

## УДОСКОНАЛЕННЯ АГРЕГАТИВНОЇ МОДЕЛІ СКЛАДНИХ ГАЗОТРАНСПОРТНИХ СИСТЕМ З МЕТОЮ АНАЛІЗУ БАГАТОРІВНЕВИХ СКЛАДНИХ ГАЗОПРОВІДНИХ МЕРЕЖ

Д.Ф.Тимків, Ю.Г.Мельниченко

ІФНТУНГ, 76019, м. Івано-Франківськ, вул. Карпатська, 15, тел.(03422),  
e-mail:

*Удосконалено агрегативно-імітаційний метод розрахунку складних газотранспортних систем. Введено нові типи агрегатів у метод, що дає можливість здійснювати розрахунок складних багаторівневих газотранспортних систем. Існує можливість розрахунок як стаціонарних, так і нестаціонарних режимів роботи газотранспортних систем.*

Ключові слова: нестаціонарний потік, складні газотранспортні системи, агрегативно-імітаційний метод

*Усовершенствован агрегативно-имитационный метод расчета сложных газотранспортных систем. В метод введены новые типы агрегатов, что позволит произвести расчеты сложных многоуровневых газотранспортных систем. Возможен расчет как стационарных, так и нестационарных режимов работы газотранспортных систем.*

Ключевые слова: нестационарный поток, сложные газотранспортные системы, агрегативно-имитационный метод

*The aggregate-imitational method of complicated gas transportation systems calculation was improved. New types of aggregates were introduced, which gives a possibility produce high-level complicated gas transportation systems calculation. This method is appropriate to produce the steady state and transient gas transportation system regimes calculation.*

Keywords: unsteady flow, complicated gas transportation systems, aggregate-imitational method

Українська газотранспортна система займає друге місце в Європі за загальною протяжністю і характеризується винятковою складністю та розгалуженістю, тому під час вибору моделей великих її складових частин, скажімо, магістральних газопроводів в межах Управління магістральних трубопроводів, необхідно передбачати можливість розгляду складних багаторівневих систем.

Існує декілька підходів до моделювання складних газотранспортних систем. Вибір методу опису складної газотранспортної системи (ГТС) тісно пов'язаний із методом розрахунку параметрів газового потоку в системі за довжиною і в часі. Так, в праці [1] автори розв'язують нестационарну задачу операційними методами. При цьому аналіз нестационарних режимів у складних газотранспортних системах здійснювався шляхом опису частин ГТС у вигляді матриць оператора зв'язку або у вигляді напрямлених графів. Відомі також числові методи розрахунку нестационарного газового потоку в магістральних газопроводах, що базуються на дискретизації розрахункової області, наприклад метод прямих, метод характеристик або сіткові методи [1, 2]. При цьому для дослідження роботи складних газотранспортних систем застосовують системний підхід, який базується на розбитті складної системи, якою вважається газотранспортна система, на простіші її елементи [1, 2].

Принцип розбиття складних систем на простіші елементи, на якому базується агрегативно-імітаційний метод розрахунку газотранспортних систем [1, 2], передбачає розбиття

первинної складної системи на елементарні її складові частини. Такий підхід звужує ряд газотранспортних систем, які можуть бути змодельовані агрегативно-імітаційним методом, до систем, в яких паралельно можуть працювати тільки окремі агрегати, але не підсистеми агрегатів, що в реальних умовах експлуатації вітчизняної газотранспортної системи, практично не зустрічається.

Таким чином, метою роботи є удосконалення агрегативно-імітаційного методу розрахунку складних газотранспортних систем для можливості використання цього методу під час аналізу багаторівневих газотранспортних систем.

Для формулювання основних принципів застосування системного підходу до аналізу газотранспортних систем сформулюємо основні визначення теорії складних систем. Отже складною системою назвемо систему, яка містить велику кількість взаємопов'язаних і взаємодіючих між собою елементів (неподільних частин системи), що забезпечують виконання деяких функцій, які неможливо виконати за допомогою будь-якої складової чи певної сукупності складових системи поза нею [3]. Існують кілька підходів стосовно дослідження складних систем: статистичне моделювання, моделювання з використання випадкових чисел, моделювання систем масового обслуговування, моделювання агрегативних систем та ін. [3]. Враховуючи можливість розбиття складної газотранспортної системи на скінченну кількість елементів, для її дослідження доцільно застосувати агрегативну модель [1, 2].

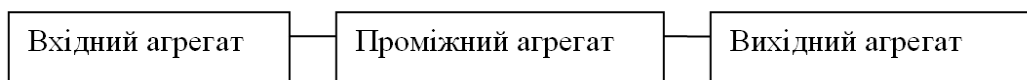


Рисунок 1 – Елементарна схема ГТС

В якості агрегатів ГТС вибираємо: 1) лінійну частину, що являє собою ділянку магістрального газопроводу зі сталими геометричними, гідравлічними та термодинамічними параметрами; 2) компресорні станції, що являють собою математичні моделі, до складу яких входять моделі окремих нагнітачів та моделі апаратів повітряного охолодження газу.

У методі агрегати вважаємо кусково-лінійними. Згідно агрегативного методу моделювання для кожного агрегату формується вектор його станів  $Z$  з координатами  $(Z_1, Z_2, \dots, Z_n)$ . Координатами вектора  $Z$  є значення параметрів агрегату в певний момент часу. Кожен момент часу характеризується окремим вектором стану агрегату з відповідними дискретними за часом значеннями його координат.

Якщо вектор стану записується для лінійної частини, то його координати мають таку структуру [1, 2].  $Z_1$  є кроком часу, з яким агрегат переходить у новий стан,  $Z_{2 \dots (N_x+1)}$  – розподіл тиску по довжині агрегату ( $N_x$  – кількість точок розбиття агрегату по довжині);  $Z_{N_x+2 \dots 2 \cdot N_x+1}$  – розподіл температури газу;  $Z_{2 \cdot N_x+2 \dots 3 \cdot N_x+1}$  – розподіл температури стінки газопроводу;  $Z_{3 \cdot N_x+2 \dots 4 \cdot N_x+1}$  – розподіл масової витрати по довжині агрегату. Крім того, для коректного спряження поточного агрегату з сусідніми агрегатами необхідно володіти певною інформацією про стан цього агрегату. Назвемо такий агрегат  $Z^{j+1}$ . Тоді у векторі станів поточного агрегату фіксуємо температуру  $(j+1)$ -го агрегату в другій точці його розбиття, температуру стінки  $(j+1)$ -го агрегату та крок розбиття цього агрегату по довжині.

Зміна стану агрегату відбувається внаслідок протікання у ньому внутрішніх процесів а також взаємодії агрегату з оточуючим середовищем. Названі процеси згідно з агрегативно-імітаційним методом, здійснюються шляхом приймання вхідного  $X$  та передавання вихідного сигналу  $Y$ . Подібно до  $Z$ ,  $X$  та  $Y$  являють собою вектори, координатами яких є відповідні параметри агрегатів на межі з іншими агрегатами. В даній роботі розглядаються газотранспортні системи, які містять компресорні станції. Модель компресорної станції передбачає рівність між собою значень масової витрати на вході та виході зі станції для кожного моменту часу. Крім того, модель нагнітача компресорної станції (КС) представлена функцією  $\varepsilon_2 = f(\Delta M, \varepsilon_1, [n/n_H]_{np})$  [2]. Для визначення параметрів КС у момент часу  $t + \Delta t$  необхідно володіти значеннями цих параметрів у даний

момент часу хоча б для одного краю обв'язки нагнітача. При цьому немає значення, чи це будуть параметри на вході чи на виході КС.

Таким чином, якщо вектор станів  $Z$  формується для КС, то його координатами будуть такі параметри КС:

$$Z_1 = \Delta \tau; \quad Z_{2,3} = P_{ex,вих}; \quad Z_{4,5} = T_{ex,вих}; \\ Z_{6,7} = T_{ст ex,вих}; \quad Z_{8,9} = M_{ex,вих}$$

В агрегативній моделі ГТС, наведеній в [2, 3], варто виділити три принципово різні типи агрегатів: вхідний, проміжний та вихідний. Елементарну схему ГТС можна зобразити в такому виді (рис. 1).

На етапі “предиктор” в якості граничних умов виступають тиск та масова витрата. Конфігурації граничних умов для агрегату типу «лінійна частина» можуть бути наступними:  $P(0,t), P(1,t); P(0,t), M(1,t); M(0,t), P(1,t); M(0,t), M(1,t)$ . Якщо модель ГТС будується для конкретного газопроводу, газотранспортного підприємства або навіть цілої держави, то коректною конфігурацією вихідної інформації для розрахунку параметрів роботи таких ГТС є значення витрати на виході з ГТС (дані оперативних або комерційних замірів витрати) та тиску на вході ГТС [1,2]. Враховуючи сказане, конфігурація граничних умов для розрахунку параметрів станів проміжних агрегатів ГТС в процесі її роботи в нестационарному режимі вибрана у виді  $P(0,t), M(1,t)$ . Тоді для вхідних агрегатів ГТС однією з граничних умов (з числа швидкозмінних параметрів) повинна бути умова виду  $P(1,t)$ , а для вихідних – умова виду  $M(0,t)$ .

Очевидно, що вхідний сигнал  $X$  зумовлює вплив на агрегат оточуючого середовища, або відповідних сусідніх агрегатів. Вихідний сигнал  $Y$  натомість характеризує вплив агрегату, в якому він сформований, на оточуюче середовище. Враховуючи той факт, що зміна стану агрегату (якщо агрегат – ділянка лінійної частини) здійснюється шляхом розв'язування диференціальних рівнянь у часткових похідних, вхідний сигнал  $Y$  повинен містити граничні умови. Тоді приймання сигналу для проміжного агрегату відбувається у такий спосіб:

$$Z_2 = X_1; \quad Z_{N_x+2} = X_2; \quad Z_{2N_x+2} = X_3; \\ Z_{4N_x+1} = X_4.$$

Вихідним сигналом являються ті параметри в граничних точках агрегату, які обчислюються за граничними умовами за час  $\Delta t$ . Таким чином,

$$Y_1 = Z_{N_x+1}; \quad Y_2 = Z_{2N_x+1}; \quad Y_3 = Z_{3N_x+1}; \\ Y_4 = Z_{3N_x+2}.$$

Оскільки вхідний та вихідний агрегати взаємодіють з суміжними агрегатами системи

тільки з одного краю агрегату, їх вхідні та вихідні сигнали матимуть такий вигляд:

– для вхідного агрегату

$$\text{вхідний сигнал} - Z_{4N_x+1} = X_4;$$

$$\text{вихідний сигнал} - Y_1 = Z_{N_x+1}; Y_2 = Z_{2N_x+1};$$

$$Y_3 = Z_{3N_x+1};$$

– для вихідного агрегату

$$\text{вхідний сигнал} - Z_2 = X_1; Z_{N_x+2} = X_2;$$

$$Z_{2N_x+2} = X_3;$$

$$\text{вихідний сигнал} - Y_4 = Z_{3N_x+2}.$$

Для коректного розподілу сигналів між відповідними агрегатами складної системи необхідно побудувати модель такої системи, котра б дозволила здійснювати обмін сигналами автоматично. Для цього розроблена модель спряження агрегатів, котра передбачає суцільну нумерацію кожного агрегату в порядку розміщення цих агрегатів по ходу руху газу. При цьому взаємне розміщення агрегатів між собою представлене системою числових кодів, за допомогою яких можна описати найрізноманітніші варіанти ГТС.

Функціонування методу спряження елементів складної системи здійснюється шляхом моделювання перерозподілу вхідних та вихідних сигналів між елементами складної системи. Іншими словами, якщо ввести поняття об'єднання вхідних та вихідних сигналів, що формуються в процесі функціонування ГТС

$$[X] = \bigcup_{j=1}^N [X_j^i]^m; [Y] = \bigcup_{j=1}^N [Y_j^i]^n, \quad (1)$$

де:  $j=1...N$  – номери агрегатів;  $i$  – індекси клем, з яких виходять вихідні, або на які подаються вхідні сигнали;  $m$  – кількість клем, для вхідного сигналу  $j$ -ого агрегату;  $n$  – кількість клем для вихідного сигналу  $j$ -ого агрегату, то задача побудови моделі спряження зводиться до визначення оператора, що реалізує відображення

$$[X] \rightarrow [Y], \text{ або } [Y] = R[X]. \quad (2)$$

Використаємо вид оператора  $R$ , наведеного в [1, 2]. Даний оператор є набором числових кодів, які символічно відображають взаємне розміщення агрегатів між собою. В процесі побудови оператора керуються такими правилами кодування:

– порядковий номер рядка з цифровими кодами відповідає номеру агрегату, для якого даний рядок записується;

– модуль числа з від'ємним знаком дорівнює порядковому номеру суміжного агрегату, з яким взаємодіє поточний агрегат;

– додатне число вказує на вид сигналу взаємодії з даним суміжним агрегатом: для вхідного відносно поточного агрегату – 1, а для вихідного – 2. Враховуючи той факт, що елементи вектора вхідного сигналу є граничними умовами для розрахунку нового стану поточного агрегату, вхідний сигнал надходить від усіх суміжних з поточним агрегатів. Відповідно, після

розрахунку нового стану поточного агрегату, новосформований вихідний сигнал передається на всі суміжні агрегати. Таким чином, координати вхідного та вихідного сигналів доцільно поділити на координати відповідних сигналів для попередніх та наступних згідно технологічної схеми агрегатів системи;

– набір кодів для одного агрегату закінчується на цифру 0.

Для розрахунку розподілу параметрів газу по таких паралельних нитках використовують закони Кірхгофа, які в гідроаеродинаміці матимуть вигляд [4]:

$$\sum_{i=1}^n M_i^J = 0; \quad (3)$$

$$\sum_{i=1}^n M_i^J T_i^J = 0; \quad (4)$$

$$P_i^J = const, \text{ при } i=1...n, \quad (5)$$

де:  $J$  – порядковий номер вузла;  $i$  – порядковий номер агрегату, під'єданого до  $J$ -ого вузла;  $n$  – кількість агрегатів, під'єднана до  $J$ -ого вузла.

Агрегативно-імітаційний метод, описаний в [1, 2], передбачає розрахунок газотранспортних систем з паралельними нитками. Розподіл масової витрати по паралельних нитках здійснюється за такою залежністю:

$$M_J = M_{\text{вих}} \frac{\sqrt{\frac{D_J^5}{\xi_J}}}{\sum_{i=1}^m \sqrt{\frac{D_i^5}{\xi_i}}}, \quad (6)$$

де:  $M_{\text{вих}}$  – сумарна масова витрата на виході з вузла паралельних ниток;  $m$  – кількість паралельних ниток, які входять до вузла;  $J$  – номер нитки, для якої визначається масова витрата.

Закон Кірхгофа для тиску (5) виконується в наведеному методі шляхом запису такої рівності [2]

$$P_{\text{ex } j} = \frac{\sum_{i=1}^m P_{\text{вих } i}}{m}, \quad (7)$$

де:  $P_{\text{ex } j}$  – тиск на вході  $I$ -ого агрегату, який виходить з вузла;  $P_{\text{вих } i}$  – тиск на виході  $J$ -тої паралельної нитки, що входить у вузол.

Такі припущення є прийнятними для моделювання оперативних режимів однорівневих газотранспортних систем. У випадку ж складних багаторівневих газотранспортних систем з можливістю виникнення нестационарних збурень в одній з кількох паралельних ниток, умови (6)-(7) є надто неточними, що може призвести до спотворення реальної картини масотеплообміну в цій системі. Враховуючи те, що метою досліджень є нестационарні процеси, викликані частковим перекриттям ділянки складних ГТС, а також враховуючи поширеність ба-

гаторівневих ГТС (наприклад, коли одна з паралельних ділянок двониткового магістрального газопроводу працює "на прохід" повз КС), необхідно удосконалити модель спряження агрегатів, наведену в [1, 2].

Введемо в агрегативний метод додаткові поняття: "розгалуження", "відгалуження" та "підкачування". Підкачуванням прийнято називати складний МГ, в якому газ згідно з проектним рішенням рухається від початкового агрегату до кінцевого. При цьому на початку вхідного агрегату як гранична умова задано розподіл в часі одного з швидкозмінних параметрів та значення температури газу, а вихідний агрегат підкачування в кінцевій точці з'єднаний з загальною ГТС. Точка з'єднання називається вузлом. Відгалуження – це МГ, рух газу в якому відбувається у напрямку від вхідного до вихідного агрегату, вхідний агрегат якого з'єднаний з вузлом загальної ГТС, а для вихідного агрегату задані граничні умови. Розгалуженням називатимемо частину загальної ГТС, підкачування або відгалуження, яка представлена двома або більшою кількістю паралельних ниток МГ за умови, що якщо хоча б одна з них була представлена більш ніж одним агрегатом.

Ці поняття віднесемо до категорії підсистем, оскільки кожне з них є складною одно- або багаторівневою системою. Кожну з названих підсистем можна розбити на агрегати або на підсистеми нижчого рівня. Розрахунок параметрів підсистем здійснюється за тим самим принципом, що і загальної системи (підсистеми вищого рівня). В процесі переходу від підсистем нижчого рівня до систем вищого рівня здійснюється перевірка коректності виконання розрахунку системи нижчого рівня. У випадку газотранспортної системи це є виконання рівностей (1)-(3) у вузлах, в яких елементи підсистеми з'єднуються з елементами підсистеми вищого рівня.

Під час побудови агрегативної моделі багаторівневих ГТС користуються такими принципами:

– початок розрахунку параметрів агрегатів ГТС для поточного моменту часу здійснюється від вхідного агрегату першого за порядком підкачування;

– розрахунок параметрів агрегатів ГТС для поточного моменту часу завершується після розрахунку вихідного агрегату останнього за порядком відгалуження ГТС;

– перехід від одного проміжного агрегату до іншого здійснюється для загальної ГТС в напрямку від вхідного агрегату першого за порядком підкачування до вихідного агрегату останнього за порядком відгалуження, а для підсистем – від вхідного агрегату підкачування до вихідного агрегату відгалуження;

– якщо в процесі послідовного розрахунку параметрів агрегатів в зазначеному вище порядку поточний агрегат у напрямку переходу між проміжними агрегатами з'єднаний з вузлом підключення всіх можливих підсистем (найскладніший випадок), то пріоритети щодо по-

рядку розрахунку агрегатів ГТС в такому випадку надаються у такому порядку:

– спочатку здійснюється розрахунок параметрів агрегатів окремо для кожного підкачування. Черговість аналізу підкачувань зазначається у вихідних даних;

– далі здійснюється розрахунок параметрів агрегатів окремо для кожного відгалуження; Черговість аналізу відгалужень зазначається у вихідних даних;

– потім здійснюється розрахунок параметрів агрегатів окремо для кожної вітки розгалуження;

– черговість аналізу віток розгалуження зазначається у вихідних даних.

Покажемо реалізацію наведених принципів для агрегативного методу розрахунку складних газотранспортних систем, описаного в [1, 2].

Для аналізу нестационарних процесів в складних ГТС необхідною умовою для початку розрахунку є наявність початкових умов. Існує кілька варіантів задання початкових умов:

– у вигляді функціональних залежностей за просторовою координатою для кожного агрегату ГТС;

– у вигляді дискретних значень для кожної точки просторового розбиття досліджуваної ГТС;

– згідно з припущенням щодо стаціонарності процесу транспортування газу по всій ГТС.

Для останнього варіанту задання початкових умов розрахунок значень параметрів у кожній точці розбиття лінійних ділянок у просторі здійснюється за рівняннями руху газу, розв'язаними методом згідно значень граничних умов у початковий момент часу.

Розподіл масової витрати між агрегатами складних багаторівневих ГТС здійснюється у напрямку від кінцевих агрегатів відгалужень до початкових агрегатів підкачувань таким чином:

$$M_{вих J} = \sum_{I=1}^m \psi_J \cdot M_{ex I}, \quad (8)$$

де:  $M_{вих J}$  – масова витрата агрегатів, умовно вихідна точка яких з'єднана з вузлом;  $M_{ex I}$  – масова витрата агрегатів, умовно вхідна точка яких з'єднана з вузлом;  $m$  – кількість агрегатів, входи газу яких з'єднані з вузлом;  $\psi_J$  – коефіцієнт розподілу витрати між вітками

$$\psi_J = \psi_J - \frac{\delta\psi * (P_{cep} - P_{вих J})}{\sum_{I=1}^m |P_{cep} - P_{вих I}|}, \quad (9)$$

де:  $P_{вих}$  – тиск на виході агрегатів, виходи яких з'єднані з вузлом;  $\delta\psi$  – крок зміни коефіцієнту перерозподілу витрати.

Перерозподіл витрати здійснюється так. В першому наближенні приймається коефіцієнт розподілу витрати для кожного агрегату системи таким чином, щоб в процесі побудови початкових умов для здійснення розрахунку нестационарного режиму роботи ГТС робочий тиск перебував в межах його допустимих значень. Після цього здійснюється первинний розподіл

витрати по агрегатах згідно з припущенням про стаціонарність роботи ГТС в початковий момент часу, починаючи від вихідних агрегатів відгалужень і закінчуючи вхідними агрегатами підкачувань.

Далі розрахунок інших параметрів агрегатів здійснюється, починаючи від вхідних агрегатів підкачувань (для яких ці параметри в початковий точці задаються в якості граничних умов в початковий момент часу) і закінчуючи вихідними агрегатами відгалужень.

Отримавши значення тиску газу в кожній точці ГТС необхідно перевірити виконання умов (1)-(3) для кожного вихідного вузла розгалужень та для кожного вузла підкачувань. Для цього обчислюється середнє значення тиску в кінцевій точці для кожного вхідного агрегату вузла:

$$P_{cp} = \frac{\sum_{i=1}^n P_{kin i}}{n}, \quad (10)$$

і перевіряється умова

$$\left| P_{kin i} - P_{cp} \right| \leq \delta. \quad (11)$$

Якщо для одного з агрегатів вузла дана умова не виконується, для кожного вихідного агрегату віток підкачувань/розгалужень вузлів необхідно скоригувати значення коефіцієнтів перерозподілу витрати за формулою (7).

Після коригування значень коефіцієнтів перерозподілу витрати для вхідних у вузли віток та здійснення за формулою (6) нового перерозподілу значень масової витрати між цими вітками необхідно знову провести розрахунок розподілу значень тиску, температури газу та температури стінки по довжині ГТС за умови її роботи в стаціонарному режимі. Так, методом послідовних ітерацій досягається виконання умови (8), іншими словами, другого закону Кріггофа для кожного вузла ГТС.

Розрахунок нестационарних режимів складних багаторівневих ГТС агрегативно-імітаційним методом здійснюється так. Перед переходом на наступний крок за часом після задовільного виконання умов (7) здійснюється запис розподілу параметрів ГТС та значення поточного моменту часу в пам'ять комп'ютера. Після розрахунку параметрів ГТС на наступному кроці за часом здійснюється перевірка умов (7) в кожному вузлі ГТС. У разі невиконання даної умови для будь-якого вузла здійснюється коригування значень коефіцієнтів перерозподілу витрати для відповідних віток вузлів ГТС та присвоєння значенням параметрів ГТС в поточний момент часу їх значення, занесені в пам'ять комп'ютера, а поточний момент часу змінюється на попередній (добутий з пам'яті комп'ютера). Таким чином, перехід на наступний крок за часом здійснюється тільки за умови виконання умови (9) для кожного вузла ГТС.

Удосконалення агрегативно-імітаційного методу дасть можливість застосування методу для розрахунку параметрів ГТС, які по складності порівнюються до вітчизняних газотран-

спортних систем в межах Управління магістральних газопроводів (УМГ). Наявність методу для розрахунку нестационарних процесів по магістральних газопроводах в межах УМГ уможливило розробку систем контролю за безаварійністю роботи ГТС за даними штатного вимірювального обладнання, оскільки на вході та виході з УМГ встановлені вимірювальні пункти, які дають можливість отримувати достовірні режимні дані.

Послідовні наближення, на яких здійснюється уточнення розподілу масової витрати по підсистемах, перезавантажує процесор, і відповідно, тривалість процесу обчислення розподілу параметрів систем в просторі і в часі сповільнюється. Тривалість обчислення є ключовою характеристикою алгоритму імітації роботи газотранспортних систем в системах автоматизованого контролю. На тривалість процесу обчислення розподілу параметрів можна вплинути шляхом збільшення допустимої похибки в рівнянні (11), однак межі збільшення похибки та імовірність втрати стійкості різницевих схем внаслідок таких дій, повинні бути підтверджені подальшими дослідженнями.

### Література

- 1 Грачев В.В. Динамика трубопроводных систем / В.В.Грачев, С.Г.Щербаков, Е.И.Яковлев. – М.: Наука, 1987. – 438 с.
- 2 Яковлев Є.І. Режими газотранспортних систем / Є.І.Яковлев, О.С.Казак, В.Б.Михалків та ін. – Львів: Світ, 1992. – 172 с.
- 3 Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем / Н.П.Бусленко. – М.: Наука, 1968. – 356 с.
- 4 Васильев О.Я. Неизотермическое течение газа в трубах / О.Я.Васильев, Э.А.Боднарев, А.Ф.Воеводин. – Новосибирск: Наука, 1978. – 128 с.

Стаття поступила в редакційну колегію  
19.01.10

Рекомендована до друку професором  
В. Я. Грудзом