

---

---

# Фізико-технічні проблеми транспорту та зберігання енергоносіїв

---

---

УДК 622.691

## ПРОГНОЗУВАННЯ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОЦЕСІВ В ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМАХ ЗА УМОВИ ЇХ НЕПОВНОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ

В.Я. Грудз, В.Я. Грудз (мол.)

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел. (0342) 727138,  
e-mail: snp@nimg.edu.ua

*Розглядається задача раціонального керування режимами газотранспортної системи в умовах її неповного завантаження, що створює передумови для часткої зміни продуктивності в широкому діапазоні. При неповному завантаженні системи з метою економії енергії в трубопроводі бажано утримувати максимально високі тиски. В таких умовах стрибкоподібна зміна витрати газу викличе нестационарний процес, в якому амплітуда коливань тиску може перевищувати допустимі навантаження труб і призвести до порушення безпеки експлуатації системи.*

*Створено математичну модель і проведено серії розрахунків, результати яких дали змогу встановити закономірності протікання нестационарного процесу, викликаного стрибкоподібною зміною витрати газу. Використання створеної моделі дасть можливість керувати системою транспортування газу в безпечному діапазоні зміни тисків.*

**Ключові слова:** газотранспортна система, неповне завантаження, нестационарний процес, коливання тиску, амплітуда, частота.

*Рассматривается задача рационального управления режимами газотранспортной системы в условиях ее неполной загрузки, что создает предпосылки для частой смены производительности в широком диапазоне. При неполной загрузке системы с целью экономии энергии в трубопроводе желательно удерживать максимально высокие давления. В таких условиях скачкообразное изменение расхода газа вызовет нестационарный процесс, в котором амплитуда колебаний давления может превышать допустимые нагрузки труб и привести к нарушению безопасности эксплуатации системы.*

*Создана математическая модель и проведены серии расчетов, результаты которых позволили установить закономерности протекания нестационарного процесса, вызванного скачкообразным изменением расхода газа. Использование созданной модели позволит управлять системой транспорта газа в безопасном диапазоне изменения давления.*

**Ключевые слова:** газотранспортная система, неполная загрузка, нестационарный процесс, колебания давления, амплитуда, частота.

*The article deals with the rational control of the modes of the gas pipeline system under the conditions of its partial load, which causes frequent changes in the productivity of a wide range. If the system is partially loaded aiming at energy saving in the pipeline it is desirable to keep the highest possible pressure. In such conditions, a sudden change in gas flow rate will cause a non-steady process in which the amplitude of the pressure oscillation can exceed the permissible load of the pipes and lead to the security violation of the system operation. A mathematical model is developed and a series of calculations is conducted, which allowed to determine the characteristics of the non-steady process flow caused by a sudden change in gas flow rate, the use of which will make it possible to control the gas pipeline system in a safe range of pressure variations.*

**Key words:** gas pipeline system, partial load, non-steady process, pressure variation, amplitude, frequency.

**Вступ.** Газотранспортна система України є однією з найпотужніших у світі за обсягом транспортування та збору газу. Ця система є буфером між газовидобувними регіонами Росії, Центральної Азії, а також Сходу і Півдня України та споживачами нашої держави і промислово розвиненої Європи. Тобто ГТС інтегрована в загальноєвропейську газову мережу. Її пропускна спроможність на вході складає 290 млрд м<sup>3</sup>, на виході – 180 млрд м<sup>3</sup> газу на рік (до країн Європи – 142 млрд м<sup>3</sup>).

Через ГТС у 2014 році було транспортовано 202 млрд м<sup>3</sup> природного газу; у тому числі 68 млрд м<sup>3</sup> – споживачам України і 120,4 млрд м<sup>3</sup> – до країн Західної Європи. Основними напрямками транзиту газу територією України в 2014 році були Словаччина (82,6 млрд м<sup>3</sup>), Угорщина (11,6 млрд м<sup>3</sup>), Польща (4,6 млрд м<sup>3</sup>) та Балканські країни (21,6 млрд м<sup>3</sup>). У ПГС було закачано 16,1 млрд м<sup>3</sup> газу, відібрано – 17,1 млрд м<sup>3</sup>.

Основа транзитної трансукраїнської системи складає система газопроводів «Союз», «Уренгой-Помари-Ужгород» і «Прогрес» діаметром 1420 мм і загальною протяжністю територією України понад 1500 км. При максимальному завантаженні розрахункова пропускна здатність складає 337 млн м<sup>3</sup> на добу або 123 млрд м<sup>3</sup> на рік. Фактично максимальний обсяг транспортування газу до країн ЄС в 2005 році склав 121,5 млрд м<sup>3</sup> на рік [1].

На даний час газотранспортна система перебуває в працездатному технічному стані; гідравлічна ефективність лінійних ділянок газопроводів лежить в межах 95 – 98%, газоперекачувальні агрегати і обладнання компресорних станцій в справному стані, в зв'язку з чим може бути досягнена проектна пропускна здатність при екстремальному використанні всіх потужностей системи. В такому випадку забезпечуються параметри максимального технологічного режиму і використовується наявна потужність обладнання системи. Однак, в зв'язку з обмеженням газопостачання продуктивність систему знизилась до 100 – 120 млн м<sup>3</sup> на добу, що складе 36 – 55 млрд м<sup>3</sup> на рік. В таких умовах з'являється множина допустимих режимів експлуатації системи, і залежно від вибору найбільш раціонального з них можна мінімізувати енерговитрати на транспортування газу, тобто зекономити певний обсяг енергоносіїв.

Розрахунки відносна витрата паливного газу на компресорних станціях (відносно об'єму перекачування) складає 6,2 % для номінального технологічного режиму. За даними ПАТ «Укртрансгаз» при максимальних обсягах перекачування ця величина складала 6,6%, а при теперішніх режимах – 3%. Зниження показника пояснюється зменшенням кількості газоперекачувальних агрегатів на КС. Однак витрата паливного газу 3 – 3,5 млн м<sup>3</sup> на добу є значною і складає 1 – 1,3 млрд м<sup>3</sup> на рік.

Велика витрата паливного газу пов'язана, насамперед, з відносно низьким коефіцієнтом корисної дії газоперекачувальних агрегатів як теплових двигунів. Тому один з шляхів змен-

шення витрати паливного газу полягає у виключенні з режиму роботи окремих ГПА на КС і зупинці компресорних станцій. В залежності від кількості зупинених КС і їх порядкового номера в системі пропускна здатність буде різною.

Актуальним аспектом економії енергоносіїв при транспортуванні газу є зменшення гідравлічних втрат енергії в газовому потоці. Як відомо, збільшення лінійної швидкості газового потоку призводить до зростання втрат енергії на транспортування газу. При сталій масовій витраті газу (стаціонарний режим роботи газопроводу) лінійна швидкість газу тим більша, чим менший тиск в газопроводі. Тому, з точки зору мінімізації енерговитрат, при транспортуванні газу необхідно витримати такий режим з множини допустимих, при якому тиски газу в кожній точці газопроводу найбільші. Такий режим виконується при максимальному тиску на виході КС (в даному випадку 7,6 МПа). Розрахунки показують, що при пониженні тиску на виході КС на 0,1 МПа гідравлічні втрати енергії на відстані 100 км зростають на 2%. Отже, робота ГТС при високих тисках призведе до економії енергії як мінімум на 2%, що при включеній потужності порядку 800 МВт складе 16 МВт.

Підтримання високого тиску в газопроводах ГТС вимагає збільшення кількості технологічного газу в трубопроводах, тобто такого газу, який постійно знаходиться в порожнині газопроводів для забезпечення тиску, необхідного для нормальної роботи ГПА і який досі не має юридичного статусу. При об'ємі порожнини газопроводів системи 6,75 млн м<sup>3</sup> об'єм технологічного газу складає понад 430 млн м<sup>3</sup>. Зниження початкового тиску на 0,1 МПа рівноцінне відбору газу з порожнини газопроводів системи в об'ємі 4,2 млн м<sup>3</sup>. Таким чином, акумулююча здатність газопроводу при його експлуатації з високими тисками може служити джерелом газопостачання населення в пікові моменти газовідбору.

**Постановка задачі.** При неповному завантаженні складної газотранспортної системи можливі варіації тисків газу в газопроводах при заданій постійній продуктивності. Діапазон можливих змін тиску обмежується зверху лінійною депресією при максимальному початковому тиску і знизу – лінійною депресією при мінімальному кінцевому тиску. Порушення вказаного діапазону може призвести до руйнування трубопроводу за рахунок перевищення допустимого тиску або до відмови нормальної експлуатації відцентрових нагнітачів на КС внаслідок пониження тиску нижче від мінімально допустимого. Процес формування депресії тиску в кожний поточний момент при зміні величини продуктивності є нестационарним і характеризується коливанням тисків з певною частотою і амплітудою. Суперпозиція тисків при верхній граничній лінії депресії може призвести до перевищення початкового тиску, а при нижній гра-

ничній лінії депресії – до пониження тиску нижче за допустимий.

**Дослідження.** Створено математичну модель коливання тиску в газотранспортній системі, викликаного зміною величини продуктивності за умови неповного завантаження, реалізація якої для умов реальних газопроводів дозволила встановити амплітудні і частотні характеристики нестационарного процесу. Встановлено, що в низькочастотній області коливань тиску амплітуда може перевищувати значення в 1 МПа, що призведе до виходу абсолютного значення тиску за межі допустимого інтервалу. Крім того, слід зважати на факт, що швидкості розповсюдження збурень в газопроводі при високих і низьких тисках будуть суттєво різними, що вплине на частотні характеристики нестационарного процесу

Виходячи зі сказаного, слід зробити висновок, що, незважаючи на характеристики економічної ефективності транспортування газу при високих тисках, бажано залишити певний запас можливого амплітудного коливання тисків з метою запобігання виходу абсолютного значення тиску за межі граничних ліній депресії. Визначенню допустимих границь коливання тисків в газотранспортній системі за умови її неповного завантаження на математичних моделях присвячено дане дослідження.

Математичну модель нестационарного ізометричного одномірного руху газу в трубопроводі можна подати у вигляді таких рівнянь:

$$\frac{\partial p}{\partial x} + \rho \alpha \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\omega^2}{2\rho^2} \right) + \beta \rho g \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda \omega^2}{2\rho D} + \gamma \frac{\partial \omega}{\partial t} = 0; \quad (1)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0,$$

де  $p = p(x, t)$  – тиск як функція лінійної координати  $x$  та часу  $t$ ;

$\omega$  - лінійна швидкість газу;

$\lambda$  - коефіцієнт гідравлічного опору;

$\rho$  - густина газу;

$D$  - діаметр;

$h$  - геодезична позначка профілю;

$c = \sqrt{kzRT}$  — швидкість звуку в газі;

$\alpha$  – коефіцієнт Коріоліса (для ламінарного потоку  $\alpha = 2$ , а для турбулентного –  $\alpha = 1,1$ ).

У першому рівнянні враховано сили тертя, різниці перепаду висот трубопроводу й інерційний опір. Друге рівняння характеризує кількісний баланс газу. При цьому зміна температури від довжини трубопроводу враховується на основі побудови ітераційного алгоритму. В системі (1) коефіцієнти  $\beta$  і  $\gamma$  введено з метою вивчення впливу відповідних складових сил.

Нехтуючи впливом гравітаційних і коріолісових сил, зведемо систему (1) до рівняння

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} = \frac{2a}{c^2} \frac{\partial P}{\partial t} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2}, \quad (2)$$

де  $2a$  – коефіцієнт лінеаризації

$$2a = \frac{\lambda \omega}{2D}.$$

Дане рівняння відображає коливальний процес функції тиску в просторі та часі і в математичній фізиці відоме під назвою телеграфного рівняння.

Зауважимо, що коливання тиску в потоці газу можуть мати різну частоту і амплітуду в залежності від причини, що їх викликала. У відповідності до сказаного коливання тиску умовно поділяють на високочастотні, середньочастотні та низькочастотні. Високочастотні характеризуються частотою в діапазоні 0,4 – 4,0 Гц і, як правило, є наслідком стрибкоподібної зміни параметру (тиску, витрати) в певному перерізі газопроводу. Амплітуда таких коливань може сягати величини 1 МПа. Коливання розповсюджуються вздовж газопроводу зі швидкістю звуку; при цьому амплітуда і частота знижуються. Середньочастотний діапазон складає 0,5 – 10 Гц; такі коливання викликають плавні зміни параметрів потоку в часі. Вони розповсюджуються вздовж трубопроводу з суттєво меншим дискриментом затухання. Низькочастотні коливання викликані добовою нерівномірністю газоспоживання і лежать в частотному діапазоні  $10^{-5}$  – 0,5 Гц. Амплітуда коливання тиску залежить від характеру фактора збурення і може бути необмеженою (наприклад, для умов наповнення ділянки газопроводу газом). В умовах високочастотних коливань вирішальну роль у формуванні процесу відіграють інерційні сили і сили гідравлічного опору в потоці газу. Для коливань середньої і низької частоти основним джерелом є сили гідравлічного опору трубопроводу. З точки зору забезпечення надійної експлуатації газотранспортної системи, вирішальна роль відводиться високочастотним коливанням тиску, оскільки такий процес найнепередбачуваніший.

Оскільки частота і амплітуда коливань тиску, викликаних збуреннями параметрів газового потоку, є характеристиками нестационарного процесу, то повинен існувати зв'язок між амплітудно-частотними характеристиками та критерієм нестационарності [2, 3].

Таким чином, існує оптимізаційна задача, яка полягає у визначенні раціональних значень тисків стаціонарного процесу в газопроводі, при яких, з одного боку, досягається мінімум енерговитрат на транспорт, а, з іншого, забезпечується безпека експлуатації трубопровідних систем. Як вже зазначалося, максимально можливі тиски в газопроводах дозволять звести до мінімуму гідравлічні втрати при транспортуванні газу, тобто домогтися мінімальних витрат енергоносіїв. Однак, коливання тисків в нестационарних процесах, викликаних стрибкоподібною зміною параметрів (найчастіше витрати газу за умов неповного завантаження), можуть вийти за межі допустимих величин навантажень, з точки зору забезпечення міцності. Тому необхідно вибрати такі максимально можливі тиски стаціонарного процесу в газопроводах, при яких результат суперпозиції з амплітудним

значенням тиску в нестационарному процесі не виводив би значення навантаження стінок труби за межі допустимого.

Така постановка задачі вимагає розв'язання рівняння (2) за початкових і граничних умовах, вибраних із таких міркувань. До початку нестационарного процесу, викликаного збуренням витрати газу, газопровід працював у стаціонарному технологічному режимі з розподілом тисків по довжині за параболічним законом

$$P(x,0) = \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2)x/L}, \quad (3)$$

де  $P(x,0)$  - тиск на відстані  $x$  від початку газопроводу довжиною  $L$ ;

$P_H, P_K$  - тиски на початку і в кінці газопроводу відповідно.

При заданих тисках  $P_H, P_K$  забезпечується певна масова продуктивність газопроводу  $Q_0$ , яку в умовах неповного завантаження можна змінити в будь-який момент часу в сторону збільшення або зменшення на деяку величину  $\Delta Q$ . Нехай, починаючи з моменту часу  $t > 0$ , подача газу в газопровід не змінилася, а відбір в кінці траси змінився на величину  $\Delta Q$ . Тоді граничні умови для реалізації рівняння (2) матимуть вигляд:

$$Q(0,t) = Q_0; \quad Q(L,t) = Q_1, \quad (4)$$

де  $Q_1 = Q_0 + \Delta Q$ .

Використавши перше рівняння системи (1) і знехтувавши всіма видами енерговитрат окрім гідравлічного опору, отримаємо:

$$-\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=0} = \frac{2a}{F^2} Q_0; \quad (5)$$

$$-\frac{\partial P}{\partial x} \Big|_{x=L} = \frac{2a}{F^2} Q_1;$$

$F = \frac{\pi D^2}{4}$  - площа поперечного перерізу трубопроводу.

Розв'язок (2) при початкових (3) і граничних (5) умовах шукається методом Фур'є:

$$P(x,t) = \frac{\lambda \rho w}{2dF^2} x \left( Q_0 - \frac{Q_0 - Q_L}{2L} x \right) + \frac{2}{L} \sum_{n=1}^{\infty} \left\{ \int_0^L \sqrt{P_H^2 - (P_H^2 - P_K^2)x/L} \cos \frac{\pi n x}{L} dx - \frac{\lambda w}{\pi n F} \left[ Q_0 (1 - (-1)^n) - \frac{1}{2\pi n} (Q_0 - Q_L) (-1)^n \right] \right\} \exp \left( -\frac{\lambda w}{4d} t \right) \sin \left[ \frac{\lambda w}{4d} t \sqrt{\left( \frac{4\pi m c d}{\lambda w} \right)^2 - 1} \right] \cos \frac{\pi n x}{L}. \quad (6)$$

Отримана математична модель дає змогу оцінити величину амплітуди коливання тисків у газопроводі за його довжиною і в часі при виникненні збурень у вигляді стрибкоподібної зміни продуктивності на початку або в кінці ділянки газопроводу. Очевидно, що, з точки

зору безпечної експлуатації газопроводу, найбільший інтерес викликають коливання тиску в початковому перерізі  $P(0,t)$ , де наявні найбільші значення абсолютних тисків, що в суперпозиції з амплітудними коливаннями може призвести до перевищення допустимого навантаження.

Величина амплітуди коливання тиску залежить від величини стрибкоподібної зміни витрати газу як фактору збурення, координати виникнення збурень, абсолютних значень тиску і температури, фізичних властивостей газу. Для встановлення характеру вказаних залежностей проводилася реалізація моделі (6) при різних значеннях перерахованих величин як параметрів моделі. Результати реалізації математичної моделі засвідчують, що при зміні температури газу і основних його фізичних властивостей в діапазонах, що відповідають реальним режимам роботи газопроводів, їх вплив на величину амплітудних коливань тиску не суттєвий. Тому основними параметрами, що визначають величину амплітуди і частоти коливання тиску в нестационарному процесі, викликаному стрибкоподібною зміною витрати газу, слід вважати робочий тиск, величину витрати і лінійну координату відбору газу.

Зауважимо: якщо фізичні властивості газу визначати газовою сталою  $R$ , а тепловий режим – абсолютною температурою  $T$ , то за результатами реалізації моделі можна стверджувати, що добуток  $RT$  є характерним параметром динаміки нестационарного процесу, від величини якого залежать (хоч і незначною мірою) амплітуда і частота коливань тиску. Іншими словами, при зміні газової сталої і температури газу таким чином, щоб їх добуток залишався незмінним, характер коливання тиску в нестационарному процесі буде ідентичним. З іншого боку, добуток  $RT$  характеризує швидкість розповсюдження малих збурень у газі, тобто швидкість звуку  $c = \sqrt{kRT}$ . Отже, для характеризування нестационарного процесу доцільно вибрати за незалежний параметр швидкість розповсюдження звуку в потоці газу.

Вказані залежності побудовані на основі математичної моделі нестационарного процесу для гіпотетичного газопроводу довжиною 100 км і діаметром 1420 мм і у вигляді графіків наведені на рисунках 1 – 4.

Аналіз результатів дослідження показує, що при стрибкоподібній зміні витрати газу хвиля тиску розповсюджується з швидкістю звуку до початкового перерізу газопроводу, тиск в якому максимальний, і викликає коливальний процес, амплітуда і частота якого поступово зростають і досягають максимуму через 4 – 6 періодів коливань, після чого починається зниження амплітуди і частоти процесу. Загальна тривалість коливального процесу з високими значеннями амплітуди і частоти лежить в межах 50 – 60 с, що вважається короткочасним перевантаженням трубопроводу. В подальшому амплітуда і частота коливань тиску суттєво знижуються, і протягом 1800–2100 с

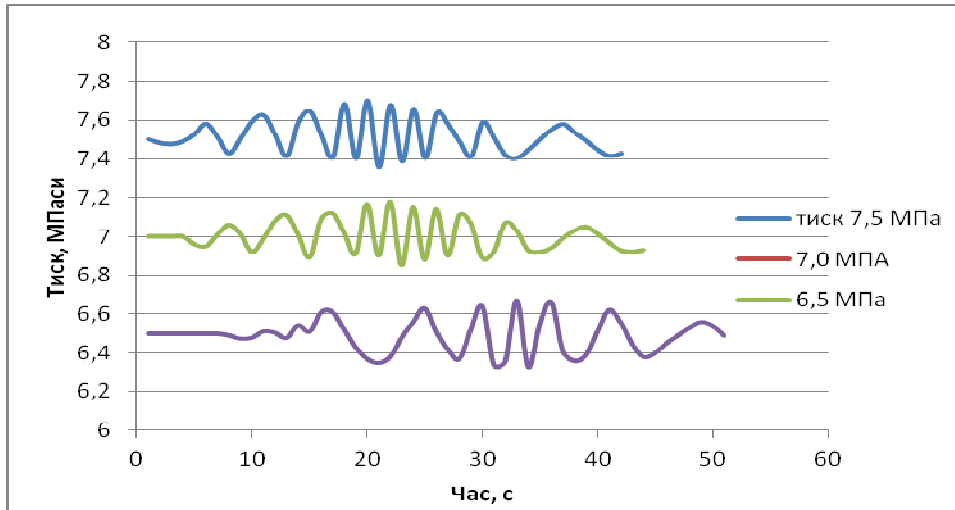


Рисунок 1 – Вплив робочого тиску в газопроводі на характер протікання нестационарного процесу

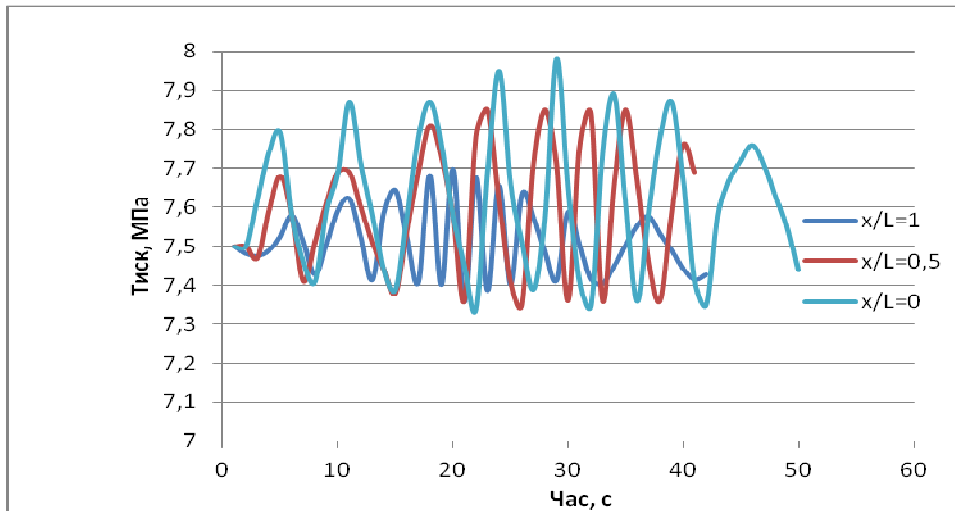


Рисунок 2 – Вплив лінійної координати відбору на характер протікання нестационарного процесу

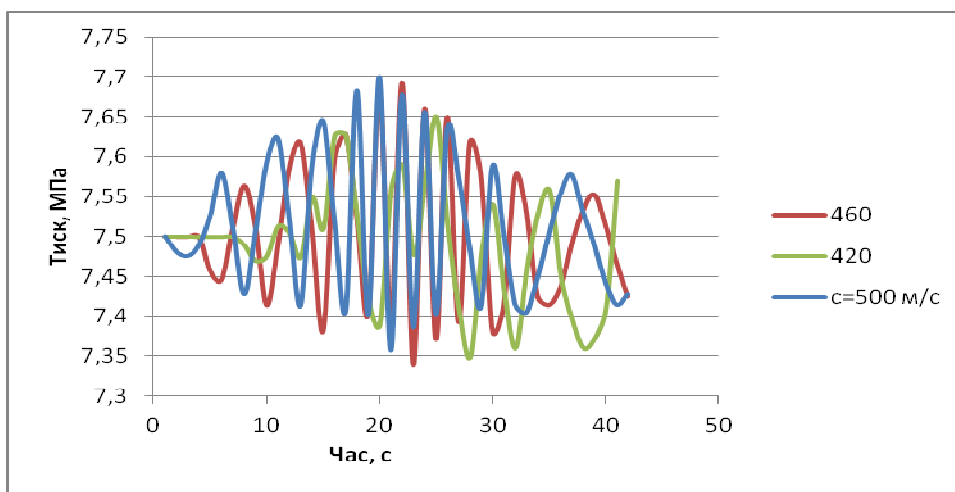


Рисунок 3 – Вплив швидкості звуку в газі на характер протікання нестационарного процесу

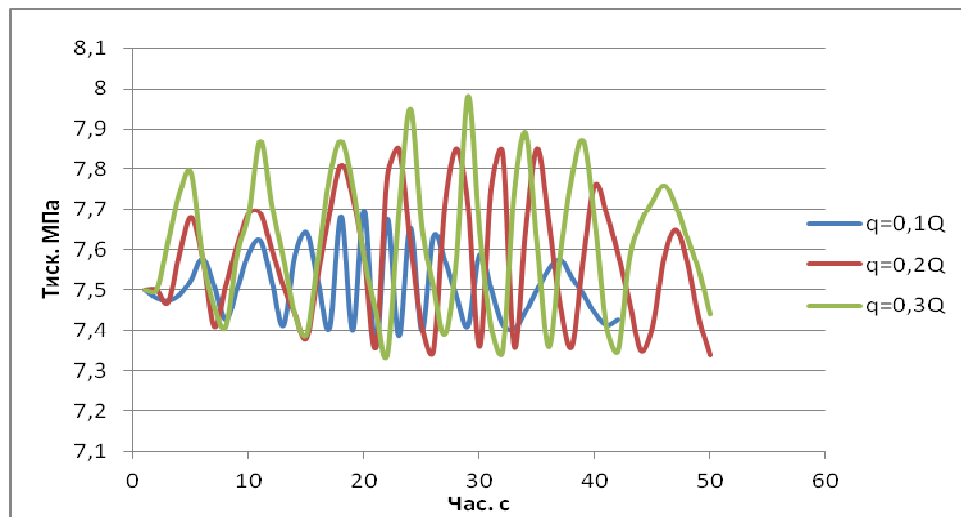


Рисунок 4 – Вплив величини витрати відбору на характер протікання нестационарного процесу

коливальний процес повністю загасає, переводячи роботу газопроводу в новий стаціонарний режим.

Серії виконаних розрахунків за запропонованою математичною моделлю дозволили встановити ряд закономірностей характеру коливального процесу, викликаного стрибкоподібною зміною витрати газу. Зокрема встановлено, що при зменшенні робочого тиску в газопроводі загальна тривалість як височастотного діапазону коливального процесу, так і нестационарного процесу загалом зростає, а частота коливань і їх амплітуда зменшуються. Так, зі зниженням робочого тиску від 7,5 МПа до 7 МПа (на 6,7%) максимальна амплітуда коливань тиску знижується від 0,199 МПа до 0,18 МПа, тобто на 9,5%, а при зниженні робочого тиску до 6,5 МПа (на 13,3%) зниження амплітуди коливання тиску становить 34,7%. Максимальна частота коливального процесу при робочому тиску 7,5 МПа складає 0,44 Гц, а при зниженні тиску до 7 МПа зменшується на 21,8%, а при подальшому зниженні тиску до 6,5 МПа – на 39,4%. З фізичної точки зору така закономірність пояснюється зниженням пружності середовища поширення коливальних хвиль, що призводить до зменшення швидкості розповсюдження збурень і, як наслідок, до зростання тривалості нестационарного процесу і його височастотної смуги.

Лінійна координата зосередженого відбору газу має суттєвий вплив на характер протікання нестационарного процесу, зокрема на величину амплітуди коливання тиску та частоту. З наближенням місця зосередженого відбору до початкового перерізу лінійної ділянки, де стаціонарний тиск максимальний, амплітуда коливання тиску зростає, а частота зменшується. Якщо зосереджений відбір газу знаходиться посередині лінійної ділянки газопроводу, то максимальна амплітуда коливання тиску на її початку на 18,3% менша, ніж у випадку розміщення зосередженого відбору в початковому перерізі газопроводу. Якщо зосереджений від-

бір газу перенести в кінцевий переріз лінійної ділянки, то зменшення амплітуди складе 48,5% за ідентичних умов. Частота коливального процесу змінюється в меншому діапазоні. Так, в першому випадку (зосереджений відбір знаходиться посередині лінійної ділянки) зростання частоти складає 7,2%, а в другому (зосереджений відбір знаходиться в кінці лінійної ділянки) – 11,4%.

Зміна швидкості звуку меншою мірою впливає на характер коливання тиску в нестационарному процесі, викликаному стрибкоподібною зміною витрати газу, причому збільшення швидкості звуку призводить до зростання амплітуди і частоти коливань. Зі збільшенням швидкості звуку від 400 м/с до 440 м/с (на 10%) зростання амплітуди складає 5,7%, а частоти = 3,1%, при зростанні швидкості звуку до 480 м/с (на 20%) зростання амплітуди складає 8,5%, а частоти – 4,9%.

Найбільше впливає на величину амплітуди і частоти коливання тиску на початку лінійної ділянки газопроводу в нестационарному процесі, викликаному стрибкоподібною зміною витрати газу, величина зосередженого відбору газу. Якщо стрибкоподібна витрата зосередженого відбору складає 10% від загальної витрати газу в газопроводі в умовах стаціонарного режиму, то максимальна амплітуда коливання тиску в нестационарному процесі, викликаному раптовою появою витoku, складе 0,154 МПа. Зі зростанням витрати зосередженого відбору до 20% амплітуда коливань тиску збільшується до 0,287 МПа тобто в 2,45 рази. Якщо витрата зосередженого відбору складає 30% від загальної витрати газу в газопроводі в умовах стаціонарного режиму, то амплітуда коливання тиску складе 0,517 МПа, тобто зросте в 3,55 рази, а при стрибкоподібному збільшенні витрати зосередженого відбору до 50% від витрати газу в газопроводі в умовах стаціонарного режиму амплітуда коливання тиску складе 1,14 МПа, що може становити загрозу безпечній експлуа-

тації газопроводу внаслідок короткочасного перевантаження.

Максимальна частота коливання тиску в нестационарному процесі з зростанням витрати зосередженого відбору зменшується. Зі збільшенням витрати зосередженого відбору з 10% від витрати газу в газопроводі до 20% максимальна частота коливання тиску знижується на 5,8%, а при подальшому зростанні витрати зосередженого відбору до 30% від витрати газу в газопроводі зниження максимальної частоти коливання тиску складає 12,3%.

Аналіз результатів моделювання нестационарного процесу в газопроводі, викликаного стрибкоподібною зміною витрати газу в умовах неповного його завантаження, свідчить, що при максимально допустимому стаціонарному тиску на початку лінійної ділянки газопроводу амплітуда коливання тиску може призвести до короткочасного перевантаження стінок труби, тобто до порушення безпечної експлуатації газотранспортної системи. Тому при оперативному керуванні режимами роботи необхідно приймати рішення про забезпечення допустимого тиску на початку лінійної ділянки (на виході компресорної станції) у випадках стрибкоподібної зміни витрати газу. Очевидно, що реалізація математичної моделі у кожному з випадків зміни витрати газу в газопроводі з метою встановлення амплітуди коливання тиску не може бути використана при оперативному керуванні в зв'язку з тривалістю отримання числового результату і його аналізу. Тому з вказаною метою запропоновано емпіричну залежність амплітуди коливання тиску від характеристик газопроводу і перелічених вище параметрів. Така залежність отримана на основі результатів математичного моделювання нестационарного процесу, викликаного стрибкоподібною зміною витрати газу, з застосуванням методики раціонального планування експерименту [4, 5]. Максимальна амплітуда коливання тиску  $\Delta P$  (МПа) розглядалася як функція-відгук за таких незалежних параметрів: величина робочого тиску в газопроводі  $P_{\max}$  (МПа); лінійна відносна координата відбору  $x/L$ ; швидкість звуку в газі  $c$ ; відносна величина витрати відбору  $q/Q$ . Як характеристике лінійної ділянки газопроводу використано об'єм її порожнини  $V(\text{м}^3)$ . Запропонована емпірична залежність побудована за п'яти рівнями зміни незалежних параметрів і має вигляд:

$$\Delta P = 0,525V^{0,11} P_{\max}^{0,55} \left[1 - \left(\frac{x}{L}\right)\right]^{0,33} c^{0,04} \left(\frac{q}{Q}\right)^{2,18}. \quad (7)$$

Запропонована емпірична залежність дозволить оцінити величину короткочасного перевищення тиску в газопроводі при стрибкоподібній зміні витрати газу, що характерно для роботи газотранспортної системи в умовах неповного завантаження і запобігти порушенню нормальної безаварійної її експлуатації.

## Висновки

На основі математичного моделювання нестационарних процесів газотранспортної системи, яка працює в умовах неповного завантаження, встановлено діапазон коливання тиску в початковому перерізі газопроводу і показано можливість короткочасного перевантаження трубопроводу, що може призвести до порушення його безаварійної експлуатації. Числова реалізація математичної моделі дозволила встановити закономірності процесу коливання тиску і вплив технологічних параметрів на амплітуду і частоту коливань. Запропоновано емпіричну залежність максимальної амплітуди коливання тиску від режимних параметрів, яка дозволяє проводити контроль за безпечною експлуатацією газотранспортної системи за умов її неповного завантаження.

## Література

- 1 Грудз В.Я. Оптимізація режимів роботи газонафтогазотранспортних систем України в умовах їх неповного завантаження / В.Я. Грудз, М.Д. Середюк // Тези доповіді в комітеті з енергозбереження Верховної Ради. – 2015.
- 2 Трубопровідний транспорт газу / М.П. Ковалко, В.Я. Грудз, В.Б. Михалків [та ін.]. – К.: АренаЕКО, 2002 – 600 с.
- 3 Грудз Я.В. Энергоэффективность газотранспортных систем / Я.В. Грудз. – Івано-Франківськ: Лілея-НВ, 2012 – 208 с.
- 4 Гухман А.А. Введение в теорию подобия. / А.А. Гухман. – М.: Высшая школа, 1973 – 332 с.
- 5 Математическая теория планирования эксперимента / С.М. Ермаков, В.З. Бродский, А.А. Жиглявский [и др.]. – М.: Наука, 1983 – 392 с.

*Стаття надійшла до редакційної колегії  
14.11.17*

*Рекомендована до друку  
професором Середюк М.Д.  
(ІФНТУНГ, м. Івано-Франківськ)  
д-ром техн. наук Говдяком Р.М.  
(Інжинірингова компанія «Машекспорт»,  
м. Київ)*