВИРОБОК

Булгаков Ю.Ф., Гавриленко Б.В., Костенко Т.В.
ДонНТУ

Рассмотрен вопрос математического моделирования работ по автоматизации подачи воздуха в изолированный объем пожарного участка

Державна воєнізована гірничорятувальна служба Міністерства палива та енергетики України (ДВГРС) щорічно бере участь у ліквідації 73-210 аварій зі значними руйнуваннями і травмами (у тому числі смертельними) людей. Більшість підземних аварій, ліквідованих ДВГРС, зв'язано з пожежами, питома вага яких складає 54%, з обваленнями гірських порід (22,5%) і загазованістю (7,7%). При обсязі видобутку вугілля який складає 2% від світового, кількість аварій 1-й категорії, зв'язаних з пожежами, вибухами газу і пилю на українських шахтах складає 37% від загальної кількості у вугільній промисловості всіх країн світу.

Крім прямих збитків, зв'язаних із утратою техніки, гірських вироблень і підготовлених до виїмки запасів вугілля, у інтенсивно відпрацьовуваних виїмкових полях особливо великі збитки зв'язані з простоями лав або несвоєчасною підготовкою фронту очисних робіт. За останні роки пожежами були виведені з експлуатації або ускладнена підготовка самих продуктивних в Україні виїмкових полів на шахтах: "Привольнянська", ім. О.Ф. Засядька, «Красноліманська», ім. Г.Г. Капустіна, "Самсоновська-Західна" і ін.

Найбільш складні пожежі виникають у важкодоступних місцях, таких як вироблений простір, у ціликах, за кріпленням підготовчих виробок. Придушення вогнищ горіння в таких умовах утруднено, чим обумовлена найвища тривалість ліквідації цього виду підземних аварій. Намітилася тенденція до збільшення тривалості і трудомісткості їхнього гасіння.

Одним з найбільш перспективних способів попередження, локалізації і гасіння ендогенних і екзогенних пожеж у шахтах є інертизація атмосфери аварійної ділянки, під якою розуміють штучне зниження концентрації кисню в атмосфері гірських виробок шляхом подачі в нього інертного газу. Інертизація за допомогою газоподібного азоту дозволяє вирішити наступні задачі в ході

ліквідації підземної пожежі: скоротити термін ліквідації аварії; запобігти вибухи газоповітряної суміші на аварійній ділянці; прискорити охолодження високотемпературної зони до безпечного рівня; скоротити до мінімуму або цілком припинити процес горіння.

Гасіння підземних пожеж у важкодоступних місцях, таких як вироблені простори лав, деформовані вугільні цілини, куполи за кріпленням підготовчих виробок, бункера тощо, є найбільш трудомістким, тривалим, небезпечним і дорогим видом підземних гірничорятувальних операцій у сучасній світовій практиці вуглевидобутку. Безпосередній вплив у таких умовах на пожежу вогнегасними засобами, як правило, неможливий через складність проникнення до вогнища горіння, погрози ускладнення таких аварій задимленням, загазуванням, а нерідко вибухами пилогазоповітряних сумішей, обваленнями гірських порід у виробки, нестабільності режимів провітрювання і підвищених температур у місцях ведення аварійних робіт. Унаслідок важкодоступності і неінтенсивного проникнення повітря неефективним є використання водяних, пінних, порошкових і інших, що знаходяться на оснащенні гірничорятувальних частин засобів пожежогасіння. Технології, засновані на ізоляції аварійних вироблень штучними спорудженнями, з наступним спорудженням камер вирівнювання тиски представляються досить громіздкими і недостатньо надійними. Найбільш перспективним, а нерідко єдино можливим, представляється дистанційне гасіння за допомогою газових засобів.

Способи і засоби подачі азоту вибирають, виходячи з гірничотехнічних умов, наявності технічних засобів подачі азоту, прийнятої технологічної схеми випуску його в гірські виробки аварійної ділянки й обраного способу ліквідації аварії. Для цього, як правило, використовують рідкий азот і установки для його газифікації. Застосування рідкого азоту стримують властиві цієї технології недоліки: необхідність застосовувати дефіцитне коштовне криогенне обладнання; складність і дорожняча транспортування і збереження, значні втрати при цьому; витрати енергії на газифікацію й ін.

Гірничорятувальні частини багатьох вуглевидобувних країн оснащені генераторами інертних газів на основі турбореактивних двигунів, криогенними азотними і балонними вуглекислотними установками, іншою технікою газового пожежогасіння. Цим технічним засобам властиві такі недоліки як висока вартість вихідних компонентів, складність і небезпека їхнього транспортування по виробленнях, низька продуктивність та інші.

Одним з перспективних шляхів подолання цих недоліків є реалізація сучасної технології одержання з повітря газових сумішей з низьким змістом кисню за допомогою газорозподільних мембран.

Рекомендується застосовувати газоподібний азот у наступних випадках: при ізоляції пожежних ділянок, а також при ізоляції в сполученні з різними способами прискорення процесу охолодження вогнища пожежі (рециркуляція, періодична зміна напрямку руху пожежних газів і т.д.) для попередження вибухів і припинення горіння; при ліквідації пожеж у горизонтальних тупикових виробленнях будь-якої довжини, у випадку подачі азоту в тупикову частину по трубопроводу (можливий варіант подачі азоту через вентилятори місцевого провітрювання і вентиляційні трубопроводи); при веденні підливних робіт у гірських виробках для створення інертного середовища в місці виробництва вибуху; для попередження ендогенних пожеж у скупченнях вугілля, що утворилися в результаті раптових викидів.

Однак, досвід застосування газорозподільних установок при ліквідації підземних аварій на шахтах ім. О.Ф. Засядька в Донецьку, ім. Ф.Э. Держинського ГП «Ровенькиантрацит» і інших показав, що домогтися ефективного придушення вогнищ горіння з їхньою допомогою не вдається.

Проблема полягає в тому, що в отриманому з працюючих в оптимальному режимі мембранних установок азоті знаходиться до п'яти відсотків кисню. Крім того, в ізолюваний обсяг надходить у виді витоків повітря, що фільтрується через тіло перемички і тріщини в породах, що уміщують виробки. Концентрація кисню в ізолюваному перемичками обсязі збільшується до 10% і більш. Таким чином, не забезпечується необхідний для придушення тліючого горіння склад газової суміші, у якій зміст кисню не повинний перевищувати 1..2%.

У ДонНТУ запропоновано забезпечити раціональний режим інертизації ізолюваного обсягу гірських виробок за рахунок використання енергії потоку інертного газу, що надходить від мембранної установки. Для цього у виробці зводять додаткову ізолюючу перемичку, а від трубопроводу для подачі азоту роблять відгалуження, через яке газ надходить у простір (камеру) між двома перемичками (рис. 1).

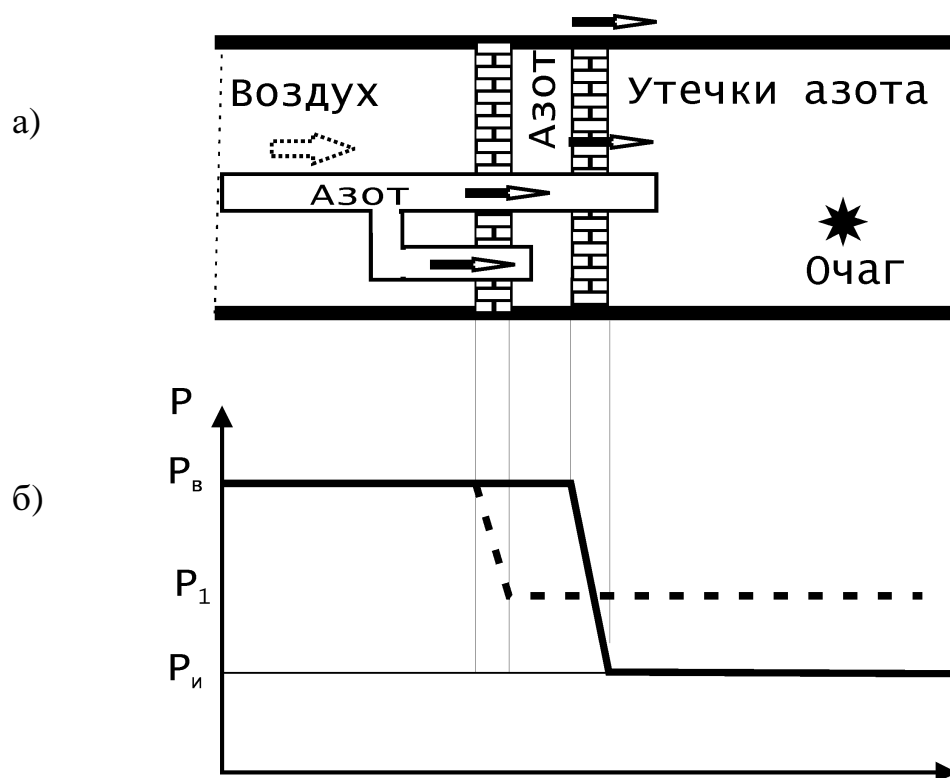


Рис.1 - Схема подачі інертного газу до вогнища горіння з запобіганням витоків повітря (а) і розподіл тиску газу (б) у виробці при новому (суцільна) і старому (пунктир) способах інертизації: P_v , $P_{и}$, - відповідно газовий тиск до і за ізолюючою перемичкою; P_1 – газовий тиск за ізолюючою перемичкою при існуючому способі

Тиск азоту в трубопроводі досягає одного МПа і набагато перевищує повітряний напір на перемичку, що складає кілька десятків даПа. Після заповнення камери азотом, його подачу через відгалуження регулюють таким чином, щоб вирівняти тиск у виробці з боку свіжого повітряного струменя, що надходить, і між перемичками. Це виключає підсмоктування повітря через зведену перемичку в камеру. З іншої сторони перепад тисків перерозподіляється на ділянці виробки, розділеної додатковою перемичкою по обох сторони якої знаходиться азот. В ізолювану в такий спосіб виробку через зведену додаткову перемичку буде мати місце підсмоктування винятково азоту, що підвищує ефективність гасіння підземної пожежі.

Після заповнення азотом ділянки аварійної виробки між перемичками і вогнищем самонагрівання або горіння, інтенсивність

подачі інертного газу можна зменшити. Мінливість тиску перед камерою з боку свіжого повітряного струменя обумовлено коливаннями депресії через: зміну атмосферного тиску і режимів роботи вентилятора головного провітрювання; перехідних процесів у мережі гірських вироблень при відкриванні шлюзів, підривних роботах; поршневого ефекту при пересуванні шахтного транспорту; включення і відключення вентиляторів місцевого провітрювання; обвалення покрівлі у виробленому просторі.

Усі ці процеси носять випадковий характер, тому забезпечення рівності тисків можливо тільки шляхом автоматичного регулювання тиску азоту в камері. Крім того, існує необхідність забезпечення вогнегасної концентрації азоту не нижче 98%. Згідно основним технічним даним установки АМГП-15/0,7СУ1 при номінальному тиску близько 1,1 МПа вміст азоту складає тільки 95,5%. Така концентрація не забезпечує придушення тліючого горіння деревини, що створює погрозу рецидиву пожежі при розкритті ізольованої ділянки. Підвищити вміст азоту і знизити вміст кисню можна тільки шляхом зниження тиску на мембранах. Зниження тиску на мембранах забезпечує також економічну ефективність, що порозумівається зниженням витрати електроенергії на роботу компресора. Однак, зниження подачі азоту спряжено з погрозою вибуху метаноповітряної суміші в районі вогнища горіння. Інертизація атмосфери в ізольованій ділянці зв'язана з необхідністю забезпечення такого співвідношення метану, азоту і кисню, щоб воно знаходилося поза „трикутником вибуховості”.

Принцип регулювання полягає в наступному. У гірничій виробці з боку свіжого струменя повітря, що надходить, і в ізольованій камері встановлюються датчики тиску, що мають електричний вихідний сигнал. Як основне джерело інформації використовуються електричні вихідні сигнали від двох датчиків тиску, що встановлені в гірському виробленні з боку свіжого струменя повітря, що надходить, і в перемичці.

У блоці логіки системи регулювання порівнюється величина тиску у виробленні зі свіжим струменем повітря й у камері. Якщо ці тиски не рівні, виробляється сигнал на примусове відкривання через виконавчий механізм керованої засувки, установленої на відгалуженні трубопроводу, що подає азот у камеру. Зміст азоту в камері збільшується доти, поки не буде забезпечена рівність тисків у камері й у виробленні зі свіжим струменем повітря. Після цього система регулювання виробляє команду на автоматичне закриття засувки і припинення подачі азоту в камеру. Після стабілізації

робочого тиску в камері подальша робота системи регулювання подачі азоту здійснюється в режимі, що стежить.

Далі інертний газ подають тільки в зону гасіння пожежі доти, поки концентрація кисню не знизиться до 2%.

Система автоматизації гасіння ендогенних пожеж інертним газом в умовах шахти повинна нормально функціонувати без постійного втручання обслуговуючого персоналу і забезпечувати: автоматичне регулювання подачі газоподібного азоту в залежності від концентрації кисню в зоні горіння і перепаду тисків у камері між ізолюючими перемичками і з боку свіжого струменя; автоматичну зупинку роботи системи при досягненні необхідного рівня концентрації кисню в зоні горіння.

При створенні системи автоматизації було прийняте рішення використовувати для виміру тиску атмосфери на свіжому струмені й у камері між перемичками датчики ТНР-1.

Пропоновані до використання в системі датчики виміру фізичних параметрів атмосфери ТНР-1 мають вибухобезпечне виконання, розроблені і випускаються Центром Електрифікації й Автоматизації у вуглевидобувній промисловості ЕМАГ (Катовіце, Польща). Крім тиску датчик дозволяє тривалий час з високою точністю вимірювати температуру і вологість повітря в шахтній атмосфері (таблиця 1).

Саме датчики даного типу мають діапазони вимірів, що підходять для вимірів тиску в умовах розглянутого технологічного процесу.

Таблиця 1– Основні технічні дані датчика ТНР-1

Вимір тиску з точністю ± 0.1 Па	800.....1300гПа
Вимір вологості при $t \leq 400\text{C}$ з точністю $\pm 3\%$	10...95...95%
Вимір температури з точністю ± 0.203,	0.....500К
Час готовності до роботи	40 с
Час автономної роботи без джерела живлення	до 8 ч
Габарити	235×335×130 мм
Маса	близько 3 кг

Для контролю концентрації кисню у зоні гасіння пожежі використовується ЭГС - стаціонарний багатоканальний газоаналізатор

Розроблений многоканальний газоаналізатор ЕГС призначений для виміру концентрацій пальних (метан, пропан, водень) і токсичних газів, видачі попереджувальної й аварійної сигналізації і реалізації програм автоматичного захисту об'єктів. Кількість вимірювальних каналів ЕГС - 64.

Контрольовані гази: пальні гази: метан, пропан, водень, етанол; токсичні гази: CO; CO₂; NO₂; H₂S; SO₂; NH₃; Cl₂; кисень O₂.

Принцип дії ЕГС полягає у вимірі концентрації газів за допомогою виносних датчиків (оптичних, електрохімічних або термokatалітичних у необхідній комбінації) і передачі результатів вимірів по стандартному цифровому каналі зв'язку RS-485 у блок керування.

Напруга живлення подається до датчика через бар'єр іскробезпеки. Споживана потужність для кожного датчика не більш 100 мВт.

ЕГС максимально відповідає запитам споживачів на об'єктах, де може існувати дефіцит електроенергії - наприклад, шахти або інші об'єкти з автономним енергопостачанням.

Блок керування встановлюють поза вибухонебезпечною зоною. Блок керування здійснює: живлення датчиків; перетворення сигналів від них і висвітлення поточних показань на цифровий індикатор; керування сигналізацією і зовнішніми виконавчими пристроями.

Робота виносних інфрачервоних оптичних датчиків, призначених для виміру концентрації двооксиду вуглецю, метану, пропану і етанолу заснована на зміні інтенсивності інфрачервоного випромінювання після проходження їм середовища з контрольованим газом.

Таким чином, при контролі метану, пропану, етанолу і вуглекислого газу реалізовані всі переваги оптичних датчиків.

Електрохімічні і термokatалітичні датчики призначені до контролю концентрації кисню, токсичних і пальних газів.

Час установлення показань для оптичних датчиків - 10с, для термokatалітичних – 30с, для електрохімічних – 60с.

Оптичні датчики мають розширений температурний діапазон експлуатації від мінус 40 до 55°С. Термokatалітичні й електрохімічні датчики призначені для експлуатації при температурі від мінус 20 до 50°С

Спосіб добору проби датчиками - дифузійний.

Блок керування має вихід стандартного каналу зв'язку RS-485 для підключення до комп'ютера верхнього рівня при використанні газоаналізатора в складі автоматизованих систем. На ЕОМ може бути

передана вся інформація з датчиків по поточному моніторингу об'єктів, а також службова інформація про стан кожного датчика.

У перспективі до кожного з каналів блоку керування можуть бути підключені: різні газові датчики; датчики температури, вологості, тиску, швидкості вітру; пожежні сповіщувачі й інші пристрої.

Дотепер не було зроблено спроб по створенню автоматизованих пристроїв і систем гасіння пожеж інертним газом. Гасіння підземних пожеж у важкодоступних місцях, таких як вироблені простори лав, деформовані вугільні цілини, куполи за кріпленням підготовчих виробок, бункера тощо, є найбільш трудомістким, тривалим, небезпечним і дорогим видом підземних гірничорятувальних операцій у сучасній світовій практиці вуглевидобутку. Тому участь людей у цьому процесі вкрай небажано і небезпечно для здоров'я і життя гірничорятувальників.

Використання автоматизованого керування процесом гасіння ендогенних пожеж інертним газоподібним азотом дозволить звести до мінімуму участь людей у ліквідації аварії й ефективно завершити даний технологічний процес.

Розроблювальний пристрій регулювання подачі азоту в зону гасіння пожежі буде виконано на базі мікроконтролера, за допомогою якого будуть видаватися сигнали на відкриття і закриття засувки у залежності від двох контрольованих параметрів (концентрації кисню в зоні горіння і різниці тисків атмосфери з боку струменя, що надходить, і в ізолюючій камері між перемичками).

На рис. 2 зображена схема подачі інертного газу в зону гасіння пожежі, а також показані основні параметри, які характеризують об'єкт автоматизації.

Перепад тиску при ламінарної течії повітря:

$$P_K - P_1 = RQ_1 \quad (1)$$

$$P_K - P_0 = RQ_2 \quad (2)$$

$$P_0 - P_2 = RQ_3 \quad (3)$$

Рівняння стану ідеального газу:

$$PV = \frac{m}{M}RT \quad (4)$$

$$\Delta PV = \frac{\Delta m}{M} RT = \frac{\rho Q \Delta t}{M} RT \quad (5)$$

$$\frac{(Q_{NK} - Q_1 - Q_2)\rho}{M} RT_K \Delta t = \Delta P_K V_K \quad (6)$$

$$\frac{(Q_{NO} + Q_2 - Q_3)\rho}{M} RT_O \Delta t = \Delta P_O V_O \quad (7)$$

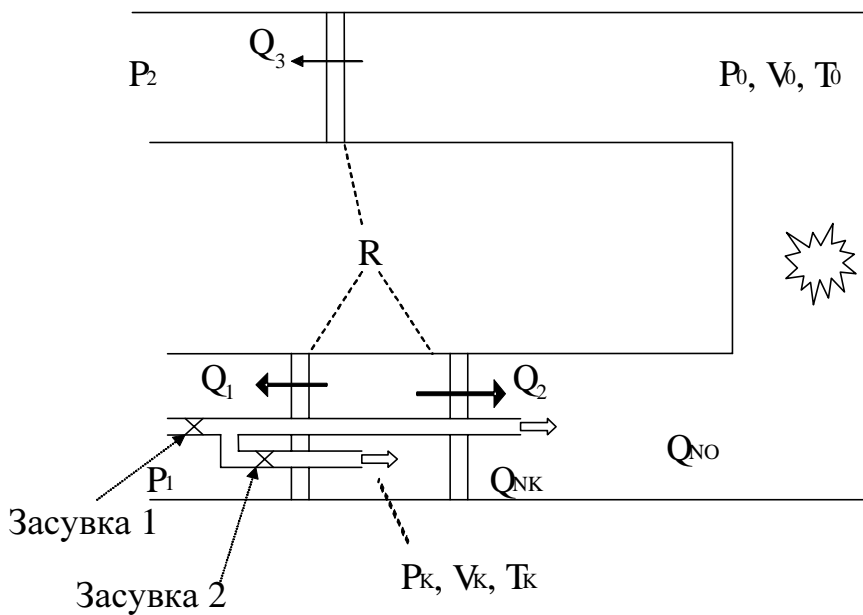


Рис. 2 - Схема подачі азоту в зону гасіння пожежі: де - $R=247$ кц – величина аеродинамічного опору для перемичок, зведених з бетонітів, для виробок перетином 15 м^2 ; $Q_1=Q_2=Q_3=27 \text{ м}^3/\text{хв}$ – витрата газу через тіло перемички; $Q_{NO}=15 \text{ м}^3/\text{хв}$ – подача азоту в зону вогнища горіння; Q_{NK} – подача азоту в ізолюючу камеру між перемичками; $P_1=105\text{Па}$ – атмосферний тиск у виробці з боку свіжого струменя; $P_2=90000\text{Па}$ – атмосферний тиск у виробці на вихідному струмені; $P_0=92000\text{Па}$, $V_0=48000\text{м}^3$, $T_0=1500^\circ\text{C}$ - відповідно тиск, обсяг, температура у вогнищі горіння; $P_K=95000\text{Па}$, $V_K=75\text{м}^3$, $T_K=25^\circ\text{C}$ - відповідно тиск, обсяг, температура в ізолюючій камері між перемичками;

Отримуємо, що

$$K_K = \frac{\rho RT_K}{MV_K} \quad (8)$$

$$K_O = \frac{\rho RT_O}{MV_O} \quad (9)$$

Похідні тиску:

$$\frac{dP_K}{dt} = K_K (Q_{NK} - Q_1 - Q_2) \quad (10)$$

$$\frac{dP_K}{dt} = -K_K \left(\frac{P_K - P_1}{R} \right) \quad (11)$$

$$\frac{dP_K}{dt} + \frac{K_K}{R} P_K = \frac{K_K}{R} P_1 \quad (12)$$

$$\frac{dP_K}{dt} \frac{R}{K_K} + P_K = P_1 \quad (13)$$

Отримуємо передаточну функцію:

$$W(p) = \frac{1}{\frac{R}{K_K}} p + 1 \quad (14)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{11} = K_{3K} \left(\frac{\rho RT_K}{MV_K} \right) \frac{1}{p} \\ G_{12} = -K_{3K} \left(\frac{\rho RT_K}{MV_K} \right) \left(\frac{1}{\frac{MV_O}{\rho T_O} p + 1} \right) \frac{1}{p} \\ G_{22} = K_{30} \left(\frac{\rho RT_O}{MV_O} \right) \frac{1}{p} \\ G_{21} = K_{30} \left(\frac{\rho RT_O}{MV_O} \right) \left(\frac{1}{\frac{MV_K}{\rho T_K} * p + 1} \right) \end{array} \right. \quad (15)$$

Це дає змогу створити структурну схему подачі інертного газу в зону гасіння пожежі (рис. 3).

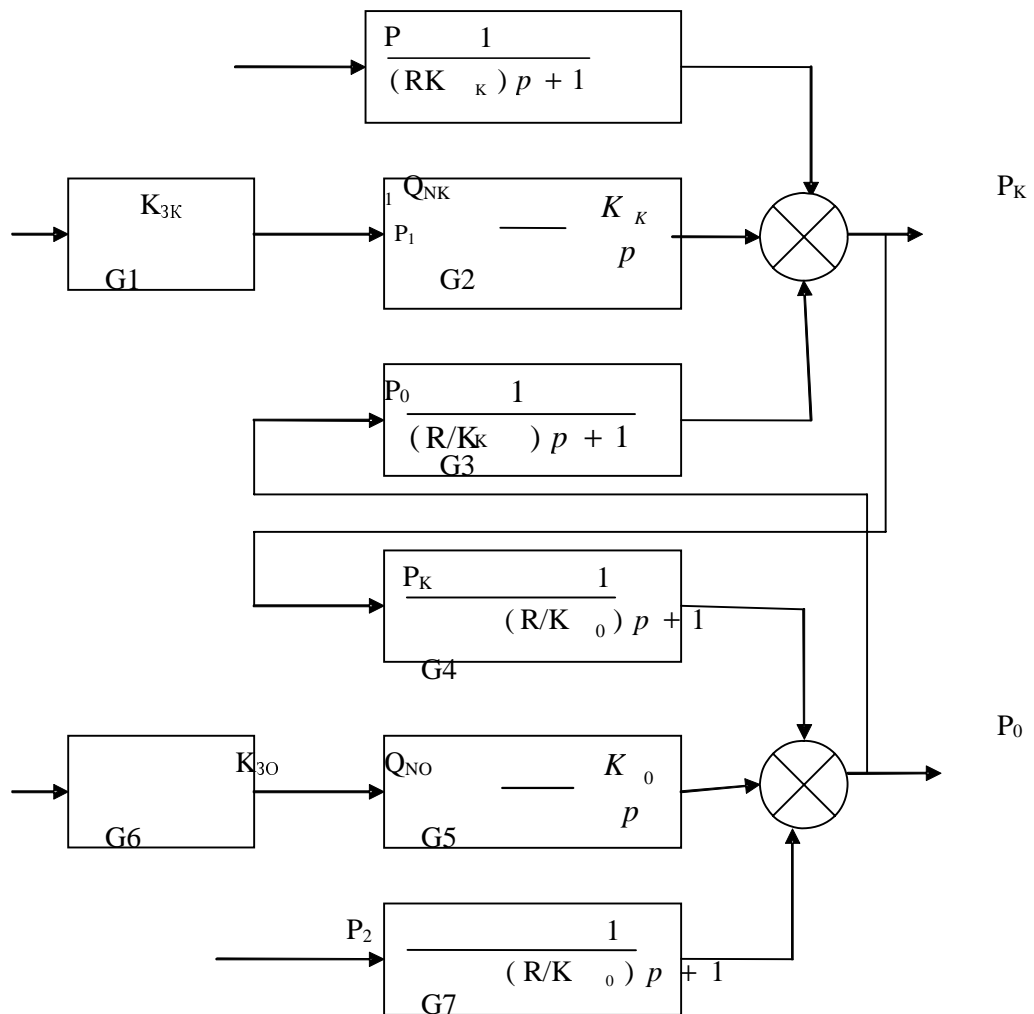


Рис. 3 – Структурна схема подачі інертного газу в зону гасіння пожежі:

де - K_{3K} і K_{30} – коефіцієнти, що характеризують керовані засувки на трубопроводах, що подають інертний газ в ізолюючу камеру й у зону вогнища горіння відповідно; K_K і K_0 – коефіцієнти, що характеризують основні параметри ізолюючої камери і вогнища горіння відповідно; $K_K=43,848$; $K_0=0,408$

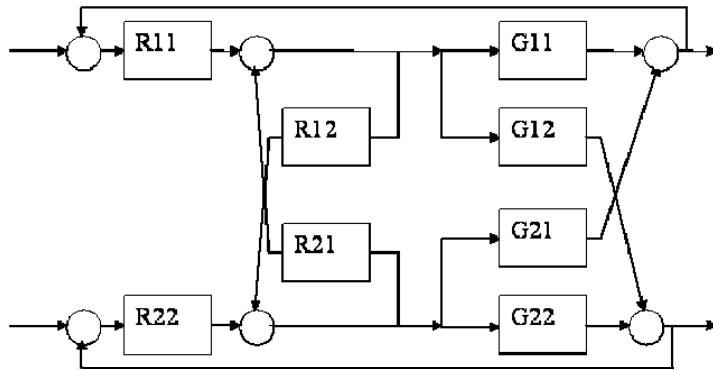


Рис. 4 – Розв'язка P- канонічного об'єкта за допомогою V- канонічних перехресних регуляторів, розташованих після головних Підставляємо значення відомих параметрів:

$$\begin{cases} G_{11} = \frac{43.85K_{3K}}{p} \\ G_{12} = -\frac{43.85K_{3K}}{p(605.95p+1)} \\ G_{22} = \frac{0.408K_{30}}{p} \\ G_{21} = \frac{0.408K_{30}}{p(5.63p+1)} \end{cases} \quad (16)$$

$$R_{12} = -\frac{G_{12}}{G_{22}} = -\frac{107.48K_{3K}}{K_{30}(605.85p+1)} \quad (17)$$

$$R_{21} = -\frac{G_{21}}{G_{11}} = -\frac{0.0093K_{30}}{K_{3K}(5.63p+1)} \quad (18)$$

На рис 5 приведено структурну схему моделювання процесу подачі азоту в аварійну виробку, а на рисунку 6 результати моделювання.

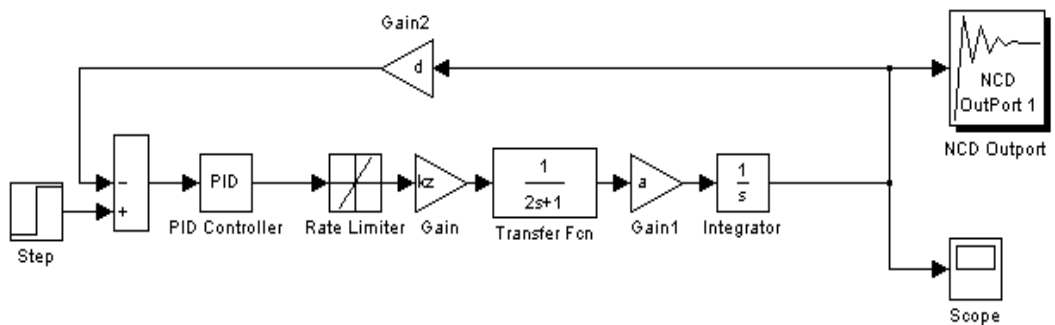


Рис.5 – Структурна схема моделювання зміни тиску в ізолюючій камері між перемичкам

У результаті моделювання встановлено, що обрані параметри ПИД-регулятора R11 забезпечують стійкість системи керування тиском азоту між перемичками при зміні термодинамічних параметрів джерела горіння.

Аналогічно вибираються параметри другого ПИД-регулятора R22.

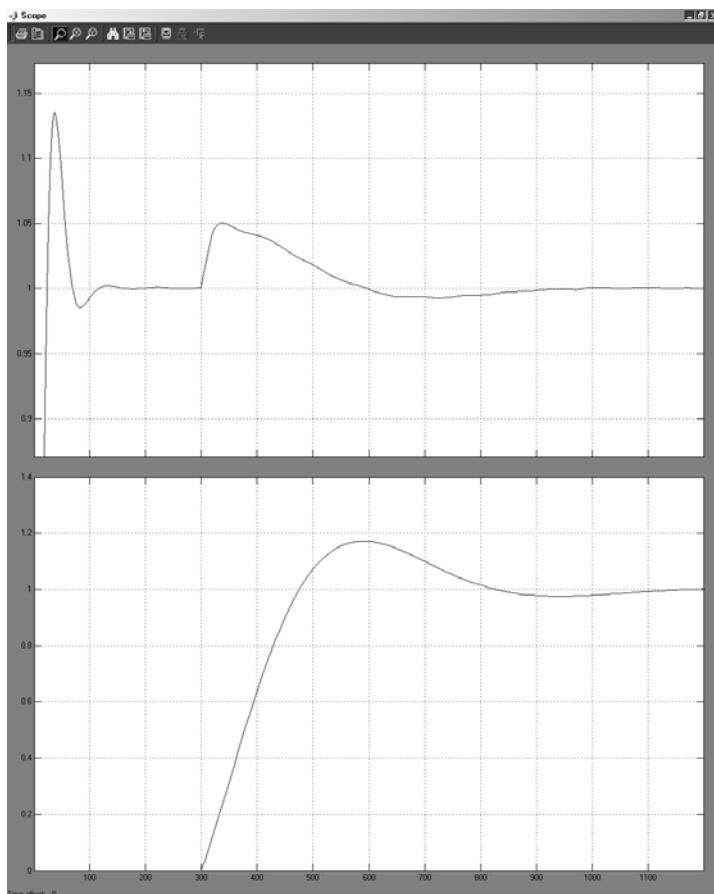


Рис. 6 – Результати моделювання зміни тиску в ізолюючій камері між перемичками (знизу) та зі сторони свіжого струменя (зверху)

Обґрунтована структура системи керування дозволяє перейти до практичної реалізації системи автоматичної подачі азоту в зону підземної пожежі.

30.04.08