

## КРИТЕРІЇ НЕСТАЦІОНАРНОСТІ ЛІНІЙНИХ ГАЗОПРОВІДІВ

О.Т. Михалевич

ОДУ ДК «Укртрансгаз» м. Київ, вул. Кловський узвіз, 9/1. т. (044) 4612013,  
e-mail: utg@ugr.viaduk.net

Проведен сравнительный анализ критериев переходных режимов движения газа в трубопроводах и установлена взаимосвязь между ними. Проведен числовой эксперимент на модельных задачах.

**Постановка проблеми.** В процесі експлуатації магістральних газопроводів під дією різних збурень може виникати неусталений рух, що супроводжується коливаннями тиску та пропускної здатності, які слід враховувати в оперативному диспетчерському управлінні потоками газу. Основними причинами виникнення неусталеного руху є нерівномірне споживання газу, зміна величин транзитних потоків, включення та виключення окремих споживачів тощо. Знання особливостей неусталеного руху й вміння їх розраховувати дозволяє попереджувати аварійні ситуації, обґрунтовувати швидкість реакції систем автоматичного управління й захисту, вибирати найпридатнішу систему автоматичного регулювання та систему захисту від надлишкових тисків чи їх швидких змін. Для цього потрібно мати достатньо прості формули та критерії оцінювання параметрів цих режимів.

Багато дослідників для знаходження простих формул аналізу нестационарних режимів використовували кореляційний аналіз експериментальних даних і на цій основі будували динамічні характеристики магістральних газопроводів. Досить поширеним підходом було еквівалентування процесів транспорту газу з використанням варіаційних методів. Так, для довгих трубопроводів ( $D/L < 5 \cdot 10^{-4}$ ) для часу, більшого декількох пробігів звукової хвилі, і при перепадах тиску  $p_n/p_k < 2$  розв'язок з точністю меншою 3% знаходиться у вигляді

$$p(x, t) = (a + bx + dx^2) \exp\left(-\frac{\alpha}{\beta} t\right),$$

де коефіцієнти можна знайти за даними експлуатації. Це пояснюється сильним затуханням гармонік тиску в газопроводі. Часто для знаходження характеристик нестационарного режиму використовується частотний підхід, який дає змогу отримати розв'язки в простому вигляді.

Важливою характеристикою режимів є критерії нестационарності. Вони дають можливість оцінювати процеси руху газу і встановлювати характер режиму руху (стаціонарний чи нестационарний) та відповідні їм параметри. В літературі введено декілька критеріїв нестационарності на основі різних характерних параметрів. Тому доцільно зробити порівняльний аналіз наявних критеріїв нестационарності та провести апробацію їх на модельних задачах.

In work the comparative analysis of criteria of transient behaviors of motion of gas is conducted in pipelines. Intercommunication is set between them. A numerical experiment is conducted on toy problems.

**Основні співвідношення нестационарного руху газу.** В ізотермічному випадку поширеною математичною моделлю руху газу в трубопроводі є система взаємозв'язаних диференціальних рівнянь в частинних похідних

$$\begin{cases} \frac{\partial p}{\partial x} + 2\rho \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{v^2}{2} \right) + \rho q \frac{\partial h}{\partial x} + \frac{\lambda \rho v^2}{2D} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} = 0, \\ \frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial p}{\partial t} = 0, \end{cases} \quad (1)$$

Для замикання системи рівнянь використаємо рівняння стану газу

$$P = g \rho z R T. \quad (2)$$

Задавши початкові та граничні умови, можна знайти розв'язок відповідної задачі математичної фізики та дослідити вплив гідродинамічних параметрів на процес руху газу. Очевидно, що для малих та великих значень часу характер руху є близьким до стаціонарного. Для розмежування стаціонарного і нестационарного режимів руху було введено критерії нестационарності.

### Основні критерії нестационарності та їх взаємозв'язок

1. Критерій Струхалія визначається величиною

$$Str = \frac{x}{vt},$$

де:  $x$  – поточна координата,  $x \in [0, l]$ ;  $l$  – довжина трубопроводу;  $t$  – час;  $v$  – швидкість газу на відстані  $x$  від початку трубопроводу в момент часу  $t$ .

Оскільки  $\frac{x}{t} = v_s$  – середня швидкість газу на відріжку  $[0, x]$ , то критерій Струхалія можна записати у вигляді

$$Str = \frac{v_s}{v}.$$

Він характеризує відхилення середньої швидкості від миттєвої на заданому проміжку.

2. Критерій „Гухмана” –

$$G = Ma^2 \frac{\lambda x}{D}.$$

Тут  $Ma = \frac{v}{c}$  – число Маха (швидкість звуку в газі при заданих гідродинамічних параметрах).

Відомо, що

$$c^2 = kzRT,$$

де:  $k$  – показник адіабати;  $z$  – коефіцієнт стисливості газу;  $r$  – газова стала;  $t$  – температура газу.

Якщо врахувати означення числа Маха і швидкості звуку в газі, то

$$G = \frac{v^2}{kzRT} \frac{\lambda x}{D}.$$

Далі, при стаціонарному русі газу в трубопроводі значення тиску  $p_{st}(x)$  на відстані  $x$  від початку можна обчислити за формулою

$$p_{st}(x) = \sqrt{p_0^2 - \frac{\lambda zRT}{D} (\rho v)^2 x}.$$

Оскільки

$$p = z\rho RT,$$

то легко показати, що

$$G = \frac{p_0^2 - p_{st}^2(x)}{kp^2(x,t)},$$

тобто даний критерій характеризує зміну тиску в стаціонарному випадку на заданому проміжку до величини тиску в нестаціонарному випадку. З іншого боку, врахувавши означення числа Маха, можна записати

$$G = \frac{v}{c} \frac{\lambda \tau}{D},$$

де  $\tau = x/c$  – час проходження звуковою хвилею відстані довжиною  $x$ .

3. Критерій нестаціонарності виду

$$N = \frac{\tau}{l^2} \frac{2c^2 D}{\lambda v_s} \chi,$$

де  $\tau$  – перехідний час, параметр режиму.

Якщо  $v_{sp} = \frac{l}{\tau}$  – середня швидкість за перехідний час  $\tau$ , то при  $v_s \approx v_{sp}$  отримуємо зв'язок між критеріями  $G$  та  $N$

$$N = 2\chi G.$$

4. Ще одним критерієм нестаціонарності може бути число Рейнольда

$$Re = \frac{4m}{\pi D \mu} = \frac{D v p}{\mu_0 RT} \frac{T+C}{273+C} \left( \frac{273}{T} \right)^{3/2},$$

де:  $m$  – маса газу;  $\mu_0$  та  $\mu$  – динамічні в'язкості газу при стандартних та робочих умовах відповідно. Для визначення впливу числа Рейнольда на обчислення коефіцієнта гідравлічного опору скористаємося рівномірною відносно режиму плинності формулою

$$\lambda = \left( \frac{Y + \varepsilon + C^{1.5}}{1 + 76C} \right)^{0.2}, \quad \varepsilon = \frac{k_{uu}}{D}, \quad Y = \frac{79}{Re}, \quad C = (2Y)^{10}.$$

Числа Рейнольда характеризують переважно характер потоку газу. Якщо  $Re < 2300$  – маємо ламінарний потік; при  $Re > 4000$  – турбулентний потік, а якщо  $2000 < Re < 4000$  – то це зона гладких труб.

Числа Рейнольда мають вплив на коефіцієнт гідравлічного опору при малих значеннях об'ємних витрат (швидкостей). Так, згідно з експериментальними даними числа Рейнольда необхідно враховувати при  $Re < 6000$ . На практиці при великих діаметрах труб це приблизно відповідає швидкості 1 м/с.

5. Якщо  $\Delta p(x,t)$  – перепад тиску в точці  $x$  у деякий момент часу  $t$ , а  $p_2(x)$  та  $p_1(x)$  – відповідні значення тисків у вихідному та новому стаціонарах, тоді достатньо інформативним критерієм визначення перехідного часу є величина

$$t_p = \frac{\Delta p(x,t)}{p_2(x) - p_1(x)}.$$

Остання величина характеризує час, за який перепад тиску в даній точці досягне свого стаціонарного значення.

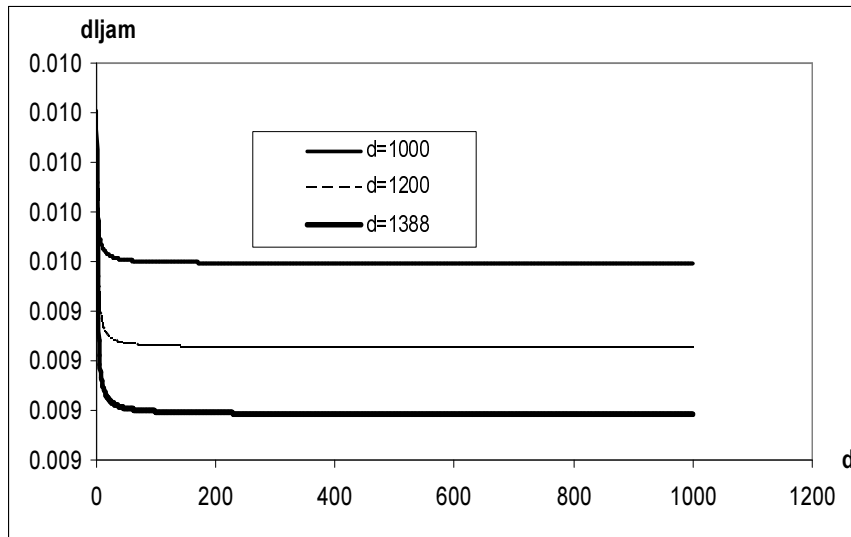
**Обчислювальний експеримент.** Апробація отриманих результатів проводилась під час обчислювального експерименту на модельних задачах.

Як правило, граничні умови на краях трубопроводу формуються на основі даних роботи компресорних станцій. З їх аналізу випливає [1, 2], що характер зміни об'ємних витрат є близьким до експоненціального. Тому граничні умови на об'ємні витрати газу доцільно вибрати у вигляді

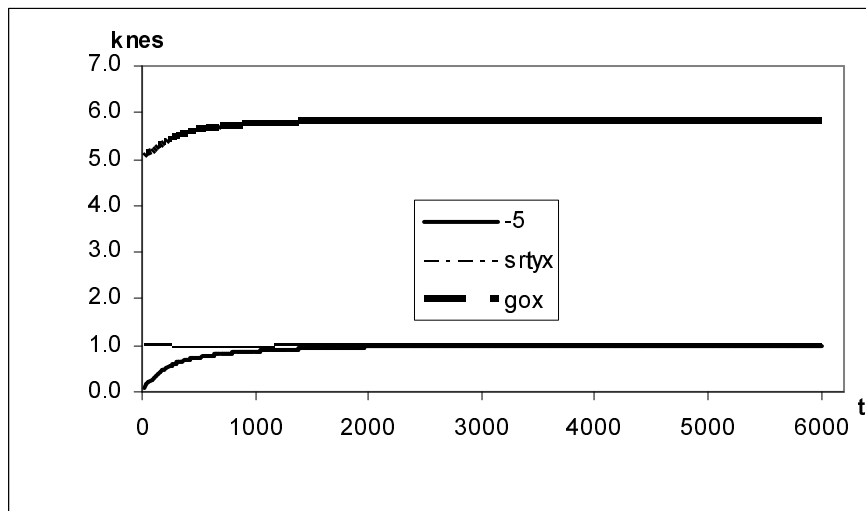
$$q_0(t) = q_{0n} + (q_0 - q_{0n}) e^{-\gamma_0 t}, \quad (3)$$

$$q_l(t) = q_{ln} + (q_l - q_{ln}) e^{-\gamma_l t} \quad (4)$$

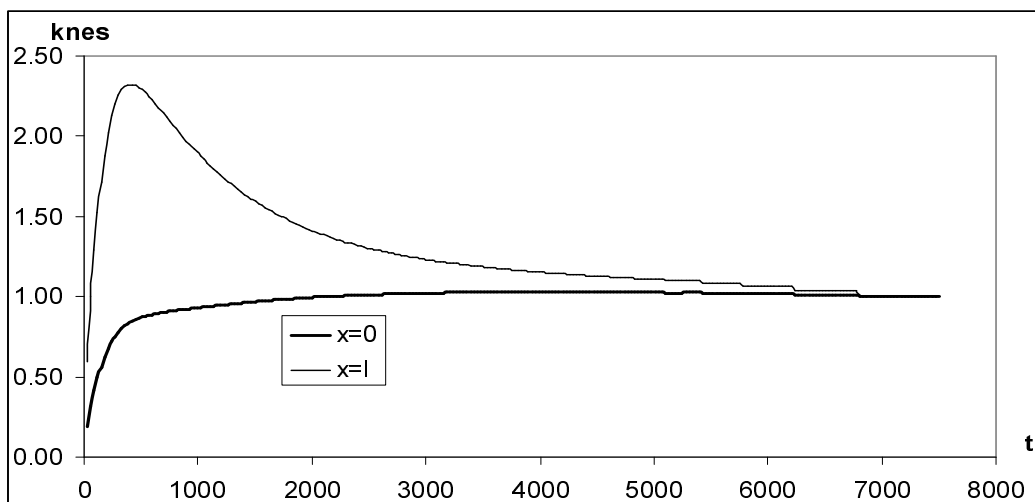
відповідно на вході та виході трубопроводу. В даному випадку  $q_0, q_{0n}, \gamma_0$  – об'ємні витрати газу у вихідному та новому стаціонарному стані течії газу та параметр, який характеризує швидкість переходу з одного стану в інший на початку трубопроводу, а  $q_l, q_{ln}, \gamma_l$  – аналогічні параметри в кінці трубопроводу. Параметри  $\gamma_0$  та  $\gamma_l$  знаходяться у процесі обробки експериментальних даних або задаються при плануванні режиму роботи КС. Тому, якщо граничні умови на масоперенос задаються в аналітичному вигляді, то за допомогою параметрів, що входять в них, можна керувати перехідними процесами (в розглянутих моделях вибір параметрів  $\gamma_0$  та  $\gamma_l$  дає змогу досягти необхідного перехідного часу).



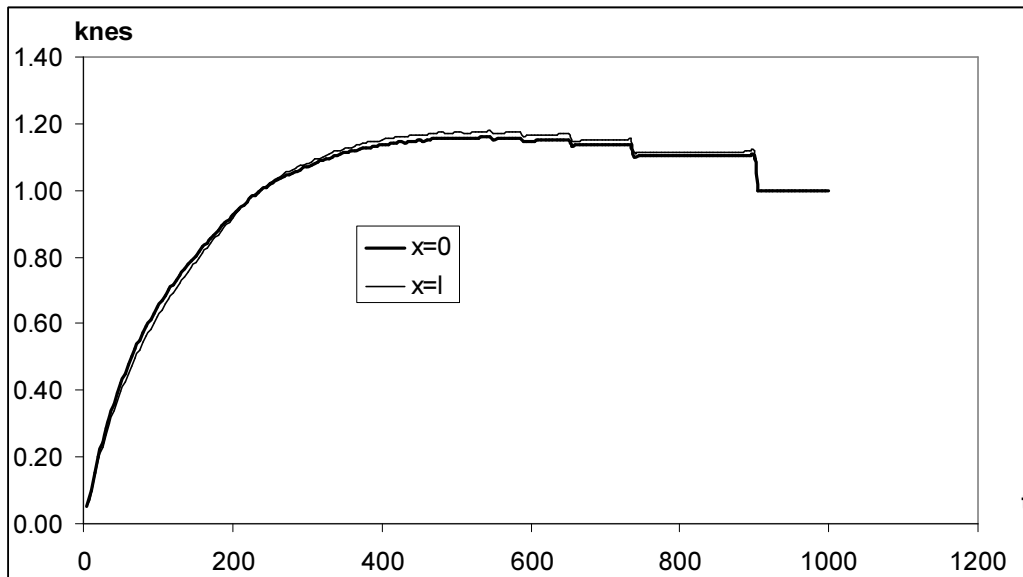
**Рисунок 1 — Залежність коефіцієнта гідравлічного опору від об'ємної витрати для трубопроводів діаметрів 1000, 1200 та 1388 мм**



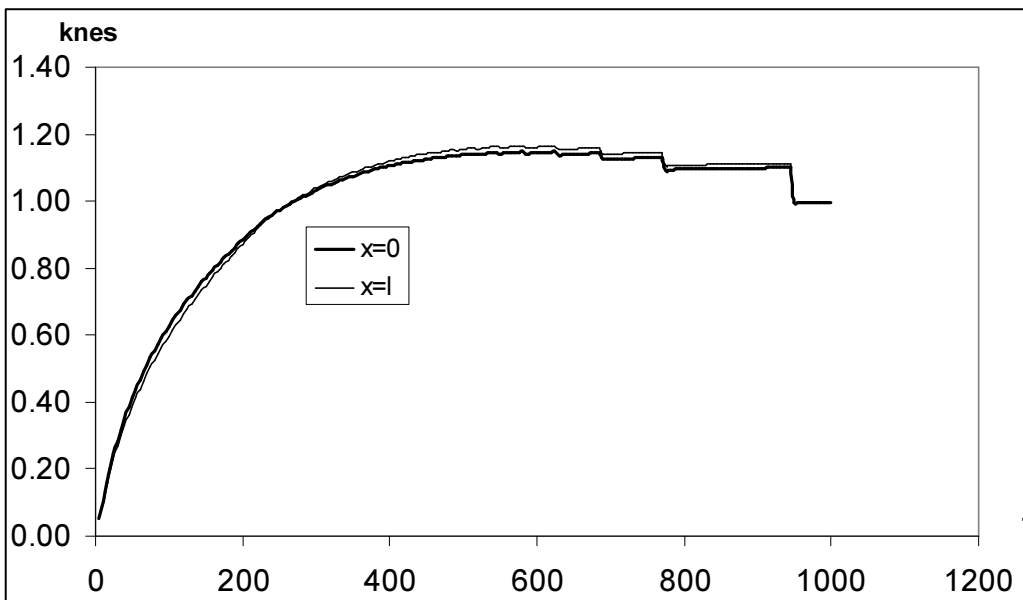
**Рисунок 2 — Залежності критеріїв нестационарності від часу**



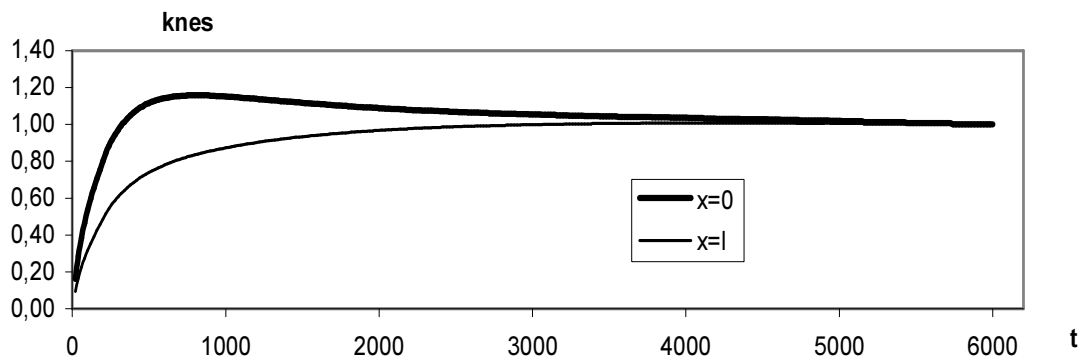
**Рисунок 3 — Залежність коефіцієнта нестационарності ( $knes$ ) від часу при  $q_0 = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_{0n} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_0 = 0,001$ ,  $q_l = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_{ln} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_l = 0.003$**



**Рисунок 4** — Залежність коефіцієнта нестационарності (knes) від часу при  $q_0 = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_{0n} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_0 = 0,01$ ,  $q_l = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_m = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_l = 0.03$



**Рисунок 5** — Залежність коефіцієнта нестационарності (knes) від часу при  $q_0 = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_{0n} = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_0 = 0,01$ ,  $q_l = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_m = 600 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_l = 0.03$



**Рисунок 6** — Залежність коефіцієнта нестационарності (knes) від часу при  $q_0 = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_{0n} = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_0 = 0,001$ ,  $q_l = 800 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $q_m = 1000 \text{ м}^3/\text{с}$ ,  $\gamma_l = 0.003$

Результати обчислень подаються у вигляді рисунків. На рис. 1 зображено залежність коефіцієнта гідравлічного опору від об'ємної витрати для трубопроводів з різними діаметрами. На рис. 2 зображено залежність наведених вище критеріїв нестационарності ( $k_{nes}$ ) від часу (5-п'ятий критерій,  $str_{yx}$  – критерій Стругана,  $gox$  – критерій „Гохмана”) для трубопроводу з параметрами  $D=1,2$  м;  $p_0=65$  атм;  $\lambda=0,01$ ;  $vs=9$  м/с;  $l=100000$  м;  $R=480$  кДж/(кг·К);  $T=300$  К;  $z=0,91$ ;  $\rho_0=0,68$  кг/м<sup>3</sup> при  $q_0=800$  м<sup>3</sup>/с;  $q_{0n}=1000$  м<sup>3</sup>/с;  $\gamma_0=0,001$ ;  $q_l=800$  м<sup>3</sup>/с;  $q_{ln}=1000$  м<sup>3</sup>/с;  $\gamma_l=0,003$ .

На рис. 3–6 зображено залежності критеріїв нестационарності ( $k_{nes}$ ) від часу, обчислені за формулою

$$\frac{\Delta p(x,t)}{p_2(x) - p_1(x)}$$

при різних граничних умовах з параметрами  $D=1,338$  м;  $p_0=65$  атм;  $\lambda=0,01$ ;  $vs=9$  м/с;  $l=100000$  м;  $R=480$  кДж/(кг·К);  $T=300$  К;  $z=0,91$ ;  $\rho_0=0,68$  кг/м<sup>3</sup>.

### Висновки

З рис. 2-6 видно, що в асимптотиці за часом всі критерії нестационарності дають приблизно один і той самий перехідний час. Однак п'ятий критерій та критерій „Гохмана” дає можливість оцінити швидкість виходу на стаціонар, в той час як цього не можна зробити за критерієм Струхалю.

Як було показано вище, третій критерій відрізняється від четвертого на сталу величину (коефіцієнт режиму). Тому і не проводились його дослідження.

При оцінці параметрів нестационарності важливими є знання перехідних процесів на початку та в кінці трубопроводу, тобто при  $x=0$  та  $x=l$ . Оскільки  $q=\pi D^2 v/4$ , то для граничних умов виду

$$q(t) = q_* + \Delta q e^{-\gamma t},$$

маємо

$$Str = \frac{v_s}{v} = \frac{q_s}{q}.$$

Середнє значення об'ємної витрати на проміжку часу  $t \in [0, T]$

$$q_s = \frac{1}{T} \int_0^T q(t) dt = q_* + \Delta q \frac{1 - e^{-\gamma T}}{\gamma T}.$$

Тому

$$Str = \left( q_* + \Delta q \frac{1 - e^{-\gamma T}}{\gamma T} \right) / (q_* + \Delta q e^{-\gamma T}).$$

Таким чином вибором граничних умов можна керувати перехідним часом, а це, в свою чергу, дозволяє оптимізувати перехідний процес.

### Література

- 1 Александров А.В., Яковлев Е.И. Проектирование и эксплуатация систем дальнего транспорта газа. — М.: Недра, 1974. — 443 с.
- 2 Трубопроводный транспорт газа / Бобровский С.А., Щербаков С.Г. Яковлев Е.И. и др. — М.: Наука, 1976. — 495 с.
- 3 Трубопроводный транспорт газа / Ковалко М.П., Грудз В.Я., Михалків В.Б., Тимків Д.Ф., Шлапак Л.С., Ковалко О.М. / За ред. М.П.Ковалка. — К.: Агентство з раціонального використання енергії та екології, 2002. — 600 с.
- 4 П'янило Я.Д. Дослідження неусталеного руху газу в пористих середовищах // Прикл. проблеми мех. і мат. — 2004. — Вип. 2. — С. 178-184.
- 5 П'янило Я.Д., Притула М. Г. Дослідження перехідних процесів при моделюванні руху газу в горизонтальних трубопроводах // Інформаційно-математичне моделювання складних систем. — MIMUZ' 2002. — Львів: Центр математичного моделювання Інституту прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.Підстригача НАН України, в-во «Ахіл», 2002. — С. 105-110.