

## МОДЕЛЮВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ У СИСТЕМАХ ГАЗОПОСТАЧАННЯ НАСЕЛЕНИХ ПУНКТІВ

Ю.І. Дорошенко, В.Б. Михалків

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (03422) 42166,  
e-mail: tzgn@nung.edu.ua

*Запропоновано конструктивні шляхи відновлення стабільної роботи системи газопостачання у випадку аварійного відключення окремих споживачів або системи в цілому.*

Ключові слова: газові мережі, нестационарні процеси, аварійні ситуації, неперервний відбір, математичне моделювання, динаміка зміни витрати, динаміка зміни тиску, споживачі

*Предложены конструктивные пути восстановления стабильной работы системы газоснабжения в случае аварийного отключения отдельных потребителей или системы в целом.*

Ключевые слова: газовая сеть, нестационарные процессы, аварийные ситуации, непрерывный отбор, математическое моделирование, динамика изменений расходов, динамика изменений давлений, потребители

*Offer constructive ways to restore stability of the gas supply system in the event of accidental disconnection of individual consumers or the system as a whole.*

Keywords: gas network, nonstationary processes, emergency situations, continuous selection, mathematical modeling, the dynamics of cost changes, the dynamics of pressure changes, consumers

Газова галузь є провідною в енергетично-му комплексі країни і світу в цілому. Довжина трубопроводів єдиної системи газопостачання складає 283,2 тис.км, із них на системи магістрального транспортування газу припадає 37,1 тис.км, а на розподільні системи газопостачання - 246,1 тис. км. Керування функціонуванням та розвитком цих систем ставить різноманітні технічні та економічні задачі, що з часом ускладнюються. Газові мережі, як правило, працюють в нестационарних режимах. Крім змінних графіків газоспоживання на величину нестационарності впливає ряд причин: вихід з ладу обладнання, розриви трубопроводів, гідратуутворення, корозійні процеси та зміни режимів газопостачання, що виникають внаслідок керування системами газопостачання персоналом. Тому актуальною та однією з важливих завдань оперативного керування газотранспортними системами є вибір оптимальних режимів експлуатації системи при нестационарних режимах руху газу. Розв'язання поставлених задач вимагає розроблення математичних методів та відпрацювання програмної їх реалізації, результатом яких будуть технологічні проектні рішення, що сприятимуть зниженню енергетичних затрат на транспортування та розподіл газу. Проведений аналіз технологічних та методичних аспектів моделювання, керування та розвитку газорозподільних систем за умов нестационарності течії [1, 2, 3, 4, 5] свідчить про те, що це питання вивчено недостатньо. Тому метою даної роботи є розроблення математичного алгоритму для проведення проектних гідравлічних розрахунків систем газопостачання для пошуку шляхів скорочення витрат на спорудження і експлуатацію газової мережі, а також скорочення прямих і непрямих збитків споживачів унаслідок недоподавання газу або зниження тиску в газовій мережі за рахунок

врахування чинників впливу на зміни режимів експлуатації.

Причини нестационарності поділяються на зовнішні (коливання відборів та споживань) та внутрішні (параметричні коливання, що залежать від зміни окремих параметрів системи, наприклад гідравлічного опору газопроводів внаслідок їх старіння). Зовнішні причини, в свою чергу, можуть бути поділені на три групи: періодичні внаслідок змін газоспоживання, ступеневі, що заплановані заздалегідь (планові ремонти) та випадкові (у аварійних ситуаціях).

Аварійні ситуації в розподільних газових мережах можуть виникнути внаслідок механічних, корозійних пошкоджень мереж та розривів зварних швів.

Механічні пошкодження виникають під час проведення поблизу мереж будівельних робіт. Також існує значна ймовірність випадкових пошкоджень.

Іншим видом пошкоджень в газових мережах є розриви зварних з'єднань.

Аварійні ситуації виникають через пошкодження запірної арматури. Наслідком виходу з ладу арматури є відключення великих ділянок газопостачання для проведення ремонтних робіт. Як правило, аварії виникають в місцях грубих порушень технічних умов здійснення зварювальних робіт під час монтажу та ремонту газопроводів.

Аварійні ситуації через пошкодження на лінійній частині виникають не так часто. Головним можливим джерелом аварій є вихід з ладу дросельних елементів на ГРС. Відмова дросельних елементів викликається вібраціями, ерозіями поверхонь, гідратуутворенням, корозійними процесами. Джерелом вібрацій є турбулентність руху газу, що призводить до усталених пошкоджень.

Відмови в системах газопостачання наносять велику шкоду: зривається стабільна робота споживачів, псується обладнання та сировина.

У промислових містах східної України, наприклад, при короткочасному припиненні подавання газу виходять з ладу металургійні печі, які мають тривалий час переходу на альтернативне паливо.

Аварійні ситуації виникають внаслідок аварійних витоків газу з газопроводів. В момент появи витоків по довжині трубопроводу та в часі змінюються тиск та витрата. Через певний час відбувається стабілізація потоку і параметрів, а також встановлюється новий стаціонарний режим або режим, близький до стаціонарного. Таким чином, для аналізування аварійних станів газопроводів та їх впливу на параметри газопостачання необхідно розглядати не тільки стаціонарні, але й нестаціонарні режими газопостачання.

Розподільні газові мережі систем газопостачання населених пунктів по довжині мають шляхові відбори газу. При цьому шляхові відбори зосереджені в певних точках. Для спрощення розрахунку зосереджені відбори у газових мережах представляють як неперервні по довжині газопроводу. При цьому забезпечується достатня точність розрахунків.

Розглянемо як змінюються тиск та витрата під дією аварійних витоків, якщо газ поступає від газорозподільної станції

$$\frac{P_{1a}^2 - P_{2a}^2}{P_1^2 - P_2^2} = \frac{r^2 - \left(\frac{P_{2a}}{P_2}\right)^2}{r^2 - 1}, \quad (1)$$

де:  $P_{1a}$ ,  $P_{2a}$  – тиски на початку та в кінці газопроводу після аварії;

$P_1$ ,  $P_2$  – тиски на початку та в кінці газопроводу до аварії;

$$r = \frac{P_1}{P_2} \text{ – відношення тисків.}$$

На зміну витрати і тиску при появі аварійних витоків в газопроводах впливає величина шляхового відбору газу.

Відносна зміна тиску в кінці газопроводу складає

$$\delta p = (P_2 - P_{2a})(P_1 - P_2). \quad (2)$$

Об'ємна витрата на ділянці до місця аварії

$$Q = Q_T + Q_{II} - qx_1; \quad (3)$$

після аварії

$$Q = Q_T + q(l - x) - q_y, \quad (4)$$

де  $q_y$  – секундна витрата витоків.

Проаналізувавши отримані математичні залежності можна зробити висновок, що величина зміни тиску при аварійному витокі газу тим більша, чим менша величина шляхового відбору газу. І величина витоків жодним чином не впливає на параметри. Найбільші зміни тиску в кінці газопроводу під впливом аварійних витоків буде тільки у випадку транзитної витрати.

Із зростанням аварійних витоків збільшується зміна тиску в кінці газопроводу. При зміні гідравлічного режиму руху газу від ламінарного до квадратичного однаковий аварійний виток призводить до все більшої зміни тиску в кінці газопроводу. Віддалення місця аварійного витоків від початку газопроводу, де тиск підтримується сталим, призводить до зростання зміни тиску в кінці газопроводу.

Проведений аналіз дає можливість прогнозувати характер зміни тиску в кінці газопроводу при аварії і робити вибір та розрахунок пристроїв аварійної сигналізації.

Неусталений рух газу в газопроводах викликається нерівномірним по часу відбором газу, нерівномірною подачею газу тощо. У процесі роботи газопроводу поява аварійних витоків здійснює додатковий вплив на неусталені процеси. Відбувається накладання впливу різних чинників на неусталений процес. Тому виявлення аварійних витоків серед розмаїття чинників неусталеного процесу є дуже важким. Оскільки шляховий відбір газу може бути як неперервний, так і зосереджений, то розглянемо обидва випадки опису нестаціонарних процесів у газопроводах.

Диференціальні рівняння, які описують зміни тиску у газопроводі з неперервним та зосередженими відборами газу наведені і детально описані в [1, 2, 3, 4]. Ці рівняння дозволяють описати неусталений рух газу в міських розподільчих мережах, які мають по довжині підкачування чи відбори (аварійні витоків) газу.

Для розв'язання цих рівнянь необхідно задавати початкові та граничні умови, які відповідають певним технологічним режимам експлуатації та обладнанню газопроводів.

Як початкові умови задаються закономірності розподілу витрат газу чи тиску по довжині газопроводу в момент часу, який приймається за початок процесу.

У міських газопроводах після газорегуляторних пунктів чи газорозподільних станцій тиск підтримується сталим. Відбір газу в кінці газопроводу відомий. Він визначається числом та характером споживачів. Для таких газопроводів граничні умови будуть: при сталій витраті газу в кінці газопроводу  $P(t,0) = P_1 = const$ ,  $M(t,l) = M_2 = const$ ; при сталому відборі в кінці газопроводу  $P(t,0) = P_1 = const$ ,  $M(t,l) = M_2(t)$ .

Неусталений рух газу у газопроводах, як правило, викликається нерівномірним у часі відбором газу споживачами, характером відбору газу, нерівномірною подачею газу в газопровід із газових промислів тощо. У процесі роботи газопроводу появи аварійних витоків здійснює додатковий вплив на неусталені процеси. Відбувається накладання різних чинників на неусталений процес.

Для швидкого вияву аварій в газопроводах необхідно вміти виділити характер впливу аварійних витоків у газопроводі із значної кількості чинників, які є причиною неусталеного процесу. У зв'язку із цим виникають задачі дослі-

дження неусталеного процесу в газопроводах, викликаного технологічними чинниками (зміни відборів газу споживачами) та при появі аварійних витоків газу.

Вплив шляхових відборів газу та аварійних витоків може бути враховано в самому диференційному рівнянні. Тоді неусталений процес складного газопроводу можна описувати одним рівнянням з відповідними початковими та граничними умовами. Якщо число зосереджених відборів достатньо велике, то у ряді випадків їх можна замінити неперервно розподіленим відбором газу по довжині, що додатково спрощує завдання досліджень.

Математичне моделювання будемо проводити для варіанту: газопровід з неперервним по довжині відбором (підкачуванням) газу [3].

Для опису нестационарного процесу в трубопроводі з неперервним по довжині поступленням чи відбиранням газу використаємо систему рівнянь руху та балансу (нерозривності)

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial x} + \rho\alpha \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2} \right) + \rho g \frac{\partial z}{\partial x} + \\ + \frac{\lambda\omega}{2D} \omega\rho + \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} = 0; \\ \frac{\partial(\rho\omega)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} \pm \frac{m(x,t)}{F} = 0. \end{cases} \quad (5)$$

Знак “плюс” перед  $m(x,t)$  відповідає випадку підкачування, а “мінус” – випадку відбору газу по довжині трубопроводу. Якщо  $m(x,t)=0$ , то система перетворюється в систему рівнянь, що описують нестационарні процеси в простих трубопроводах.

Зміна масової витрати в газопроводах з шляховими відборами чи підкачуваннями газу описується рівнянням

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 M}{\partial x^2} \pm \chi \frac{\partial m(x,t)}{\partial x}, \quad (6)$$

$$\text{де } \chi = \frac{c^2}{2a_1} = \frac{2Dc^2}{\lambda\omega}.$$

Верхній знак перед третім членом рівняння характеризує вплив підкачування, нижній – відбір.

Проаналізувавши рівняння можна зробити висновок, що під час нестационарних процесів у газопроводах шляховий відбір чи підкачування впливає на зміни масової витрати тільки в тому випадку, коли відбір (підкачування) газу є змінними по довжині. Якщо відбір міняється в часі, але не залежить від відстані до точки, що розглядається, то зміни масової витрати в газопроводі не залежать від відбору газу. У такому випадку зміни масової витрати при нестационарних процесах відбуваються як в простих трубопроводах.

Якщо відбір чи підкачування не залежать від відстані, то рівняння зведеться до звичайного рівняння теплопровідності для простого трубопроводу

$$\frac{\partial M}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 M}{\partial x^2}. \quad (7)$$

З рівняння руху можна отримати диференційне рівняння для опису зміни тиску в газопроводі при нестационарних режимах руху газу

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \chi g \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \frac{\partial z}{\partial x} + \rho \frac{\partial^2 z}{\partial x^2} \right) \pm \frac{c^2}{F} m(x,t). \quad (8)$$

У випадку лінійного профілю та горизонтального трубопроводу отримаємо наступне рівняння

$$\frac{\partial P}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 P}{\partial x^2} \pm \frac{c^2}{F} m(x,t). \quad (9)$$

Із отриманого рівняння видно, що під час нестационарних процесів у газопроводах на зміни тиску у часі та його розподіл по довжині впливають відбори та підкачування газу незалежно від того, постійні чи змінні вони по довжині і в часі.

Проаналізувавши можливі у газовій мережі аварійні ситуації та існуючі алгоритми розрахунків нестационарних процесів систем газопостачання населених пунктів можна зробити висновок про необхідність розроблення математичної моделі поведінки газової мережі під час нестационарних процесів, що виникають унаслідок аварійних режимів, а також у випадку відключення споживачів у разі несплати або виникнення аварій.

Під час експлуатації системи умови газоспоживання не є постійними і рідко відповідають проектним. Змінюються тиски на виході джерела живлення та в кінці відводів. Є випадки, коли частина споживачів з тих чи інших причин відключається від системи газопостачання. Все це впливає на гідравлічний режим роботи складної трубопровідної системи. Тому теоретичне та практичне значення має задача визначення найбільшого впливу на кінцеві тиски відключення шляхових споживачів.

Гідравлічний розрахунок газових мереж як при проектуванні, так і при їх експлуатації ускладнений наявністю великої кількості газопроводів, складною конфігурацією системи та змінною параметрів роботи у часі. Через складність і трудомісткість гідравлічні розрахунки газових мереж доцільно виконувати з використанням обчислювальної техніки, що вимагає розробки алгоритмів і відповідного програмного забезпечення.

Для розробки математичної поведінки газової мережі застосовувався метод агрегативного підходу.

Для проведення математичних досліджень розроблено агрегативну модель, яка зображена на рисунку 1.

Динаміка зміни тиску в кінці ділянок та витрат при відключенні споживачів відповідних ділянок зображено на рисунках 2 – 10.

Проаналізувавши отримані графічні залежності, можна зробити висновок, що час стабілізації процесу під час аварійного відключення споживачів залежить від координати відбору,

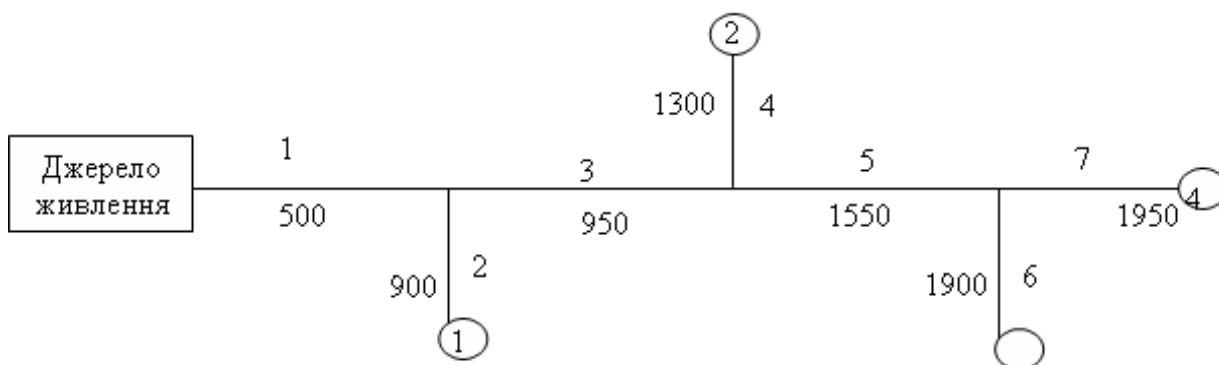


Рисунок 1 – Агрегативна модель досліджуваної системи газопостачання

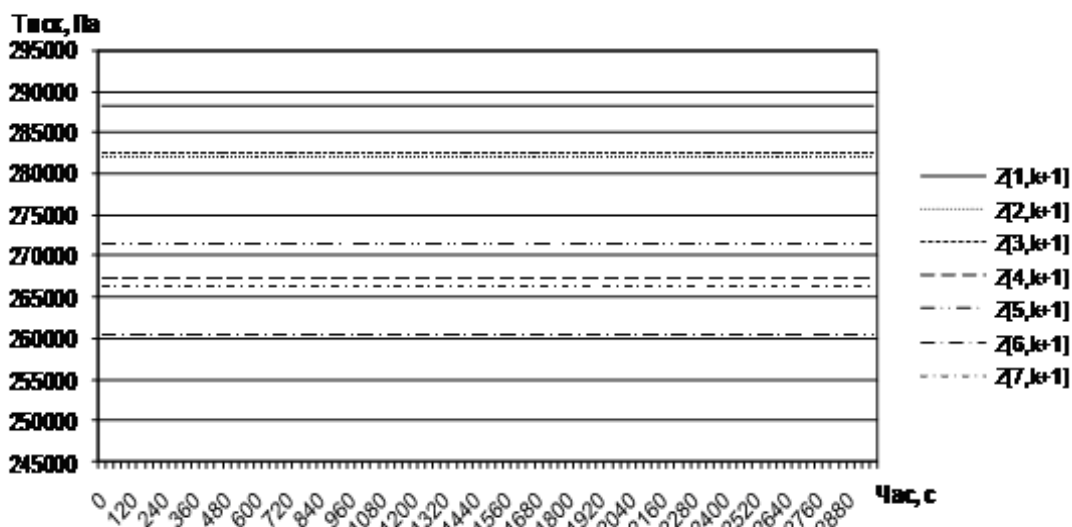


Рисунок 2 – Динаміка зміни тиску при стаціонарному процесі

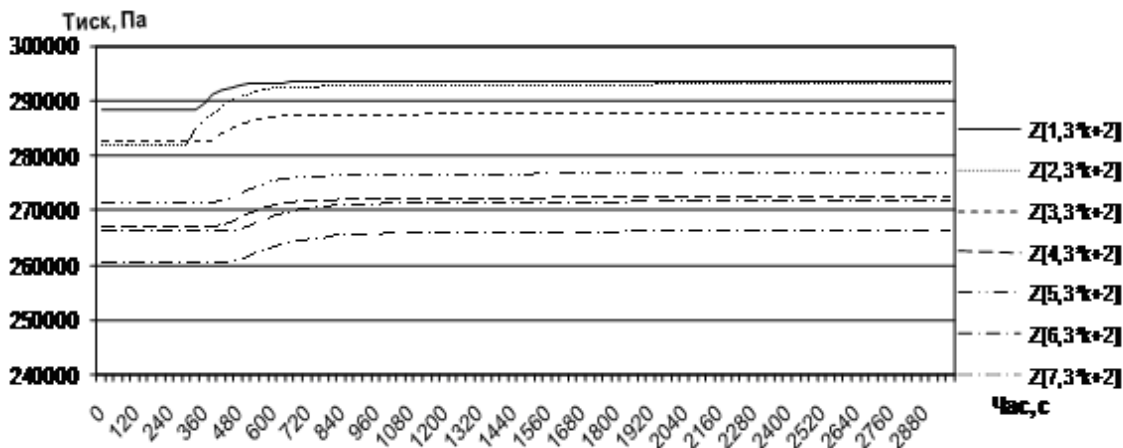


Рисунок 3 – Динаміка зміни тиску при відключенні споживачів ділянки 2

що відключився, а також від величини відключеного відбору. Чим більша величина відбору, тим більше часу необхідно для стабілізації процесу. Аналогічна картина спостерігається, коли відбір здійснюється на більшій відстані від джерела живлення. Так, при відключенні ділянки 2 на ділянці 1 час стабілізації дорівнює 510 с, при відключенні ділянки 4 – 570 с, ділянки 6 – 600 с, ділянки 7 – 690 с.

Динаміку стабілізації роботи мережі при запуску споживачів, наприклад при аварійній зупинці всієї системи та проведенні відновлювальних робіт або введенні в експлуатацію, зображено на рисунках 11 -14. Аналіз проводився для порівняння із значеннями відбору 0,1 та 0,5 кг/с відповідно.

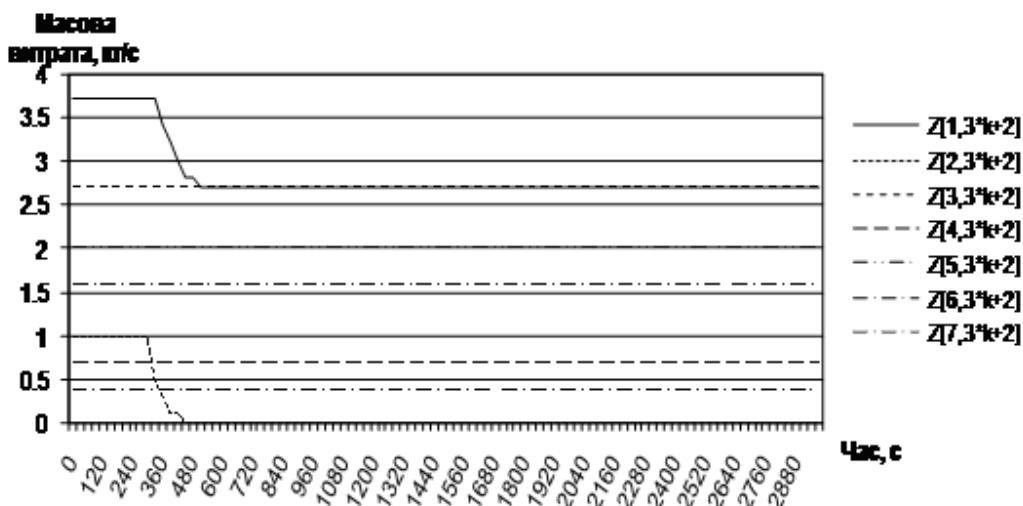


Рисунок 4 – Динаміка зміни витрати при відключенні споживачів ділянки 2

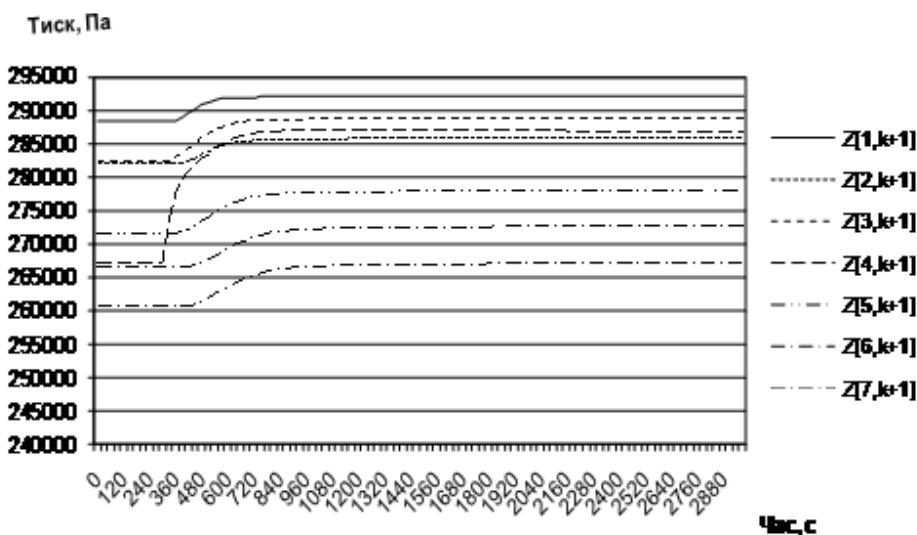


Рисунок 5 – Динаміка зміни тиску при відключенні споживачів ділянки 4

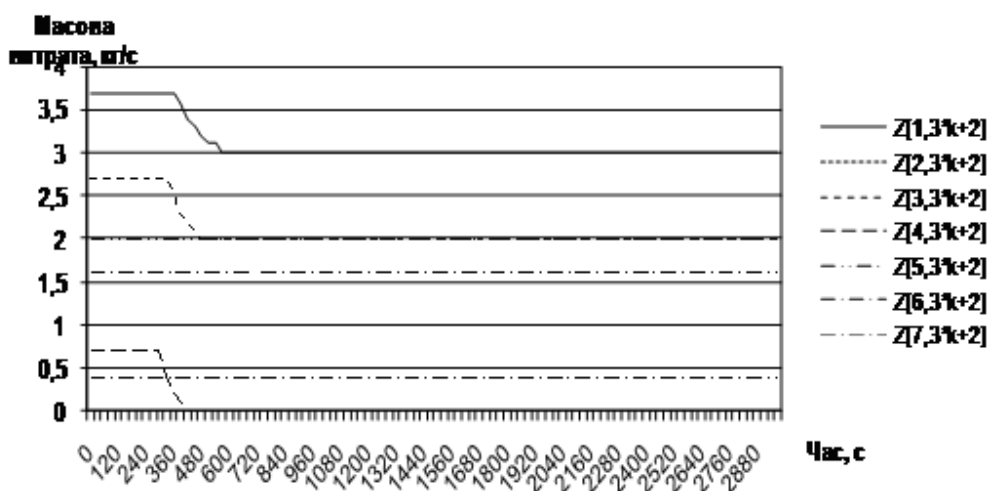


Рисунок 6 – Динаміка зміни витрати при відключенні споживачів ділянки 4

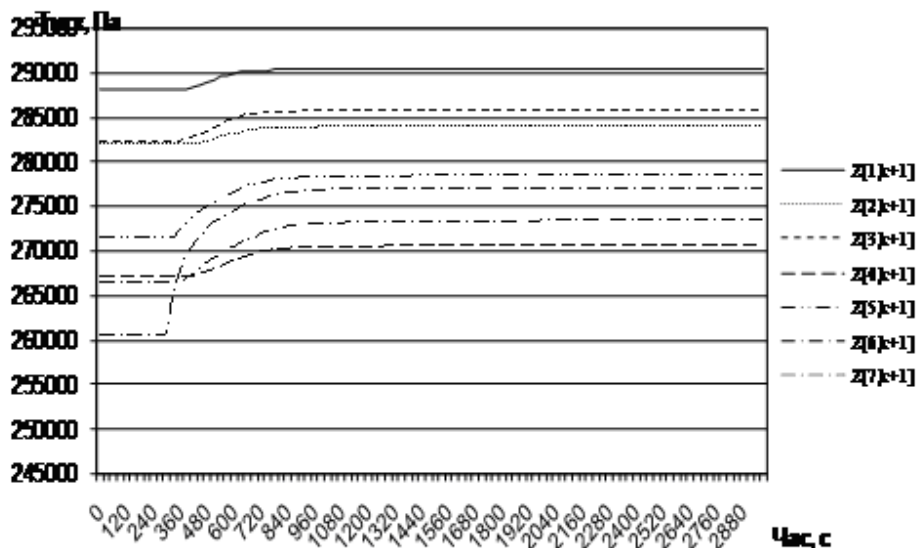


Рисунок 7 – Динаміка зміни тиску при відключенні споживачів ділянки 6

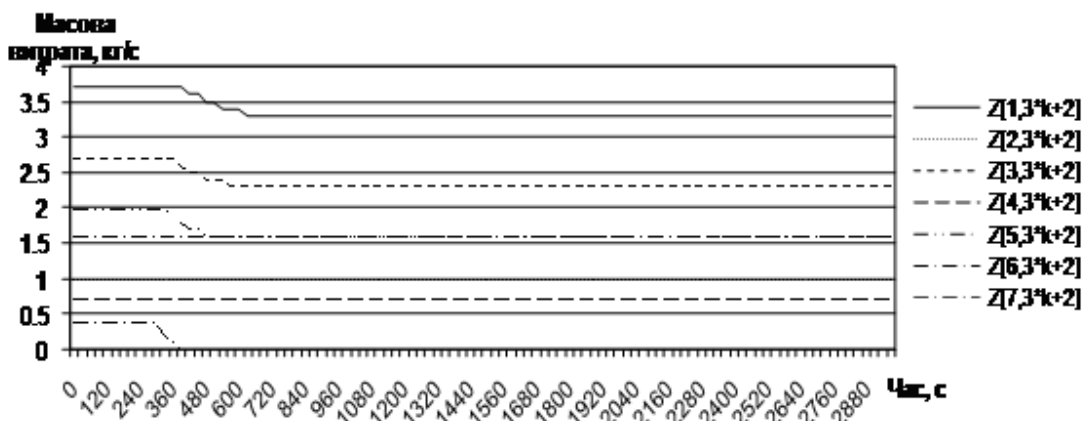


Рисунок 8 – Динаміка зміни витрати при відключенні споживачів ділянки 6

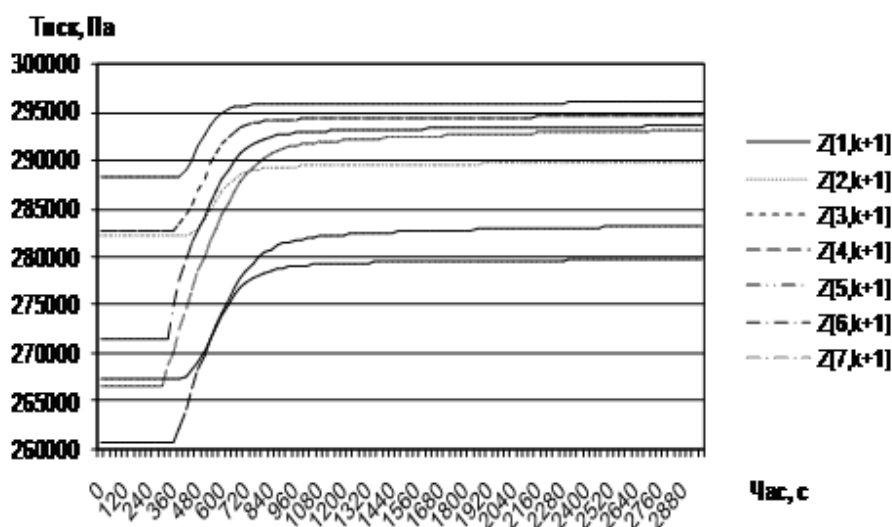


Рисунок 9 – Динаміка зміни тиску при відключенні споживачів ділянки 7

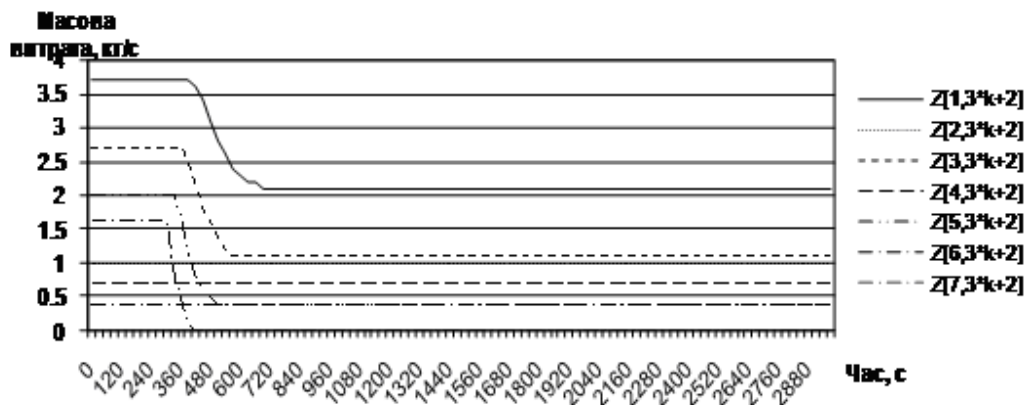


Рисунок 10 - Динаміка зміни витрати при відключенні споживачів ділянки 7

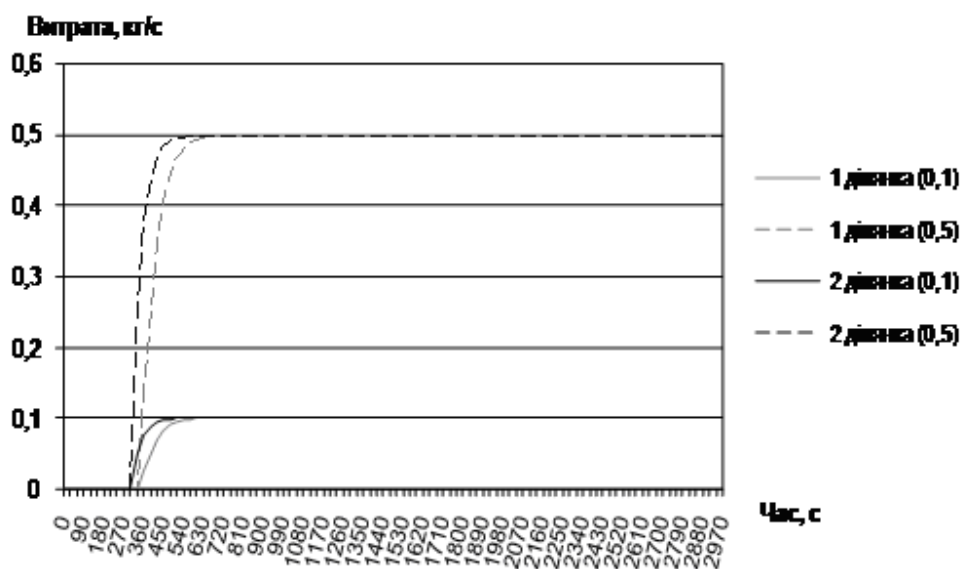


Рисунок 11 - Динаміка стабілізації роботи мережі при запуску споживача 1

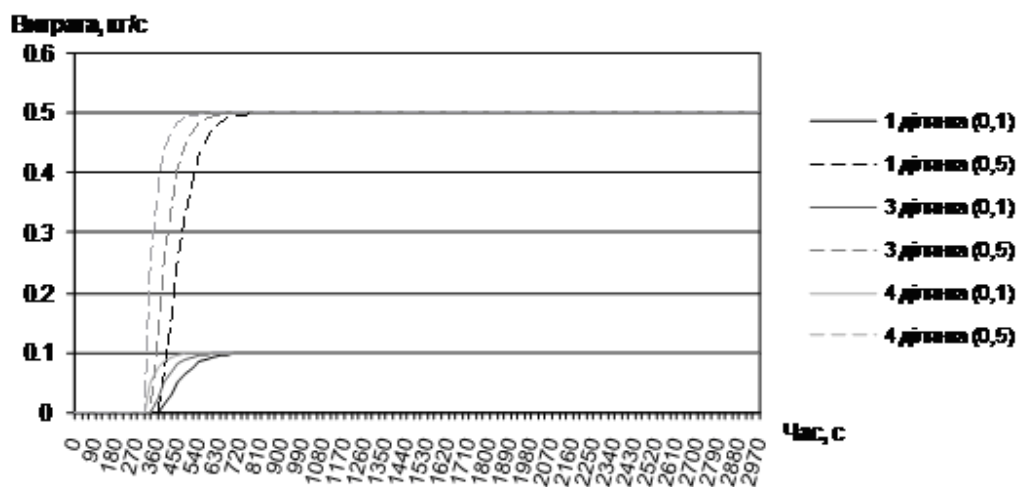


Рисунок 12 – Динаміка стабілізації роботи мережі при запуску споживача 2

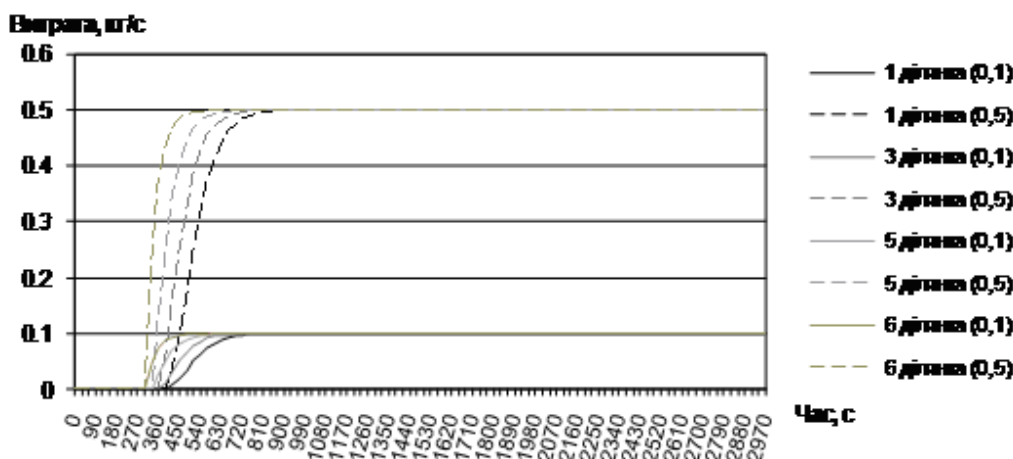


Рисунок 13 – Динаміка стабілізації роботи мережі при запуску споживача 3

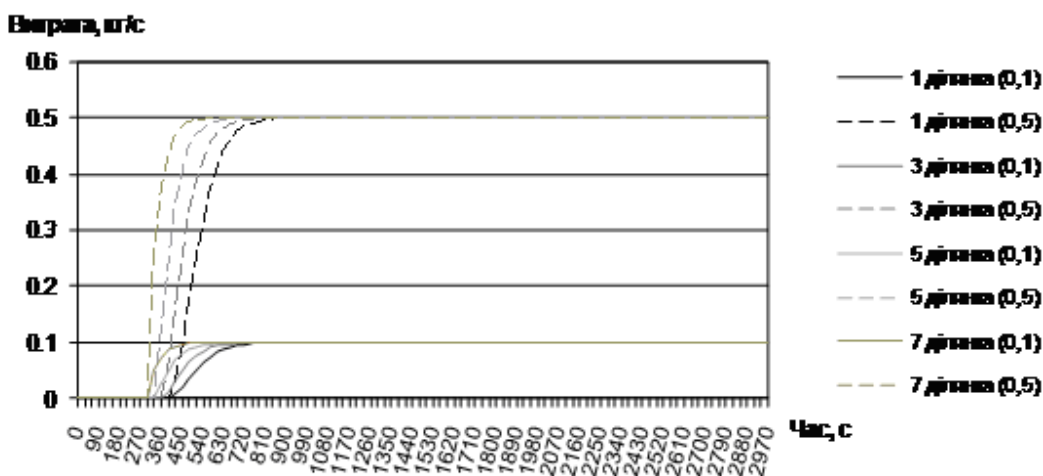


Рисунок 14 – Динаміка стабілізації роботи мережі при запуску споживача 4

Таблиця 1 – Стабілізаційний час для різних варіантів підключення споживачів

Номер споживача	Ділянка	Час, с	
		Витрата 0,1 кг/с	Витрата 0,5 кг/с
Споживач 1	1	390	780
	2	330	420
Споживач 2	1	510	960
	3	420	870
	4	330	540
Споживач 3	1	570	1650
	3	510	1470
	5	420	1380
	6	330	840
Споживач 4	1	570	960
	3	510	900
	5	420	810
	7	330	690

Проаналізувавши отримані залежності можна зробити висновок, що стабілізаційний час тим більший, чим більше відбір газу споживачами мережі. Стабілізаційний час для різних варіантів підключення споживачів наведено у таблиці 1.

Час початку стабілізації не залежить від витрати, а залежить тільки від координати відбору. Так при введенні в експлуатацію споживача 1 час початку стабілізаційного процесу становить 360 с, споживача 2 – 390 с, споживачів 3-4 – 420с.



Крім збільшення часу стабілізації можна побачити зміщення початку стабілізаційного процесу, якщо координата відбору віддалена від джерела живлення.

Проаналізувавши отримані результати, можна зробити висновок, що найбільший вплив на зміну тиску має відключення споживачів останньої ділянки. В цьому випадку відбувається ефект гідравлічного удару, і тиск в мережі значно підвищується, що може призвести до аварійно-небезпечних ситуацій, тому при відключенні усіх ділянок, а останньої ділянки, насамперед, необхідно проводити закриття засувів плавно, без різких перекривань потоків. Аналогічно після ремонтних робіт загальний час стабілізації роботи мережі буде меншим у разі першочергового підключення найвіддаленіших споживачів.

Отримані результати вказують на те, що стабілізаційний час тим більший, чим більшим є відбір газу споживачами мережі.

Отримані результати та висновки свідчать про необхідність проведення досліджень впливу зміни конфігурації мережі в часі на умови експлуатації системи газопостачання та шляхи скорочення прямих і непрямих збитків споживачів внаслідок недоподачі газу або зниження тиску в газовій мережі за рахунок удосконалення топології газової мережі.

### **Література**

1 Растринин Л.А. Системы экстремального управления [Текст] / Л.А. Растринин. – М.: Наука, 1974. – 632 с.

2 Рустамов Е.Э. Гидравлический расчет магистральных газопроводов при нестационарном газопотреблении [Текст] / Е. Э. Рустамов // Изв. вузов. Нефть и газ. – 1974. – №3. – С. 49-51.

3 Щербаков С.Г. Проблемы трубопроводного транспорта нефти и газа [Текст] / С.Г. Щербаков. – М.: Наука, 1982. – 206 с.

4 Яковлев Е.И. Анализ неустановившихся процессов в нитках магистрального газопровода статистическими методами [Текст] / Е.И. Яковлев // Изв. вузов. Нефть и газ Баку. – 1968. – №2. – С. 72-76.

5 Режимы газотранспортных систем / [Е.И. Яковлев, О.С. Козак, В.Б. Михалків]. – Львів: Світ, 1993. – 170 с.

*Стаття постуила в редакційну колегію  
29.06.10*

*Рекомендована до друку професором  
В. Я. Грудзом*