

В. Я. Грудз<sup>1</sup>  
В. Б. Запхляк<sup>1</sup>  
Т. Ф. Тутко<sup>1</sup>  
О. Я. Дубей<sup>1</sup>

## ОЦІНКА ДИНАМІЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ В РОЗРАХУНКАХ НАДЗЕМНИХ ДІЛЯНОК ГАЗОПРОВОДІВ

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Розглянуто задачу визначення коливань осі надземної ділянки газопроводу, прокладеного через природну перешкоду (річку, балку і т.п.) без проміжних опор, під час проходження через неї очисного поршня. Кінці ділянки газопроводу в задачі вважаються зацемленими, враховано прогин осі газопроводу від його власної ваги. У початковий момент часу наземна ділянка газопроводу нерухома. У складеному диференціальному рівнянні для опису вказаних коливань як їх причина врахована власна вага відкритої ділянки газопроводу і вага рухомого очисного поршня і не враховані інерційні навантаження. У зв'язку з рухом очисного поршня у диференціальному рівнянні наявна дельта-функція Дірака. Для розв'язку диференціального рівняння цієї задачі застосовано інтегральне перетворення Лапласа по часу. У результаті отримано неоднорідне звичайне диференціальне рівняння четвертого порядку по координаті  $x$  ділянки газопроводу, яке розв'язувалося методом варіації довільних постійних. При цьому визначено чотири функції з граничних умов задачі (відсутність прогинів по кінцях ділянки газопроводу та кутів повороту їх поперечних перерізів), тобто розв'язана система чотирьох рівнянь, які задовольняють вказаним граничним умовам. Знайдене обернене перетворення Лапласа з використанням комплексного інтеграла Рімана–Мелліна. З метою реалізації оберненого перетворення Лапласа доданки прямого перетворення Лапласа записано у вигляді добутку двох співмножників і оригіналу їх добутку. Таким способом отримано розв'язок задачі у вигляді подвійних інтегралів, який дозволяє знайти переміщення точок осі ділянки газопроводу по всій довжині його надземної частини і для будь-якого моменту часу перебування очисного поршня на вказаній ділянці та дозволяє визначити динамічні навантаження на цей газопровід.*

**Ключові слова:** надземна ділянка газопроводу, очисний поршень, коливання осі газопроводу, диференціальне рівняння.

### Вступ

Динамічні навантаження на газопровід на надземних ділянках траси, зокрема, повітряних переходах, викликають в стінках труб змінні за величиною і знаком додаткові напруження, які можуть призвести до виникнення аварійних ситуацій, що виявляються в порушенні міцності та стійкості переходів. Вимушені коливання трубопроводу на балковому переході можуть призвести до резонансного підвищення амплітуди, що викличе втрату стійкості переходу.

Динамічні впливи на газопровід в надземному положенні розділяють на зовнішні і внутрішні. До останніх слід віднести навантаження від руху механічних засобів під тиском газу (очисних і діагностичних поршнів). Ці механічні пристрої значної маси рухаються по газопроводу, як правило, нерівномірно. Нерівномірний характер руху і значна маса пристрою призводять до виникнення інерційних сил на трубопровід, особливо на криволінійних ділянках. Тому задача дослідження механічних коливань надземних ділянок магістральних газопроводів тісно пов'язана з проблемами міцності і стійкості повітряних переходів, що визначає надійність експлуатації газотранспортної системи в цілому.

### Аналіз досліджень і публікацій

Проблемою коливань балки під час переміщення по ній вантажу займалися багато авторів, серед них А. Шалленкампе, Г. Штойдінг, С. П. Тимошенко, А. Н. Крилов, А. П. Філіпов. В роботі [1]

вказується на те, що задача визначення переміщень осі балки обмеженої довжини при переміщенні по ній вантажу зі сталою швидкістю доведена до кінця для таких двох випадків:

- коли маса балки мала у порівнянні з масою рухомого вантажу;
- коли маса рухомого вантажу мала у порівнянні з масою балки.

Випадок, коли маса рухомого вантажу одного порядку з масою балки, вивчався С. П. Тимошенком, А. Шалленкампе, Г. Штойдінгом, але простих розв'язків, як вказано в роботі [1], не отримано. Саме цей випадок розглянуто в роботі [1].

Визначаючи прогини осі балки, враховується вага рухомого вантажу і інерційні навантаження. Задача розв'язується методом узагальнених координат за нульових початкових умов і граничних умов, що відповідають шарнірному кріпленню кінців балки. Недоліком дослідження є те, що для кожного відношення маси балки до маси вантажу є інша формула визначення прогинів осі балки.

*Метою роботи* є отримання аналітичного розв'язку задачі вимушених коливань газопроводу при проходженні очисного поршня вздовж його надземної ділянки за умови защемлення її кінців, відсутності коливань вздовж газопроводу у початковий момент, врахуванні прогинів осі газопроводу під дією його власної ваги і неврахуванні інерційних навантажень.

### Основна частина

Для реалізації задачі про вимушені коливання газопроводу під дією динамічних сил, викликаних рухом твердого тіла в трубопроводі, розглядається відкрита ділянка траси, яка є однопрогінним балковим переходом (рис. 1). За наявності проміжних опор на переході задачу можна реалізувати, використавши рівняння трьох моментів з відповідними граничними умовами. В початковий момент ( $t = 0$ ) балка (газопровід) нерухома, тобто  $\frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0$ . Прогин центрів ваги перерізів балки, якщо  $t = 0$ , викликаний власною вагою балки, знаходився за використання методу сил [2]

$$u|_{t=0} = \frac{q}{2EI} \left( \frac{x^4}{12} - \frac{lx^3}{6} + \frac{l^2 x^2}{12} \right), \quad (1)$$

де  $q$  — інтенсивність розподіленого навантаження (вага одиниці довжини газопроводу, Н/м);  $l$  — довжина надземної частини газопроводу, м;  $EI$  — жорсткість балки, Н·м<sup>2</sup>;  $E$  — модуль пружності матеріалу балки, Па;  $I$  — осьовий момент інерції поперечного перерізу балки, м<sup>4</sup>;  $x$  — координата балки, м.

Рівняння вільних коливань балки має такий вигляд:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = 0, \quad (2)$$

де  $u$  — прогин осі балки у перерізі  $x$ ;  $t$  — час;  $a^2 = \frac{EI}{\rho A}$ ;  $A$  — площа поперечного перерізу балки, м<sup>2</sup>;  $\rho$  — густина матеріалу балки, кг/м<sup>3</sup>.

Рівняння вимушених коливань балки відрізняються від рівняння (2) наявністю правої частини, відмінної від нуля. В нашому випадку матимемо

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = F(x, t) \frac{1}{\rho A}, \quad (3)$$

де  $F(x, t)$  — розподілене навантаження, викликане рухомим вантажем.

$F(x, t)$  всюди по балці рівне нулю за виключенням перерізу  $x = vt$ ,

$$F(x, t) = G \delta(x - vt), \quad (4)$$

де  $G$  — вага вантажу, що рухається по балці, Н;  $\delta(x - vt)$  — дельта-функція Дірака [4].

Таким чином, маємо таку крайову задачу:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} + a^2 \frac{\partial^4 u}{\partial x^4} = \frac{G}{\rho A} \delta(x - vt), \quad (5)$$

$$u|_{t=0} = \frac{q}{2EI} \left( \frac{x^4}{12} - \frac{lx^3}{6} + \frac{l^2x^2}{12} \right); \quad \frac{\partial u}{\partial t}|_{t=0} = 0; \quad (6)$$

$$u|_{x=0} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=0} = 0; \quad u|_{x=l} = 0; \quad \frac{\partial u}{\partial x}|_{x=l} = 0. \quad (7)$$

Для розв'язання задачі (5)—(7) використовуємо інтегральне перетворення Лапласа [5]

$$\bar{u}(x, s) = \int_0^{\infty} u(x, t) e^{-st} dt, \quad (8)$$

де  $\bar{u}(x, s)$  — інтегральне перетворення Лапласа функції  $u(x, t)$ ;  $s$  — параметр перетворення Лапласа.

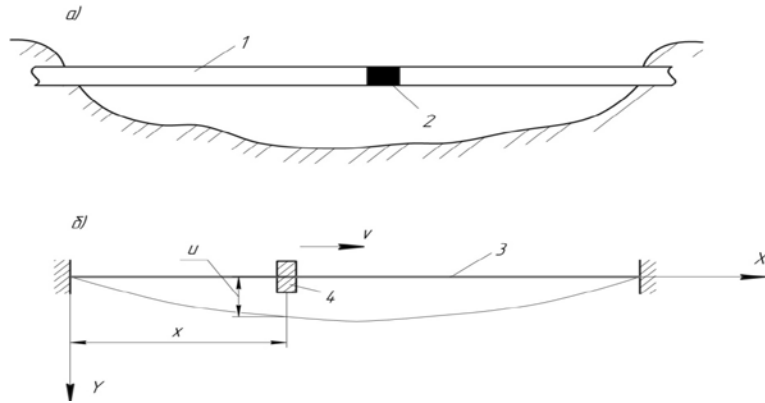


Рис. 1: а — перехід газопроводу без додаткових опор: 1 — газопровід; 2 — очисний поршень; б — розрахункова схема газопроводу: 3 — зашлепнена з обох кінців балка; 4 — рухомий вантаж;  $v$  — швидкість руху вантажу

При цьому отримуємо

$$\frac{\partial^4 \bar{u}}{\partial x^4} + \frac{s^2}{a^2} \bar{u} = \frac{s}{a^2} u|_{t=0} + \frac{G}{EIv} e^{-\frac{sx}{v}}; \quad (9)$$

$$\bar{u}|_{x=0} = 0; \quad \frac{d\bar{u}}{dx}|_{x=0} = 0; \quad \bar{u}|_{x=l} = 0; \quad \frac{d\bar{u}}{dx}|_{x=l} = 0. \quad (10)$$

Отримано звичайне неоднорідне диференціальне рівняння четвертого порядку.

Неоднорідне диференціальне рівняння розв'язуємо методом варіації довільних постійних, а для цього потрібно у першу чергу знати розв'язок однорідного рівняння. Однорідне рівняння має вигляд

$$\frac{\partial^4 \bar{u}}{\partial x^4} + \frac{s^2}{a^2} \bar{u} = 0. \quad (11)$$

Характеристичне рівняння у цьому випадку  $k^4 + s^2/a^2 = 0$  і його корені

$$k_1 = \sqrt{\frac{s}{a}} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2} \right); \quad k_2 = \sqrt{\frac{s}{a}} \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} + i \frac{\sqrt{2}}{2} \right); \quad k_3 = \sqrt{\frac{s}{a}} \left( -\frac{\sqrt{2}}{2} - i \frac{\sqrt{2}}{2} \right); \quad k_4 = \sqrt{\frac{s}{a}} \left( \frac{\sqrt{2}}{2} - i \frac{\sqrt{2}}{2} \right).$$

Розв'язок рівняння (11) за використання коренів характеристичного рівняння після перетворень набуде вигляду

$$\begin{aligned} \bar{u} = & C_1 e^{\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x + i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + C_2 e^{-\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x + i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + \\ & + C_3 e^{-\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x - i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + C_4 e^{\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x - i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right). \end{aligned} \quad (12)$$

Розв'язок неоднорідного рівняння (9) потрібно шукати, беручи до уваги аналітичний вираз

$$\begin{aligned} \bar{u} = & C_1(x) e^{\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x + i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + C_2(x) e^{-\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x + i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + \\ & + C_3(x) e^{-\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x - i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right) + C_4(x) e^{\sqrt{\frac{s}{2a}}x} \left( \cos \sqrt{\frac{s}{2a}}x - i \sin \sqrt{\frac{s}{2a}}x \right), \end{aligned} \quad (13)$$

де  $C_1(x)$ ,  $C_2(x)$ ,  $C_3(x)$ ,  $C_4(x)$  — функції координати  $x$  ділянки газопроводу, величини яких знаходяться за методом варіацій довільних постійних. Аналітичні вирази цих функцій тут не приводимо.

Для знаходження розв'язку шукаємо далі обернене перетворення Лапласа. При цьому оригінал отримано за використання таблиць обернених перетворень Лапласа [5], [6], а також таких принципів:

- перетворення Лапласа кожного доданка представлялося у вигляді добутку двох співмножників;
- оригінал функції першого співмножника знаходився за допомогою таблиць обернених перетворень та властивостей перетворень Лапласа;
- оригінал функції другого співмножника отримано за використання комплексного інтеграла Рімана–Мелліна

$$f(t) = \frac{1}{2\pi i} \int_{\beta-i\infty}^{\beta+i\infty} e^{st} F(s) ds, \quad (14)$$

де  $F(s)$  — перетворення Лапласа функції  $f(t)$ ;  $\beta$  — величина більша нуля, для якої справедлива нерівність  $|f(t)| < Me^{\beta t}$  ( $M > 0, \beta > 0$ );

– на кінець для отримання оригінала функції добутку двох співмножників використовувалася теорема Бореля [5].

З (14) випливає, що інтегрування ведеться вздовж осі, яка паралельна уявній осі комплексної площини. Функції, для яких під час визначення їх оригіналів застосовують інтеграл Рімана–Мелліна, мають один полюс  $s=0$  і, крім того, точка  $s=0$  є точкою розгалуження функцій (ці функції двозначні). Для того, щоб застосувати теорему Коші [5] для визначення інтеграла Рімана–Мелліна, необхідно виділити замкнутий контур, для якого точка розгалуження лежить зовні контуру. У такому разі область, що розміщена всередині контуру є областю однозначності функції. Для однозначної функції інтеграл по будь-якому замкнутому контуру дорівнює нулю, якщо в області обмеженій цим контуром відсутні полюси функції.

Після знаходження оригіналів всіх доданків, які входять у аналітичний вираз для  $\bar{u}(x, s)$ , і виконання деяких перетворень з отриманим оригіналом  $u(x, t)$  отримуємо

$$\begin{aligned} u(x, t) = & \frac{q}{24EI} (x^4 - 2lx^3 + l^2x^2) + \frac{qa^2t^2}{2EI} + \frac{a^3G}{EIv^3} \left[ \frac{v^2}{a} \left( t - \frac{x}{v} \right) - \sin \frac{v^2}{a} \left( t - \frac{x}{v} \right) \right] \times \\ & \times \eta \left( t - \frac{x}{v} \right) - \frac{8}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{qa^2}{EI} \int_0^t \tau \sqrt{\tau} \int_0^\infty f(y, \tau) f_1(y, x) dy d\tau - \frac{4a^2G}{\pi\sqrt{\pi}EIv} \int_0^t \left[ \sqrt{\tau} - \frac{\sqrt{a}}{v} \sqrt{\frac{\pi}{2}} \right] \times \\ & \times \left( \sin \frac{v^2\tau}{a} S \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) + \cos \frac{v^2\tau}{a} C \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) \right) \int_0^\infty f(y, \tau) f_1(y, x) dy d\tau + \frac{8}{3\pi\sqrt{\pi}} \frac{qa^2}{EI} \times \\ & \times \int_0^t \tau \sqrt{\tau} \int_0^\infty f(y, \tau) f_2(y, x) dy d\tau + \frac{4a^2G}{\pi EI v} \int_0^t \left[ \sin \frac{v^2\tau}{a} C \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) - \cos \frac{v^2\tau}{a} S \left( \frac{v\sqrt{\tau}}{\sqrt{a}} \right) \right] \int_0^\infty \frac{f(y, \tau)}{y} f_3(y, x) dy d\tau, \end{aligned} \quad (15)$$

$$\text{де } f(y, \tau) = \frac{e^{-y^2(t-\tau)}}{\left( 2 + 4 \sin^2 \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) e^{\frac{2yl}{\sqrt{2a}}} - \left( 1 + e^{-\frac{4yl}{\sqrt{2a}}} \right)};$$

$$\begin{aligned}
f_2(y, x) = & e^{-\frac{y(l-x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} + \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} + \left( \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} - \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right] - \\
& - e^{-\frac{y(l+x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} + \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} + \left( \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} + 3 \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right] + \\
& + e^{-\frac{y(3l-x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} - \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} + \left( \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} - 3 \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right] + \\
& + e^{-\frac{y(3l+x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} - \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} + \left( \sin \frac{yl}{\sqrt{2a}} + \cos \frac{yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right]; \\
f_3(y, x) = & -e^{-\frac{yx}{\sqrt{2a}}} \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} + e^{-\frac{y(2l-x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( 1 - \sin \frac{2yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} + 2 \sin^2 \frac{yl}{\sqrt{2a}} \times \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right] + \\
& + e^{-\frac{y(2l+x)}{\sqrt{2a}}} \left[ \left( 1 + \sin \frac{2yl}{\sqrt{2a}} \right) \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}} - 2 \sin^2 \frac{yl}{\sqrt{2a}} \cos \frac{yx}{\sqrt{2a}} \right] - e^{-\frac{y(4l-x)}{\sqrt{2a}}} \sin \frac{yx}{\sqrt{2a}}.
\end{aligned}$$

Аналітичний вираз (15) є розв'язком крайової задачі (5)—(7), тобто визначає коливання осі газопроводу на відкритій його ділянці під час проходження механічного пристрою, якщо кінці відкритої ділянки газопроводу можна вважати заземленими.

### Висновки

Отримано розв'язок крайової задачі з визначенням коливань осі газопроводу на відкритій його ділянці під час проходження очисного поршня за граничних умов, що відповідають заземленню його кінців, при нульовій швидкості точок осі газопроводу у початковий момент і відомому прогинув вздовж всієї ділянки газопроводу під дією його власної ваги.

Задача розв'язувалася методом інтегрального перетворення Лапласа з урахуванням ваги очисного поршня і неврахуванням інерційних навантажень. Розв'язок отримано у формі подвійних інтегралів.

Отриманий результат дозволяє знайти переміщення будь-якої точки осі ділянки газопроводу для будь-якого моменту часу перебування очисного поршня на цій ділянці, а також знайти переміщення вказаних точок та їх швидкості в момент кінцевого перебування очисного поршня на ділянці. Ці дві величини будуть початковими умовами для дослідження вільних коливань газопроводу після проходження очисного поршня через відкриту ділянку газопроводу.

Запропонована математична модель дозволяє прогнозувати характер вимушених коливань надземної ділянки трубопроводу під час проходження механічних пристроїв по газопроводу, що дає змогу запобігти порушенням стійкості повітряних переходів в процесі очистки чи внутрішньотрубного діагностування.

### СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

- [1] А. П. Філіпов, «Коливання балки під дією рухомого вантажу», *Прикладна механіка*, т. 1, вип. 3, с. 268-275. 1955.
- [2] В. И. Феодосьев, *Сопротивление материалов*. Москва: Наука, 1970.
- [3] С. П. Тимошенко, *Колебания в инженерном деле*. Москва: Физматгиз, 1959.
- [4] Г. Корн, и Т. Корн, *Справочник по математике для научных работников и инженеров*. Москва: Наука, 1970.
- [5] Г. Деч, *Руководство к практическому применению преобразования Лапласа и z-преобразования*. Москва: Наука, 1971.
- [6] В. А. Диткин, и А. П. Прудников. *Справочник по операционному исчислению*. Москва: Высшая школа, 1965.

Рекомендована кафедрою галузевого машинобудування ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 1.10.2018

**Грудз Володимир Ярославович** — д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, e-mail: v.grudz@nung.edu.ua ;

**Занухляк Василь Богданович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, e-mail: ya.doroshenko@nung.edu.ua ;

**Тутко Тетяна Феліксівна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри спорудження та ремонту газонафтопроводів і газонафтосховищ, e-mail: tutko-tatjana@rambler.ru ;

**Дубей Ольга Ярославівна** — канд. техн. наук, доцент кафедри нафтогазової гідромеханіки, e-mail: olgadubej@gmail.com .

Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу, Івано-Франківськ.

**V. Ya. Grudz<sup>1</sup>**  
**V. B. Zapuhliak<sup>1</sup>**  
**T. F. Tutko<sup>1</sup>**  
**O. Ya. Dubei<sup>1</sup>**

## **Estimation of Dynamic Loads in Calculations of Aboveground Sections of Gas Pipelines**

<sup>1</sup>Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas

*In this paper, the problem of determining the oscillation of the axis of the aboveground part of the gas pipeline laid through the natural obstacle (river, beam, etc.) without intermediate supports, while passing through the purifying piston, is considered. The ends of the area of the gas pipeline in the task are considered to be pinched, taking into account the deflection of the axis of the gas pipeline from its own weight. At the initial moment of time, the land plot of the gas pipeline is stationary. In the composite differential equation for describing the indicated oscillations as their cause, the actual weight of the open section of the gas pipeline and the weight of the mobile cleaning piston are taken into account and the inertial loads are not taken into account. In connection with the movement of the cleaning piston in the differential equation, the Dirac delta function is available. To solve the differential equation of this problem, an integral Laplace transform over time is used. As a result, we obtain an inhomogeneous ordinary differential equation of the fourth order along the coordinate  $x$  of the gas pipeline area, which was solved by the method of variation of arbitrary constants. In this case, it was necessary to determine the four functions that were carried out from the boundary conditions of the problem (the absence of deflections along the ends of the gas pipeline and the angles of rotation of their transverse sections), i.e., the solution of the system of four equations satisfying the specified boundary conditions. Next, there was a Laplace transform with a Riemann-Mellin integral. In order to implement the inverse Laplace transform, the terms of direct Laplace transformation were recorded in the form of the product of two pluralities and the original of their product. In this way, the solution of the problem in the form of double integrals is obtained, which allows us to find the displacement of the points of the axis of the gas pipeline section along the entire length of its above-ground part and for any moment of the residence of the cleaning piston in the specified section.*

**Keywords:** superstructure, go-devil pig, oscillations of the gas pipeline axis, differential equation.

**Grudz Volodymyr Ya.** — Dr. Sc. (Eng.), Professor, Head of the Chair of Construction and Repair of Gas Pipelines and Gas Storage Facilities, e-mail: v.grudz@nung.edu.ua ;

**Zapuhliak Vasyl B.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair of Construction and Repair of Gas Pipelines and Gas Storage Facilities, e-mail: ya.doroshenko@nung.edu.ua;

**Tutko Tetiana F.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Assistant Professor of the Chair Construction and Repair of Gas Pipelines and Gas Storage Facilities, e-mail: tutko-tatjana@rambler.ru ;

**Dubei Olha Ya.** — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor of the Chair of Oil and Gas Hydromechanics, e-mail: olgadubej@gmail.com

**В. Я. Грудз<sup>1</sup>**  
**В. Б. Запухляк<sup>1</sup>**  
**Т. Ф. Тутко<sup>1</sup>**  
**О. Я. Дубей<sup>1</sup>**

## **Оценка динамических нагрузок в расчетах надземных участков газопроводов**

<sup>1</sup>Івано-Франківський національний технічний університет нафти і газу

*Рассмотрена задача определения колебаний оси надземной участка газопровода, проложенного через естественное препятствие (реку, балку и т.п.) без промежуточных опор, при прохождении через нее очистного поршня. Концы участка газопровода в задаче считаются заземленными, учтен прогиб оси газопровода под его собственным весом. В начальный момент времени наземный участок газопровода неподвижен. В составленном дифференциальном уравнении для описания указанных колебаний в качестве их причин учтен собственный вес открытого участка газопровода и вес подвижного очистного поршня и не учтены инерционные нагрузки. В связи с движением очистного поршня в дифференциальном уравнении используется дельта-функция Дирака. Для решения дифференциального уравнения этой задачи применяют интегральное преобразование Лапласа по времени. В результате получено неоднородное обыкновенное дифференциальное уравнение четвертого порядка по координате  $x$  участка газопровода, которое решено методом вариации произвольных постоянных. При этом определены четыре функции из граничных условий задачи (отсутствие прогибов по концам участка газопровода и углов поворота их поперечных сечений), то есть решена система четырех уравнений, удовлетворяющих указанным граничным условиям. Найдено обратное преобразование Лапласа с использованием комплексного интеграла Римана–Меллина. С целью реализации обратного преобразования Лапласа слагаемые прямого преобразования Лапласа записаны в виде произведения двух сомножителей и оригинала их произведения. Таким способом получено решение задачи в виде двойных интегралов, которое позволяет найти перемещения точек оси участка газопровода по всей длине его надземной части для любого момента времени пребывания очистного поршня на указанном участке и позволяет определять динамические нагрузки на этот газопровод.*

**Ключевые слова:** наземный участок газопровода, очистной поршень, колебания оси газопровода, дифференциальное уравнение.

**Грудз Владимир Ярославович** — д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, e-mail: v.grudz@nung.edu.ua ;

**Запухляк Василий Богданович** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, e-mail: ya.doroshenko@nung.edu.ua ;

**Тутко Татьяна Феликсовна** — канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры сооружения и ремонта газонефтепроводов и газонефтехранилищ, e-mail: tutko-tatjana@rambler.ru ;

**Дубей Ольга Ярославовна** — канд. техн. наук, доцент кафедры нефтегазовой гидромеханики, e-mail: olgadubej@gmail.com